

---

---

# НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

---

---

ISSN 1814-1196

№ 2–3 (79)

2020

УДК 681.51(06)  
Н 76

## Учредитель

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

## Редакционная коллегия

### Главный редактор

*Лемешко Борис Юрьевич*, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

### Заместители главного редактора

*Алексеев Сергей Владимирович*, академик, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск

*Вострецов Алексей Геннадьевич*, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

*Шокин Юрий Иванович*, академик, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск

### Ответственный секретарь

*Воевода Александр Александрович*, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

### Члены редколлегии

*Алаин Бриллиард*, д-р, проф., Университет Мюлуза, Франция

*Алиферов Александр Иванович*, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

*Виролайнен Вели Матти*, проф., Технологический университет Лаппеэнранта, Финляндия

*Воронин Владимир Викторович*, д-р техн. наук, доцент, ТОГУ, г. Хабаровск

*Воропай Николай Иванович*, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Институт систем энергетики им. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск

*Воскобойников Юрий Евгеньевич*, д-р физ.-мат. наук, проф., Сибстрин, г. Новосибирск

*Гайдук Анатолий Романович*, д-р техн. наук, проф., ЮФУ, г. Таганрог

*Гозбенко Валерий Ерофеевич*, д-р техн. наук, проф., ИрГУПС, г. Иркутск

*Григорьев Юрий Дмитриевич*, д-р техн. наук, проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург

*Зиновьев Геннадий Степанович*, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

*Крюков Андрей Васильевич*, д-р техн. наук, проф., ИрГУПС, г. Иркутск

*Лути Серджио*, д-р, проф., Падуанский университет, Италия

*Лисицина Лилия Ивановна*, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

*Мухомад Юрий Федорович*, д-р техн. наук, проф., ИрГУПС, г. Иркутск

*Наумова Елена Николаевна*, д-р техн. наук, проф., Университет Тафтса, США

*Неизвестный Игорь Георгиевич*, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск

*Нейман Владимир Юрьевич*, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

*Носек Ярослав*, д-р техн. наук, проф., Технический университет Либерец, Чехия

*Ронжин Андрей Леонидович*, д-р техн. наук, проф., СПИИРАН, г. Санкт-Петербург

*Рубан Анатолий Иванович*, д-р техн. наук, проф., СФУ, г. Красноярск

*Рылов Анатолий Игоревич*, д-р физ.-мат. наук, Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, г. Новосибирск

*Степанов Олег Андреевич*, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

*Уранчимэг Тудедагва*, д-р техн. наук, проф., Хемницкий технический университет, Германия

*Фомин Василий Михайлович*, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск

*Хабаров Валерий Иванович*, д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

*Ханова Анна Алексеевна*, д-р техн. наук, проф., АГТУ, г. Астрахань

*Хи Жаохуи*, Харбинский университет науки и технологии, Китай

*Хлебников Михаил Владимирович*, д-р физ.-мат. наук, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва

*Чичиндаев Александр Васильевич*, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

*Шандаров Станислав Михайлович*, д-р физ.-мат. наук, проф., ТУСУР, г. Томск

Адрес редакции, издателя: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ

Тел. (383) 346-56-88, тел., факс (383) 344-49-98

E-mail: [nauchvest@corp.nstu.ru](mailto:nauchvest@corp.nstu.ru)

Web Site: <http://journals.nstu.ru/vestnik/>

16+

Индекс: 82962 («РОСПЕЧАТЬ»)

УДК 681.51(06)

© Коллектив авторов, 2020

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2020

---

---

**НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК  
НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

---

---

ISSN 1814-1196

№ 2–3 (79)

2020

**СОДЕРЖАНИЕ**

*ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ*

<b>Бакланов А.Е., Григорьева С.В., Алимханова А.Ж., Дмитриев А.К.</b> Система управления температурой внутри помещения, основанная на технологии связи по видимому свету .....	7
<b>Восвода А.А., Шипагин В.И.</b> Синтез нейросетевого регулятора управления нелинейной моделью перевернутого маятника на тележке .....	25
<b>Гайдук А.Р., Капустян С.Г., Плаксиенко В.С., Кабалап А.Э.А.</b> Управление группой БЛА при неопределенных запаздываниях в каналах связи .....	37
<b>Elakkiya R., Grif M.G., Prikhodko A.L., Bakaev M.A.</b> Recognition of Russian and Indian sign languages used by the deaf people .....	57
<b>Кинжалиева А.Р., Ханова А.А.</b> Имитационная модель управления оперативно-выездными бригадами электросетевой компании .....	77

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

<b>Гафуров К.А.</b> Исследование соответствия информационных процессов и зрения специалистов в системах с высокой профессиональной информативной нагрузкой .....	95
--	----

*ЭНЕРГЕТИКА*

<b>Дворцовой А.И., Григорьева О.К., Тихонов И.А.</b> Оценка составляющих перерасхода топлива теплоэнергетического оборудования .....	109
<b>Щинников П.А., Францева А.А., Садкин И.С.</b> Поагрегатная оценка капиталовложений в энергоблоки электростанций с использованием параметрической степенной функции .....	123
<b>Левин В.М., Гужов Н.П., Черненко Н.А., Яхья А.А.</b> Методология управления ремонтами оборудования в электрических сетях нефтепромыслов .....	139
<b>Правила для авторов</b> .....	156

Корректор *Л.Н. Кинит*  
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

---

Журнал зарегистрирован Комитетом РФ по печати. Свидетельство о регистрации  
средства массовой информации ПИ № 77–1599 от 10 февраля 2000 г.  
Периодичность издания – 4 номера в год.  
Журнал реферирован в ВИНТИ (<http://www.2.viniti.ru>)  
Лицензия ИД 04303 от 20.03.01. Подписано в печать 11.11.2020. Выход в свет 13.11.2020.  
Формат 70 × 108 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экземпляров.  
Уч.-изд. л. 14,0. Печатных листов 10,0. Издательский № 187. Заказ № 968.  
Цена договорная

---

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

---

---

# SCIENCE BULLETIN OF THE NOVOSIBIRSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

---

---

ISSN 1814-1196

№ 2–3 (79)

2020

УДК 681.51(06)  
H 76

**Journal was established by**  
Novosibirsk State Technical University

## Editorial board

### Chief editor

*Lemeshko B. Yu.*, D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

### Deputy chief editor

*Alekseenko S. V.*, D. Sc. (Phys. & Math.), Institute of Thermophysics, Novosibirsk, RF

*Vostretsov A. G.*, D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

*Shokin Yu. I.*, D. Sc. (Phys. & Math.), Institute of Computational Technologies, Novosibirsk, RF

### Executive Secretary

*Voevoda A. A.*, D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

### The members of the editorial Board

*Brillard A.*, D. Sc. (Eng.), Universite de Haute Alsace, Mulhouse, France

*Aliferov A. I.*, D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

*Virolainen V. M.*, professor, Lappeenranta Teknillinen Yliopisto, Finland

*Voronin V. V.*, D. Sc. (Eng.), Pacific National University, Khabarovsk, RF

*Voropay N. I.*, Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Eng.), Melentiev Energy Systems Institute,

Irkutsk, RF

*Voskoboinikov Yu. E.*, D. Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,

Novosibirsk, RF

*Gaiduk A. R.*, D. Sc. (Eng.), Southern Federal University, Taganrog, RF

*Gozbenko V. E.*, D. Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF

*Grigor'ev Yu. D.*, D. Sc. (Eng.), Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, RF

*Zinoviev G. S.*, D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

*Kryukov A. V.*, D. Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF

*Lupi Sergio*, D. Sc. (Eng.), Università degli Studi di Padova, Padua, Italy

*Lisitsina L. I.*, D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

*Mukhopad Yu. F.*, D. Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF

*Naumova E.N.*, PhD. (Math.), Tufts University, USA

*Neizvestnyi I. G.*, D. Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

*Neiman V. Yu.*, D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

*Nosek J.*, D. Sc. (Eng.), Technical University of Liberec, Czech Republic

*Ronzhin A. L.*, D. Sc. (Eng.), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,

Saint-Petersburg, RF

*Ruban A. I.*, D. Sc. (Eng.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, RF

*Rylov A. I.*, D. Sc. (Phys. & Math.), Sobolev Institute of Mathematics, Novosibirsk, RF

*Stepanov O. A.*, D. Sc. (Eng.), ITMO University, Saint-Petersburg, RF

*Uranchimeg T.*, D.Sc. (Eng.), Technische Universität Chemnitz, Germany

*Fomin V. M.*, D. Sc. (Phys. & Math.), Khristianovich Institute of theoretical and applied mechanics SB RAS, Novosibirsk, RF

*Khabarov V. I.*, D. Sc. (Eng.), Siberian Transport University, Novosibirsk, RF

*Khanova A. A.*, D. Sc. (Eng.), Astrakhan State Technical University, Astrakhan, RF

*Xi Zhaohui*, Harbin University of Science and Technology, China

*Khlebnikov M. V.*, D. Sc. (Phys. & Math.), Institute of Control Sciences, Moscow, RF

*Chichindaev A. V.*, D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

*Shandarov S. M.*, D. Sc. (Phys. & Math.), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, RF

Editorial Address: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Tel. (383) 346-56-88, Fax (383) 344-49-98

E-mail: [nauchvest@corp.nstu.ru](mailto:nauchvest@corp.nstu.ru)

Web Site: <http://journals.nstu.ru/vestnik/>

УДК 681.51(06)

© Authors, 2020

© Novosibirsk State Technical University, 2020

---

---

**SCIENCE BULLETIN  
OF THE NOVOSIBIRSK STATE  
TECHNICAL UNIVERSITY**

---

---

ISSN 1814-1196

№ 2–3 (79)

2020

**CONTENTS**

*INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL*

<b>Baklanov A.E., Grigorieva S.V., Alimkhanova A.Zh., Dmitriev A.K.</b> An indoor temperature control system based on visible light communications technology .....	7
<b>Voevoda A.A., Shipagin V.I.</b> Synthesis of a neural network control regulator of a nonlinear model of an inverted pendulum on a cart .....	25
<b>Gaiduk A.R., Kapustyan S.G., Plaksienko V.S., Kabalan A.E.A.</b> Control of the UAV group at uncertain delays in communication channels .....	37
<b>Elakkiya R., Grif M.G., Prikhodko A.L., Bakaev M.A.</b> Recognition of Russian and Indian sign languages used by the deaf people .....	57
<b>Kinzhalieva A.R., Khanova A.A.</b> A simulation model for managing field service teams of a power grid company .....	77

*INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION MEASUREMENT  
DEVICES AND SYSTEMS*

<b>Gafurov K.A.</b> Study of conformity between information processes and vision of specialists in systems with a high professional information load .....	95
--	----

*POWER ENGINEERING*

<b>Dvortsevov A.I., Grigorieva O.K., Tikhonov I.A.</b> Evaluation of components of an excess fuel flow in the heat power equipment .....	109
<b>Shchinnikov P.A., Frantseva A.A., Sadkin I.S.</b> Aggregate estimation of investments in power plant units using a parametric power function .....	123
<b>Levin V.M., Guzhov N.P., Chernenko N.A., Yahya A.A.</b> Methodology for managing equipment repairs in oilfield electrical networks .....	139
<b>Rules for authors</b> .....	156

Editor *L.N. Kinsht*  
Computer imposition *S.I. Tkacheva*

---

The journal is registered by Russian Federation Committee on the press.  
The certificate on registration of mass media of PI No. 77-1599 of February 10, 2000.  
Publication frequency – 4 numbers a year.  
Journal referenced in VINITI (<http://www.viniti.ru>)  
License ID 04303 from 20.03.2001. Signed in print November 11, 2020.  
Date of publication November 13, 2020. Format 70 × 108 1/16  
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 14,0. Printed pages 10,0.  
Publishing number 187. Order number 968.

---

It is printed in printing house of Novosibirsk State Technical University  
20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073

ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,  
COMPPUTER ENGINEERING  
AND CONTROL

УДК 681.78.01

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-7-24

## Система управления температурой внутри помещения, основанная на технологии связи по видимому свету\*

А.Е. БАКЛАНОВ<sup>1,a</sup>, С.В. ГРИГОРЬЕВА<sup>1,b</sup>, А.Ж. АЛИМХАНОВА<sup>1,c</sup>,  
А.К. ДМИТРИЕВ<sup>2,d</sup>

<sup>1</sup> 070004, Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова А.К., 69, Восточно-Казахстанский технический университет

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

<sup>a</sup> [Abaklanov\\_62@mail.ru](mailto:Abaklanov_62@mail.ru) <sup>b</sup> [SGrigorieva@ektu.kz](mailto:SGrigorieva@ektu.kz) <sup>c</sup> [aslima\\_alimhanova@mail.ru](mailto:aslima_alimhanova@mail.ru)

<sup>d</sup> [alexander\\_dmitriev@ngs.ru](mailto:alexander_dmitriev@ngs.ru)

В статье предлагается новый подход к управлению температурой в помещении, основанный на технологии Visible Light Communications. Суть данного подхода состоит в использовании светодиодных осветительных приборов в качестве передатчиков информации о температуре в дополнение к функции освещения. Для передачи данных была применена модуляция света по стандарту UART. В качестве приемника использовался фотодиод, позволяющий регистрировать относительно слабые сигналы. Обработка всех данных осуществлялась с помощью микроконтроллеров. При этом модуляция по стандарту UART инициализировалась также микроконтроллером.

В статье подробно описываются принципиальные схемы передающего и приемного устройств. На основе разработанных принципиальных схем была создана экспериментальная установка, представляющая собой два блока. Передающий блок включает в себя датчик температуры, микроконтроллер, драйвер и светодиод. Приемный блок включает фотодиод, усилитель и микроконтроллер. В качестве микроконтроллеров использовалась микросхема ATmega328P. Экспериментальная установка представляет собой опытные образцы двух приборов.

Для контроля передачи сигнала проводились измерения уровня и формы импульсов в приемном устройстве с помощью осциллографа. Уровень сигнала анализировался после всех электронных компонентов до входа на микроконтроллер. Результаты экспериментов показали, что передача данных с использованием белых осветительных светодиодов достаточно устойчива. Это позволяет сделать вывод о возможности организации беспроводного управления температурным режимом в помещении без Wi-Fi. Перспективой использования предложенного подхода управления температурой с помощью белых светодиодов является создание системы управления «Умный дом» без проводных линий связи и с использованием недорогих микроконтроллеров, что значительно уменьшает стоимость системы.

**Ключевые слова:** светодиод, система управления, передача данных, температура, микроконтроллер, связь по видимому свету, оптическая беспроводная связь

---

\* Статья получена 06 февраля 2020 г.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время современные системы управления получают информацию для мониторинга и управления физическими процессами от датчиков и исполнительных устройств, которые пространственно удалены друг от друга. Классическая передача данных между модулями системы управления осуществляется через провода. Необходимость физического подключения датчиков и исполнительных механизмов ограничивает гибкость, масштабируемость и надежность работы системы. Переход на беспроводные системы связи позволит снизить затраты на монтаж и риски отказов при эксплуатации, что приведет к построению экономичной, надежной системы, а также предоставит возможность организации интеллектуальной инфраструктуры.

Популярные платформы управления, такие как Internet of Things, Smart House, Device to Device, Machine to Machine, используют для построения своей инфраструктуры беспроводные системы передачи данных. Большинство международных аналитических агентств дают высокие оценки росту числа соединенных устройств в мире. В 2016 году на конференции Internet of Things World, которая прошла в Санта Клара (США), компания SigFox привела прогнозируемые данные от различных компаний. Значения отличаются на порядок. Например, аналитиками компании Gartner было заявлено, что количество соединенных устройств в 2020 году достигнет 21 млрд единиц, а специалистами компании Intel приводится значение в 200 млрд единиц для этого же года [1]. Согласно отчету Cisco Visual Networking Index прогнозируется увеличение объема мобильной передачи данных в семь раз в период с 2016 по 2021 год, а количество мобильных устройств на душу населения достигнет 11,6 млрд к 2021 году [2]. В мае 2019 года экспертами компании Strategy Analytics приведены данные о подключении к сети Интернет 22 млрд устройств [3]. Приведенный прогноз, а также реальные данные показывают необходимость внедрения сетевых архитектур с высокой пропускной способностью, которые смогут удовлетворить растущие потребности в ресурсах беспроводной сети. Радиочастотная полоса пропускания не позволяет увеличивать скорость передачи, что повлияло на необходимость разработки новых беспроводных технологий связи.

Дополнительное использование оптических частот позволит решить проблемы, связанные с дефицитом спектра в беспроводной связи на основе радиочастоты. В оптической беспроводной связи (Optical Wireless Communication, OWC) можно использовать три основных диапазона частот ультрафиолетового, инфракрасного и видимого света. В пределах последних двух диапазонов возможна связь посредством видимого света (Visible Light Communications, VLC), беспроводная оптика (Free Space Optics, FSO) и связь через оптическую камеру (Optical Camera Communications OCC) [4–6]. Технологии OWC обладают рядом уникальных преимуществ, таких как широкий спектр, высокая скорость передачи данных, низкая задержка, высокая безопасность, устойчивость к радиочастотным электромагнитным помехам, свободное лицензирование, низкая стоимость и низкое энергопотребление. Можно отметить публикации, в которых подробно приводится сравнение технологий OWC по различным аспектам [7–10].

Политика большинства государств в области энергосбережения привела к решению отказаться от неэффективных источников света, таких как лампы



накаливания и люминесцентные лампы [11]. Реализация программ по преобразованию рынка освещения в пользу энергоэффективных источников освещения может быть достигнута благодаря применению полупроводниковых источников света (светодиодов). Одним из вариантов снижения энергозатрат является организация равномерного освещения с использованием автоматизированных систем управления, которая возможна на основе светодиодных ламп [12].

Светодиоды обладают высокими технико-экономическими и эксплуатационными показателями по сравнению с традиционным освещением: высокая световая отдача, надежность и длительный срок службы, безопасность в эксплуатации, экономическая эффективность. Светодиоды – безынерционные источники света, они не требуют времени на прогрев и переключения. Количество циклов включения и выключения не оказывает негативного влияния на их надежность. Свойства современных светодиодов освещения позволяют использовать их как для освещения, так и для передачи данных при одновременном снижении потребления энергии на мировом уровне.

Идея использования видимой части электромагнитного спектра для обеспечения передачи данных и освещения на основе использовании белых светодиодов является относительно новой. Видимый диапазон длин волн в пределах 370...780 нм обеспечивает пропускную способность ~400 ТГц, что в десять тысяч раз больше радиочастотной полосы пропускания [7, 13, 14]. Это позволяет использовать светодиодные светильники для беспроводной связи в дополнение к их основной функции – освещению. Несмотря на то что технология VLC разрабатывается и исследуется последние десять лет, уже были продемонстрированы системы передачи данных со скоростью несколько гигабит в секунду [15–18]. В результате освещение и связь могут быть интегрированы.

## **1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

В связи с быстрым развитием беспроводной технологии передачи данных с использованием осветительных светодиодов появляются задачи, связанные с прикладным характером. В перспективе системы VLC могут использоваться в широком спектре приложений [19–23]. В то же время существуют проблемы, которые ограничивают внедрение технологии VLC [8, 22, 23], поэтому использование светодиодов в основном реализуется в системах передачи аудио- и текстовой информации [24–27]. В нашей работе была поставлена задача создания системы управления температурным режимом в помещении с помощью белых светодиодов и встроенных микроконтроллеров по технологии VLC. Данная постановка задачи основывалась на опубликованных ранее авторами результатов по передаче звуковых сигналов [28] и символьных данных [29].

## **2. ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ VLC**

На основе технологии VLC предложена и разработана автоматизированная система управления исполнительным механизмом нагревателя в помещении в зависимости от заданной температуры. Датчик температуры располо-

жен в светодиодном осветительном приборе, который одновременно является передатчиком информации, в нашем случае текущей температуры. Исполнительный механизм регулятора температуры и приемник информации расположены удаленно от передатчика сигнала. Конструктивно передатчик с датчиком температуры – это один прибор, а приемник с исполнительным механизмом – другой прибор.

На рис. 1 показана схема передающего устройства. Для контроля температуры используется датчик температуры, позволяющий передавать измеряемые данные на микроконтроллер. Значения текущей температуры отображаются на индикаторе. Для передачи данных с использованием технологии VLC к системе питания светодиода добавляется сигнал, полученный с выхода микроконтроллера. Данный сигнал формируется в соответствии с технологией UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter).

Поскольку для надежной работы светодиода необходимо использовать стабилизированный ток [30], дополнительно к источнику питания был подключен стабилизатор тока.

Таким образом, для того чтобы была осуществлена устойчивая передача данных светодиодом, использовался коммутатор, который позволял соединять сигналы, поступающие по технологии UART, и подавать на светодиод стабилизированный ток. Светодиод в оптическом канале имеет модулированный свет в соответствии с сигналом, поступающим с микроконтроллера.

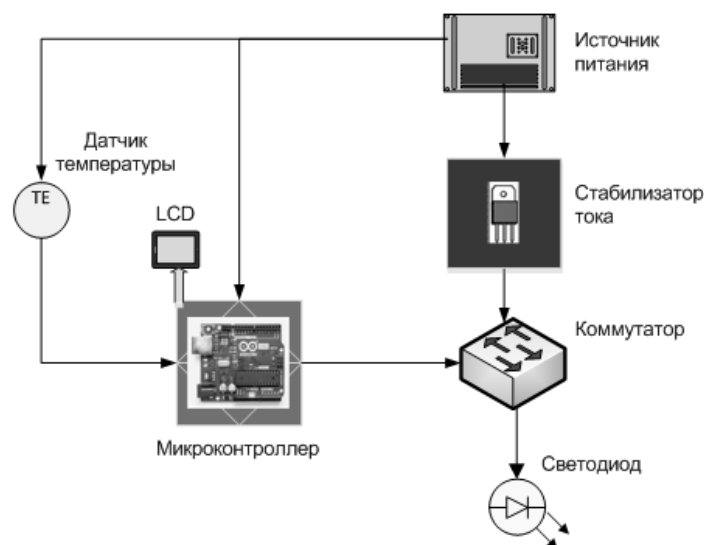


Рис. 1. Функциональная схема передатчика

Fig. 1. A functional diagram of the transmitter

На рис. 2 показана схема приемного устройства. Работа приемника заключается в следующем: приемник излучения принимает световые импульсы от излучателя и преобразует их в электрические сигналы. Эти сигналы, проходя через усилитель, поступают на формирователь, где преобразуются в импульсы ТТЛ-формы (транзисторно-транзисторная логика) для последующей обработки их микроконтроллером. Микроконтроллер расшифровывает информацию и обрабатывает алгоритм управления исполнительным механизмом.

мом в зависимости от поставленной задачи. Полученные данные о текущей температуре отображаются на индикаторе.



Рис. 2. Функциональная схема приемника

Fig. 2. A functional diagram of the receiver

В соответствии с функциональными схемами разработаны принципиальные схемы. Принципиальная схема передающего устройства представлена на рис. 3. Концепция передатчика состоит в том, что в светодиодный светильник встроены датчик температуры с передатчиком. Передатчик через светодиод светильника отправляет данные о температуре.

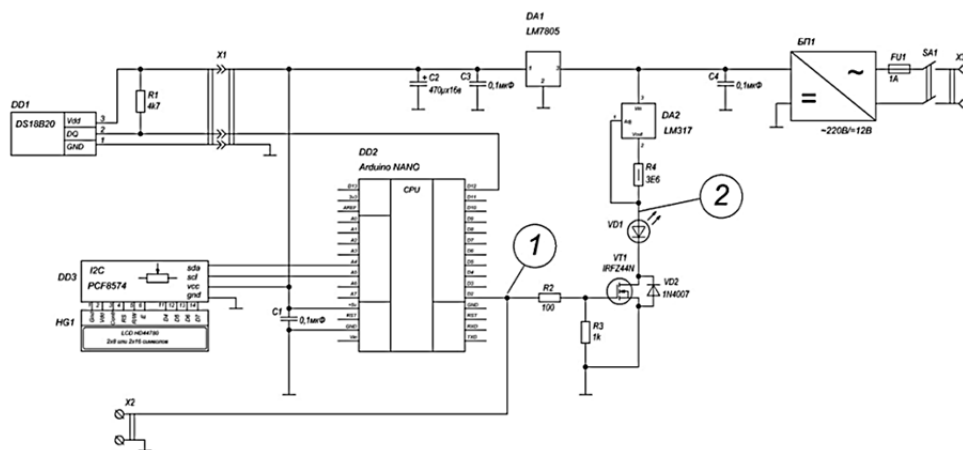


Рис. 3. Принципиальная схема передатчика

Fig. 3. A schematic diagram of the transmitter

С датчика температуры DD1 значения по запросу поступают в микроконтроллер DD2, где записываются в регистры временного хранения, обрабатываются, затем отображаются на индикаторе HG1. На индикаторе HG1 также отображается информация, необходимая для мониторинга и контроля. Из регистров временного хранения значение температуры после преобразо-

вания поступает в буфер FIFO приемопередатчика UART микроконтроллера, откуда посредством режима последовательной асинхронной передачи данных биты через выход TX микроконтроллера, через резистор R2 поступают на затвор транзистора VT1. Транзистор, работая в ключевом режиме в зависимости от потенциала на затворе, то разрешает, то запрещает прохождение тока через светодиод VD1.

В качестве датчика температуры DD1 использован интегральный датчик температуры DS18B20. Для данного датчика имеются в открытом доступе необходимые драйверы и программы подключения. Резистор R1 с номиналом 4.7 кОм рекомендован производителем микросхемы DS18B20.

Микроконтроллером DD2 является микросхема ATmega328P, которая входит в состав платы Arduino NANO и Arduino Uno.

Индикатор HG1 – ЖК-индикатор LCD1602 с модулем  $^{\circ}\text{C}$ .

Транзистор VT1 – выбран IRFZ44N, но может быть любым n-канальным MOSFET, рассчитанным для используемого светодиода VD1. Диод VD2 необходим для шунтирования транзистора от импульса тока, образующегося при отключении нагрузки. В транзисторе IRFZ44N этот диод расположен внутри корпуса.

Резистор в цепи затвора R2 ограничивает ток при открытии транзистора. Резистор R3 подключен к затвору для надежного и быстрого запираания транзистора. Это исключит возможность возникновения неопределенного состояния транзистора и, как следствие, устранил наличие ошибок в передатчике по этой причине.

Светодиод VD1 – белый мощностью 700 мА с возможностью установки на радиатор охлаждения.

Микросхема DA2 – это интегральный стабилизатор LM317, включен по схеме стабилизации тока. Резистор R4 является шунтом для стабилизатора. В нашем случае сопротивление резистора R4 составляет 3.6 Ом.

Микросхема DA1 – это интегральный стабилизатор LM7805 постоянного напряжения 5 В, обеспечивает питание платы микропроцессора, индикатора, датчика температуры.

Источник питания БП1 – осуществляет питание от сети переменного тока ~220 В, 50 Гц; БП1 – импульсный и выдает стабилизированное напряжение 12 В током 1.5 А.

C1, C3, C4 – конденсаторы фильтров, C2 – сглаживающий конденсатор.

Принципиальная схема приемного устройства представлена на рис. 4.

Принятый световой сигнал преобразуется фотодиодом VD1 в фототок и через усилитель-преобразователь тока в напряжение DA1, через разделительный конденсатор C2 поступает на вход усилителя DA2. С выхода усилителя DA2 через дифференцирующую цепочку C3–R6 поступает на вход логического элемента DD1, который выполняет функцию буферного элемента и одновременно инвертирует сигнал для последующей обработки. Инвертирование сигнала необходимо для того, чтобы привести форму сигнала нужной полярности для приемопередатчика UART, поскольку фотодиод, включенный обратной полярностью, генерирует импульсы тока инверсные. С выхода инвертора сигнал поступает на вход приемопередатчика UART микроконтроллера DD2, где расшифровывается. Полученные данные записываются в регистры хранения временных переменных, откуда поступают для даль-

нейшей обработки и вывода на ЖК-индикатор. Кнопки SB1–SB3 служат для изменения температуры регулирования. Дальнейшая обработка данных зависит от того, какие данные передаются и для чего они используются. В нашей установке мы передаем значение температуры для регулятора температуры – нагревателя EK1.

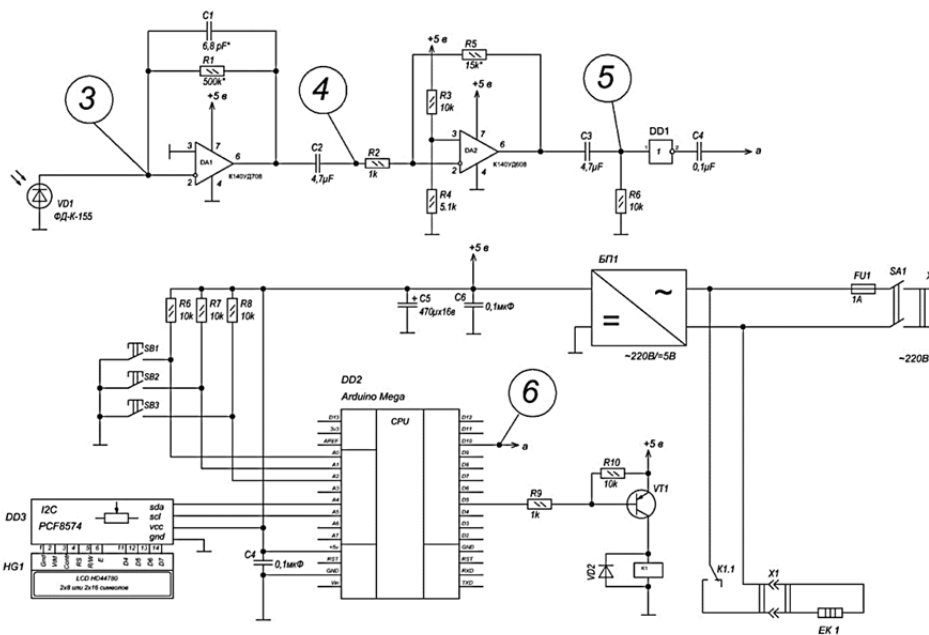


Рис. 4. Принципиальная схема приемника

Fig. 4. Receiver schematic diagram

В качестве фотодиода VD1 выбран фотодиод ФД-К-155. Микросхема DA1 выполнена на операционном усилителе КР140УД708, DA2 – на операционном усилителе КР140УД608.

Конденсатор C1, подключенный параллельно резистору R1 отрицательной обратной связи, необходим для уменьшения усиления высокочастотных шумов.

Резисторы R1, R2, R5, влияющие на коэффициент усиления операционных усилителей, и конденсаторы C2 и C3, от которых зависит крутизна фронтов и спадов импульсов, подобраны таким образом, чтобы на скорости передачи данных в 9600 бод форма сигнала в контрольных точках 4, 5 и 6 была максимально приближена к форме ТТЛ импульсов. При наладке приемной части устройства необходимо контролировать наличие и форму сигнала. Маркерами 1–6 на принципиальных схемах обозначены точки для снятия осциллограмм, которые необходимы для исследования и настройки всей системы в режиме передачи данных.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ

Схема экспериментального стенда автоматизированной системы управления нагревателем по технологии VLC, разработанного на основании функциональных и принципиальных схем, представлена на рис. 5.

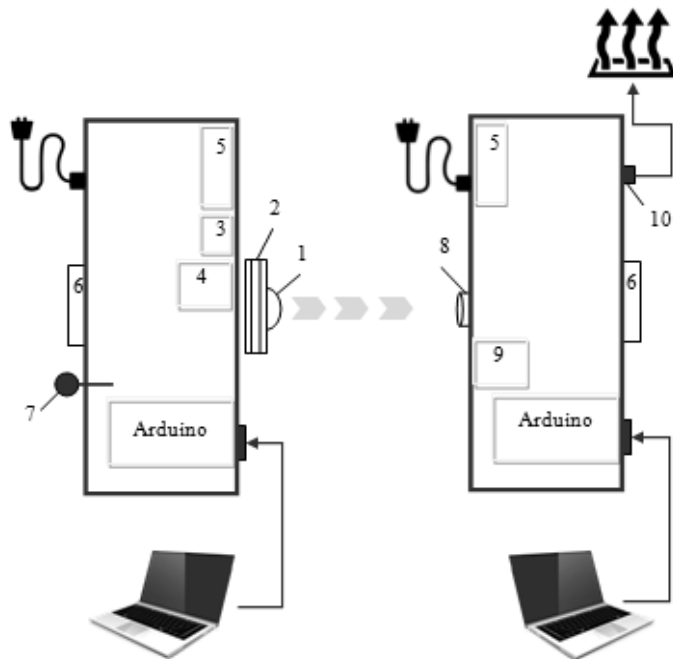


Рис. 5. Схема конструкции экспериментального стенда

Fig. 5. Experimental stand design diagram

Светодиодная матрица 1 мощностью 3 Вт и стабилизированным током 700 мА закреплена на алюминиевом радиаторе 2. Радиатор установлен с зазором на пластине из гетинакса. Радиатор был рассчитан и изготовлен таким образом, чтобы при непрерывной работе светодиода не происходило перегрева кристаллов светоизлучающей матрицы [31]. Зазор необходим для обеспечения отвода тепла от радиатора. С обратной стороны передней панели, на которой закреплён светодиод, расположены стабилизатор тока 3, коммутатор 4 и источник питания 5, плата Arduino Nano. Загрузка скетча предусмотрена через мини-USB-порт микроконтроллера.

На передней стороне задней панели закреплён интегральный цифровой датчик температуры производства фирмы Dallas Semiconductor DS18B20 в корпусе TO-92 7 и индикатор LCD1602 с модулем I2C 6 для контроля параметров системы управления.

Для приема светодиодных импульсов используется фотодиод ФД-К-155 8, который закреплён на внешней панели устройства. С внутренней стороны расположены усилитель, выполненный на микросхеме К561ЛН2 9, источник питания 5 и микроконтроллер Arduino Nano. Для контроля сигнала на внешней

задней панели расположен LCD-монитор, выход для управления нагревательным элементом 10, кнопки для задания требуемых значений температуры.

На рис. 6 показан внешний вид передающего устройства.



*a*

*б*

*Рис. 6.* Внешний вид передающего устройства:

*a* – вид рабочей стороны; *б* – вид задней панели

*Fig. 6.* External view of the transmitting device:

*a* is a view of the working side; *b* is a view of the rear panel

На рис. 7 показан внешний вид приемного устройства.



*a*

*б*

*Рис. 7.* Внешний вид приемного устройства:

*a* – вид рабочей стороны; *б* – вид задней панели

*Fig. 7.* External view of the receiving device:

*a* is a view of the working side; *b* is a view of the rear panel

Для организации системы контроля температуры и управления нагревателем по оптической беспроводной связи с помощью осветительного светодиодного элемента была использована технология UART. В нашем случае в соответствии с данной технологией был запрограммирован микроконтроллер. Во время передачи данных происходит их преобразование в последователь-

ный вид так, чтобы было возможно передать их по цифровой линии другому аналогичному устройству. В UART передача данных происходит по одному биту в одинаковые промежутки времени, который определен скоростью UART. Для нашего конкретного соединения – 9600 бод. Такая скорость была выбрана экспериментально как наиболее оптимальная для используемых электронных элементов в передающем и приемном устройствах системы.

Предлагаемая система управления может быть использована для регулирования других физических процессов, которые в настоящее время опираются на проводные системы связи или беспроводные системы с использованием радиоволн. Особенно важным является переход к беспроводному управлению технологическими процессами.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Нами были проведены исследования по оптимизации параметров системы. При наладке приемной части устройства необходимо контролировать осциллографом наличие и форму сигнала в некоторых точках. Важными являются уровень и форма выходного сигнала с микроконтроллера передатчика и сигнала, поступающего на микроконтроллер приемника. Наиболее важные точки контроля обозначены на принципиальных схемах передатчика и приемника маркерами с 1-го по 6-й. Формы импульсов можно увидеть на рис. 8–12.

Сигнал, поступающий с микроконтроллера передатчика, является эталонной формы и количества импульсов (см. рис. 3, маркер 1). Осциллограмма в этой точке контролируется вторым лучом осциллографа и присутствует на всех осциллограммах контрольных точек для синхронизации. Все остальные осциллограммы контрольных точек сняты первым лучом осциллографа.

Сигнал на светодиод (см. рис. 3, маркер 2) поступает с транзистора, являющегося коммутатором в передающей части. Контроль данной точки дает нам сведения о работоспособности коммутатора. Он в случае выхода из строя может не открываться, не закрываться либо делать это не полностью. Форма сигнала в этой точке представлена на рис. 8.

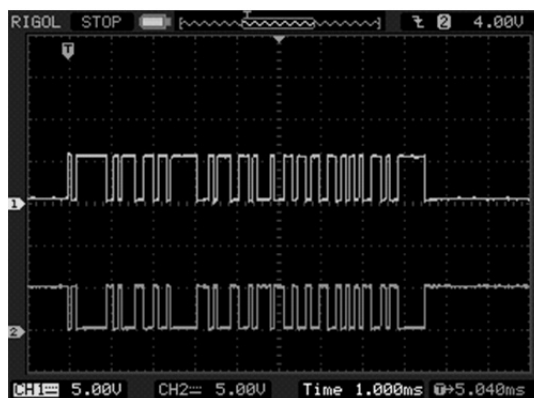


Рис. 8. Осциллограмма сигнала с передатчика

Fig. 8. An oscillogram of the signal from the transmitter



При работе приемного устройства важно контролировать уровень сигнала после всех электронных компонентов до входа на микроконтроллер.

Контроль сигнала после фотодиода (см. рис. 4, маркер 3) показывает работоспособность источника фототока – в нашем случае фотодиода ФД-К-155 приемной части установки. Форма сигнала в этой точке показана на рис. 9. Из осциллограммы видно, что амплитуда сигнала на фотодиоде очень мала (0,8 В), учитывая, что осциллограмма снята, когда светодиод передатчика и фотодиод находились на небольшом расстоянии друг от друга. С увеличением расстояния между светодиодом и фотодиодом амплитуда сигнала еще больше уменьшается. Поэтому для работы с сигналами с такой амплитудой необходим усилитель.

Предусмотрено измерение сигнала для налаживания работы первого каскада усиления фототока (см. рис. 4, маркер 4). Форма сигнала представлена на рис. 10.

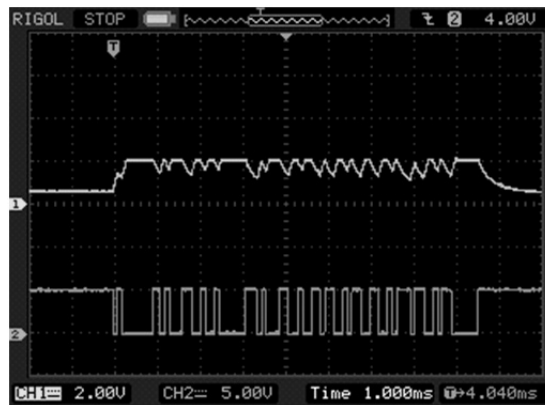


Рис. 9. Осциллограмма сигнала на фотодиоде приемника

Fig. 9. An oscillogram of the signal on the receiver photodiode

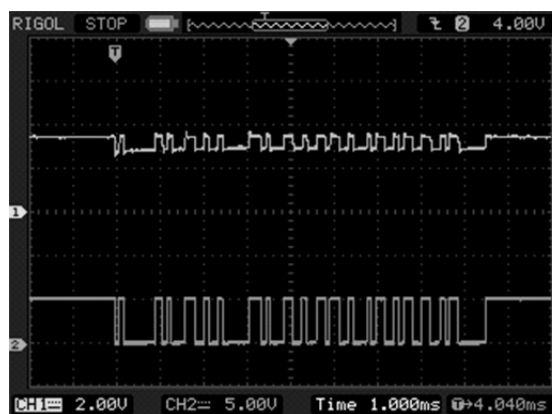


Рис. 10. Осциллограмма сигнала после первого каскада усиления приемника

Fig. 10. An oscillogram of the signal after the first stage of receiver amplification

По осциллограмме сигнала в этой точке можно настроить коэффициент усиления первого каскада на микросхеме К561ЛН2 подбором резистора обратной связи. В схеме имеется конденсатор, шунтирующий на землю и предназначенный для устранения или уменьшения до минимума высокочастотных шумов на выходе первого каскада усиления.

По осциллограмме сигнала после второго каскада усиления (см. рис. 4, маркер 5) настраиваем коэффициент усиления на второй микросхеме К561ЛН2 подбором резисторов. Форма сигнала в этой точке показана на рис. 11.



Рис. 11. Осциллограмма сигнала после второго каскада усиления приемника

Fig. 11. An oscillogram of the signal after the second stage of receiver amplification

После буферного усилителя-инвертора (см. рис. 4, маркер 6) виден сигнал, практически полностью совпадающий с эталонным сигналом (рис. 12).

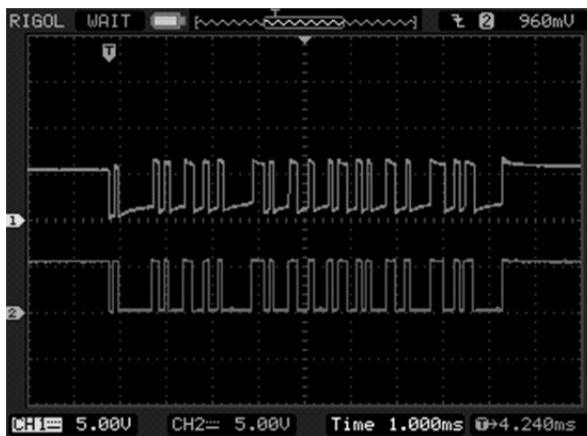


Рис. 12. Осциллограмма сигнала после буферного усилителя-инвертора приемника

Fig. 12. An oscillogram of the signal after the buffer amplifier-inverter of the receiver

Настройка всех частей схемы приемника проводилась с синхронизацией сигнала вторым каналом осциллографа (эталонного) для того, чтобы видеть в посылке каждый импульс в отдельности. Настраивая каскады усилителя в каждой контрольной точке, мы добились похожей формы сигнала и длительности импульсов, что способствует стабильной работе всей системы в целом. Идентичность отправленного и принятого сигнала говорит о надежности и точности функционирования системы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения экспериментов была получена устойчивая передача данных с помощью белого светодиода освещения и кодирования с использованием технологии UART. Полученные результаты позволили обеспечить регулирование температуры в помещении с помощью оптической беспроводной системы связи через светодиодную систему освещения. Основой разработанной системы являются недорогие микроконтроллеры ATmega328P. Такой подход делает перспективными беспроводные системы, основанные на использовании светодиодных осветительных приборов. При этом особенностью предлагаемой системы является простота конструкции, небольшая себестоимость используемых радиоэлектронных элементов. Предложенная система управления обеспечивает быструю передачу значения текущей температуры и регулирование ее значения.

Перспективой создания систем управления с использованием беспроводной технологии связи по видимому свету является организация систем регулирования параметрами, обеспечивающих работу «умных домов» и интеллектуальных энергетических систем. Внедрение таких разработок стимулируется быстрым ростом использования светодиодных приборов освещения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мировой опыт и перспективы развития промышленного интернета вещей в России. – URL: <https://center2m.ru/mirovoy-opyt-i-perspektivy-razvitiya> (дата обращения: 07.10.2020).
2. Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2016–2021. – San Jose, CA, 2017. – URL: <http://www.usuariosdigitales.org/wp-content/uploads/2017/02/mobile-white-paper-c11-520862-1.pdf> (accessed: 07.10.2020).
3. Интернет вещей, IoT, M2M (мировой рынок). – 2020. – 09 июня. – URL: <https://www.tadviser.ru/a/302413> (дата обращения: 07.10.2020).
4. Использование волн видимого света для широкополосной связи. Отчет МСЭ-R SM.2422-0 (06/2018). – Женева, 2019. – URL: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2422-2018-PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2422-2018-PDF-R.pdf) (дата обращения: 07.10.2020).
5. Optical wireless communication systems / Z. Ghassemlooy, S. Zvanovec, A. Khalighi, O. Popoola, J. Perez // *Optik*. – 2017. – Vol. 151. – P. 1–6.
6. *Uysal M., Nouri H.* Optical wireless communication – an emerging technology // 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 2014. – Graz, Austria, 2014. – P. 1–7. – DOI: 10.1109/ICTON.2014.6876267.
7. *Teli1 S.R., Zvanovec S., Ghassemlooy Z.* Optical Internet of Things within 5G: applications and challenges // IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System. – Bali, Indonesia, 2018. – DOI: 10.1109/IOTAIS.2018.8600894.
8. Optical wireless communication systems, a survey / O. Alsulami, A.T. Hussein, M.T. Alreashedi, J. Elmirghani. – URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1812/1812.11544.pdf> (accessed: 07.10.2020). – DOI: 10.13140/RG.2.2.11751.09129.

9. A comparative survey of optical wireless technologies: architectures and applications / M. Chowdhury, M. Hossan, A. Islam, Y. Jang // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 9819–9840. – DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2792419.
10. The role of optical wireless communication technologies in 5G/6G and IoT solutions: prospects, directions, and challenges / M. Chowdhury, Md. Shahjalal, M. Hasan, Y. Jang // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9 (20). – P. 4367. – DOI: 10.3390/app9204367.
11. Analysis energy efficiency of automated control system of LED lighting / S. Grigoryeva, A. Baklanov, D. Titov, V. Sayun, E. Grigoryev // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2017). – Astana, Kazakhstan, 2017. – DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998488.
12. Система обеспечения равномерного освещения с использованием веб-камеры / А.К. Дмитриев, А.Е. Бакланов, В.М. Саюн, О.Е. Бакланова, С.В. Григорьева, А.Ж. Алимханова // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2 (75). – С. 7–20. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-7-20.
13. Haas H., Elmirghani J., White I. Optical wireless communication // Philosophical Transactions A. – 2020. – Vol. 378, iss. 2169. – DOI: 10.1098/RSTA.2020.0051.
14. LED based indoor visible light communication: state of the art / D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, R. Parthiban // IEEE Communication Surveys & Tutorials. – 2015. – Vol. 17, N 3. – P. 1649–1678.
15. Azhar A., Tran T., O'Brien D. A Gigabit/s indoor wireless transmission using MIMO-OFDM visible-light communications // IEEE Photonics Technology Letters. – 2013. – Vol. 25, N 2. – P. 171–174. DOI: 10.1109/LPT.2012.2231857.
16. Dimitrov S., Hass H. Principles of LED light communications: toward s networked Li-Fi. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2015.
17. High bandwidth GaN-based micro-LEDs for multi-Gb/s visible light communications / R. Ferreira, E. Xie, J.D. McKendry, S. Rajbhandari, H. Chun, G. Faulkner, S. Watson, A.E. Kelly, E. Gu, R.V. Penty, I.H. White, D. O'Brien, M. Dawson // IEEE Photonics Technology Letters. – 2016. – Vol. 28 (19). – P. 2023–2026. – DOI: 10.1109/LPT.2016.2581318.
18. O'Brien D., Rajbhandari S., Chun H. Transmitter and receiver technologies for optical wireless // Royal Society. – 2020. – Vol. 378, iss. 2169. DOI.org/10.1098/rsta.2019.0182.
19. Njiongue A.R., Ferreira H.C., Ngatched T.M.N. Visible light communication (VLC) technology // Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. – New York: John Wiley, 2015. – P. 1–15. – DOI: 10.1002/047134608x.w8267.
20. Khan L.U. Visible light communication: applications, architecture, standardization and research challenges // Digital Communications and Networks. – 2017. – Vol. 3 (2). – P. 78–88. – DOI: 10.1016/j.dcan.2016.07.004.
21. Leba M., Riurean S., Lonica A. LiFi – The path to a new way of communication // 12th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI). – Lisbon, Portugal, 2017. – P. 1–6. – DOI: 10.23919/CISTI.2017.7975997.
22. Visible light communication: a system perspective-overview and challenges / S.U. Rehman, S. Ullah, P. Chong, S. Yongchareon, D. Komosny // Sensors. – 2019. – Vol. 19 (5). – P 1153. – DOI: 10.3390/S19051153.
23. Visible light communication: concepts, applications and challenges / L. Matheus, A. Vieira, F.M. Luiz, M. Vieira, O. Gnawali // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21, iss. 4. – P. 3204–3237. – DOI: 10.1109/COMST.2019.2913348.
24. Kumar S.A., Akash L., Deenadyalan J. Visible light communication // International Journal of Science and Research. – 2018. – Vol. 7, iss. 5. – P. 715–720. – DOI: 10.21275/ART2018867.
25. Real-time audio transmission using visible light communication / M.Y. Soh, Ng.W. Xian, Q. Zou, D. Lee, T.H. Teo, K. Seng Yeo // TENCON 2018 – 2018 IEEE Region 10 Conference. – Jeju, Korea, 2018. – P. 2223–2226. – DOI: 10.1109/TENCON.2018.8650145.
26. Real-time audio & video transmission system based on visible light communication / Y. He, L. Ding, Y. Gong, Y. Wang // Optics and Photonics Journal. – 2013. – Vol. 3. – P. 153–157. – DOI: 10.4236/OPJ.2013.32B037.
27. High-speed visible light communication systems / L. Grobe, A. Paraskevopoulos, J. Hilt, D. Schulz, F. Lassak, F. Hartlieb // IEEE Communications Magazine. – 2013. – Vol. 51, iss. 12. – P. 60–66. – DOI: 10.1109/MCOM.2013.6685758.
28. Audio transmission system using white LEDs / A. Baklanov, S. Grigoryeva, A. Alimkhanova, E. Grigoryev, V. Sayun // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Tomsk, Russia, 2019. – DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729564.

29. A new approach to physical encoding in VLC data transmission technology / E.A. Grigoryev, A.E. Baklanov, S.V. Grigoryeva, A.Zh. Alimkhanova, V.M. Sayun // 21th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Erlagol, Russia, 2020. – P. 221–225. – DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153488.

30. Study of illumination properties of high-power LEDs in various temperature conditions / Ye. Grigoryev, S. Grigoryeva, V. Sayun, D. Titov // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Erlagol, Russia, 2017. – P. 309–313. – DOI: 10.1109/EDM.2017.7981762.

31. *Бакланов А.Е., Григорьева С.В., Яковлев А.Н.* Математическое моделирование тепло-массопереноса в системе тепловода для светодиода высокой мощности // Вестник Карагандинского университета. Серия Физика. – 2015. – № 4 (80). – С. 31–38.

*Бакланов Александр Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук по специальности «Радиофизика», профессор Восточно-Казахстанского технического университета, Казахстан. Основное направление научных исследований – изучение оптико-электронных приборов.

*Григорьева Светлана Владимировна*, доктор философии (PhD) по специальности «Автоматизация и управление», доцент Восточно-Казахстанского технического университета, Казахстан. Область научных исследований связана с изучением параметров и режимов работы мощных светодиодов, разработкой программного обеспечения для систем автоматизации.

*Алимханова Аслима Женисовна*, докторант по специальности «Автоматизация и управление» Восточно-Казахстанского государственного технического университета, Казахстан. Основное направление научных исследований – разработка автоматизированных систем.

*Дмитриев Александр Капитонович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерных систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – оптические и лазерные технологии.

*Baklanov Alexander E.* PhD (Phys. & Math.), majoring in radiophysics, professor at the East Kazakhstan Technical University, Kazakhstan. The main field of his research is the study of optoelectronic devices.

*Grigorieva Svetlana V.*, PhD in automation and control, associate professor at the East Kazakhstan Technical University, Kazakhstan. The area of her research is related to the study of parameters and operating modes of high-power LEDs and the development of software for automation systems.

*Alimkhanova Aslim Zh.*, doctoral student specializing in Automation and Control at the East Kazakhstan State Technical University, Kazakhstan. The main field of her research is the development of automated systems.

*Dmitriev Alexander K.*, D.Sc. (Phys. & Math.), professor at the department of laser systems, Novosibirsk State Technical University. The main field of his research is optical and laser technologies.

### ***An indoor temperature control system based on visible light communications technology\****

A.E. BAKLANOV<sup>1,a</sup>, S.V. GRIGORIEVA<sup>1,b</sup>, A.Zh. ALIMKHANOVA<sup>1,c</sup>,  
A.K. DMITRIEV<sup>2,d</sup>

<sup>1</sup> East Kazakhstan Technical University, 69, Protozanova Street, Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>a</sup> ABaklanov\_62@mail.ru    <sup>b</sup> SGrigorieva@ektu.kz    <sup>c</sup> aslima\_alimhanova@mail.ru

<sup>d</sup> alexander\_dmitriev@ngs.ru

#### **Abstract**

The article proposes a new approach to temperature control in a building based on the Visible Light Communications technology. This approach is based on using LED lamps as temperature data transmitters as well as for lighting. Light modulation based on the UART standard was used for data transfer. A photodiode with the capability to distinguish relatively weak signals was used for receiving data. All data processing was performed by microcontrollers. UART-based modulation was also performed on a microcontroller.

The article describes in detail schematic circuits of transmitting and receiving devices. Based on developed schematic circuits, a new experimental setup consisting of two units was created. The transmission unit includes a temperature sensor, a microcontroller, a driver and an LED. The receiving unit includes a photodiode, an amplifier and a microcontroller. An ATmega328P chip was used for both microcontrollers. Experimental setup consists of experimental models of both units.

For signal transmission control, measurements of the pulse level and shape were conducted in the receiving device with an oscilloscope. The signal level was analysed after all electronic components but before entering the microcontroller. Experimental results have shown that data transmission with the use of white LEDs was relatively stable. This allows the possibility of organising wireless control of temperature conditions on premises without Wi-Fi. Perspective uses of temperature control with white LEDs approach include the creation of "Smart house" control system without using wires and with cheap microcontrollers, which significantly decreases costs of the system.

**Keywords:** light-emitting diode, control system, data transfer, temperature, microcontroller, visible light communication, optical wireless communication

#### **REFERENCES**

1. *Mirovoi opyt i perspektivy razvitiya promyshlennogo interneta veshchei v Rossii* [World experience and development prospects of the industrial Internet of things in Russia]. Available at: <https://center2m.ru/mirovoy-opyt-i-perspektivy-razvitiya> (accessed 07.10.2020).
2. *Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2016–2021*. San Jose, CA, 2017. Available at: <http://www.usuariosdigitales.org/wp-content/uploads/2017/02/mobile-white-paper-c11-520862-1.pdf> (accessed 07.10.2020).
3. *Internet veshchei, IoT, M2M (mirovoi rynek)* [Internet of Things, IoT, M2M world market]. Available at: <https://www.tadviser.ru/a/302413> (accessed 07.10.2020).

---

\* Received 06 February 2020.

4. *Visible light for broadband communications*. Report ITU-R SM.2422-0 (06/2018). Geneva, 2019. (In Russian). Available at: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2422-2018-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2422-2018-PDF-E.pdf) (accessed 07.10.2020).
5. Ghassemlooy Z., Zvanovec S., Khalighi A., Popoola O., Perez J. Optical wireless communication systems. *Optik*, 2017, vol. 151, pp. 1–6.
6. Uysal M., Nouri H. Optical wireless communication – an emerging technology. *16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July 2014, Graz, Austria, pp. 1–7. DOI: 10.1109/ICTON.2014.6876267.
7. Teli S.R., Zvanovec S., Ghassemlooy Z. Optical Internet of Things within 5G: applications and challenges. *IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System*, Bali, Indonesia, 2018. DOI: 10.1109/IOTAIS.2018.8600894.
8. Alsulami O., Hussein A.T., Alresheedi M.T., Elmirghani J. Optical wireless communication systems, a survey. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1812/1812.11544.pdf> (accessed 07.10.2020). DOI: 10.13140/RG.2.2.11751.09129.
9. Chowdhury M., Hossain M., Islam A., Jang Y. A comparative survey of optical wireless technologies: architectures and applications. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 9819–9840. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2792419.
10. Chowdhury M., Shahjalal Md., Hasan M., Jang Y. The role of optical wireless communication technologies in 5G/6G and IoT solutions: prospects, directions, and challenges. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9 (20), p. 4367. DOI: 10.3390/app9204367.
11. Grigoryeva S., Baklanov A., Titov D., Sayun V., Grigoryev E. Analysis energy efficiency of automated control system of LED lighting. *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2017)*. Astana, Kazakhstan, 2017. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998488.
12. Dmitriev A.K., Baklanov A.E., Sayun V.M., Baklanova O.E., Grigoryeva S.V., Alimkhanova A.Zh. Sistema obespecheniya ravnomernogo osveshcheniya s ispol'zovaniem veb-kamery [A uniform lighting system using a webcam]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (75), pp. 7–20. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-7-20.
13. Haas H., Elmirghani J., White I. Optical wireless communication. *Philosophical Transactions A*, 2020, vol. 378, iss. 2169. DOI: 10.1098/RSTA.2020.0051.
14. Karunatilaka D., Zafar F., Kalavally V., Parthiban R. LED based indoor visible light communication: state of the art. *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, 2015, vol. 17, no. 3, pp. 1649–1678.
15. Azhar A., Tran T., O'Brien D. A Gigabit/s indoor wireless transmission using MIMO-OFDM visible-light communications. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, vol. 25, N 2, pp. 171–174. DOI: 10.1109/LPT.2012.2231857.
16. Dimitrov S., Hass H. *Principles of LED light communications: toward s networked Li-Fi*. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2015.
17. Ferreira R., Xie E., McKendry J.D., Rajbhandari S., Chun H., Faulkner G., Watson S., Kelly A.E., Gu E., Penty R.V., White I.H., O'Brien D., Dawson M. High bandwidth GaN-based micro-LEDs for multi-Gb/s visible light communications. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, vol. 28 (19), pp. 2023–2026. DOI: 10.1109/LPT.2016.2581318.
18. O'Brien D., Rajbhandari S., Chun H. Transmitter and receiver technologies for optical wireless. *Royal Society*, 2020, vol. 378, iss. 2169. DOI.org/10.1098/rsta.2019.0182.
19. Ndjiongue A.R., Ferreira H.C., Ngatched T.M.N. Visible light communication (VLC) technology *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. New York, John Wiley, 2015, pp. 1–15. DOI: 10.1002/047134608x.w8267.
20. Khan L.U. Visible light communication: applications, architecture, standardization and research challenges. *Digital Communications and Networks*, 2017, vol. 3 (2), pp. 78–88. DOI: 10.1016/j.dcan.2016.07.004.
21. Leba M., Riurean S., Lonica A. LiFi – The path to a new way of communication. *12th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, Lisbon, Portugal, 2017, pp. 1–6. DOI: 10.23919/CISTI.2017.7975997.
22. Rehman S.U., Ullah S., Chong P., Yongchareon S., Komosny D. Visible light communication: a system perspective-overview and challenges. *Sensors*, 2019, vol. 19 (5), p. 1153. DOI: 10.3390/S19051153.
23. Matheus L., Vieira A., Luiz F.M., Vieira M., Gnawali O. Visible light communication: concepts, applications and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, vol. 24, iss. 4, pp. 3204–3237. DOI: 10.1109/COMST.2019.2913348.

24. Kumar S.A., Akash L., Deenadyalan J. Visible light communication. *International Journal of Science and Research*, 2018, vol. 7, iss. 5, pp. 715–720. DOI: 10.21275/ART2018867.
25. Soh M.Y., Xian Ng.W., Zou Q., Lee D., Teo T.H., Seng Yeo K. Real-time audio transmission using visible light communication. *TENCON 2018 – 2018 IEEE Region 10 Conference*, Jeju, Korea, 2018, pp. 2223–2226. DOI: 10.1109/TENCON.2018.8650145.
26. He Y., Ding L., Gong Y., Wang Y. Real-time audio & video transmission system based on visible light communication. *Optics and Photonics Journal*, 2013, vol. 3, pp. 153–157. DOI: 10.4236/OPJ.2013.32B037.
27. Grobe L., Paraskevopoulos A., Hilt J., Schulz D., Lassak F., Hartlieb F. High-speed visible light communication systems. *IEEE Communications Magazine*, 2013, vol. 51, iss. 12, pp. 60–66. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6685758.
28. Baklanov A., Grigoryeva S., Alimkhanova A., Grigoryev E., Sayun V. Audio transmission system using white LEDs. *2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Tomsk, Russia, 2019. DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729564.
29. Grigoryev E.A., Baklanov A.E., Grigoryeva S.V., Alimkhanova A.Zh., Sayun V.M. A new approach to physical encoding in VLC data transmission technology. *21th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Erlagol, Russia, 2020, pp. 221–225. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153488.
30. Grigoryev Ye., Grigoryeva S., Sayun V., Titov D. Study of illumination properties of high-power leds in various temperature conditions. *18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Erlagol, Russia, 2017, pp. 309–313. DOI: 10.1109/EDM.2017.7981762.
31. Baklanov A.E., Grigoryeva S.V., Yakovlev A.N. Matematicheskoe modelirovanie teplo-massopere-nosa v sisteme teplootvoda dlya svetodi-oda vysokoi moshchnosti [Mathematical modeling of heat-and-mass transfer in the heat sink system for the high power LED]. *Vestnik Karagandinskogo universiteta. Seriya Fizika = Bulletin of the Karaganda University. PHYSICS Series*, 2015, no. 4 (80), pp. 31–38.

Для цитирования:

Система управления температурой внутри помещения, основанная на технологии связи по видимому свету / А.Е. Бакланов, С.В. Григорьева, А.Ж. Алимханова, А.К. Дмитриев // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 2–3 (79). – С. 7–24. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-7-24.

For citation:

Baklanov A.E., Grigorieva S.V., Alimkhanova A.Zh., Dmitriev A.K. Sistema upravleniya temperaturoi vnutri pomeshcheniya, osnovannaya na tekhnologii svyazi po vidimomu svetu [An indoor temperature control system based on visible light communications technology]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 2–3 (79), pp. 7–24. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-7-24.



ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,  
COMPPUTER ENGINEERING  
AND CONTROL

УДК 681.513

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-25-36

## **Синтез нейросетевого регулятора управления нелинейной моделью перевернутого маятника на тележке<sup>\*</sup>**

**А.А. ВОЕВОДА<sup>а</sup>, В.И. ШИПАГИН<sup>б</sup>**

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

<sup>а</sup> [ucit@ucit.ru](mailto:ucit@ucit.ru)    <sup>б</sup> [shipagin@mail.ru](mailto:shipagin@mail.ru)

В рамках настоящей статьи рассматривается алгоритм выбора структуры нейронной сети, используемой для регулирования объекта «перевернутый маятник на тележке» с учетом его дополнительных особенностей математического описания, а именно нелинейных параметров.

Работа алгоритма иллюстрируется на примере синтеза системы автоматического управления, включающей два нейрорегулятора. Один из них отвечает за вывод тележки в заданное положение, а второй – за удержание перевернутого маятника в вертикальном положении. Преобразования структуры будем осуществлять для регулятора, отвечающего за вывод тележки в заданное положение.

За основу берется архитектура нейросетевого регулятора, полученного из дискретного регулятора, синтезированного с использованием полиномиального матричного разложения. Для исходного регулятора определим границы его возможного управления нелинейной системой. С целью увеличения диапазона управления нелинейным объектом выполним преобразования структуры нейросети исходного регулятора. Проведем некоторые усложнения структуры нейронной сети регулятора, а именно: увеличим количество нейронов и заменим некоторые функции активации на нелинейные (гиперболический тангенс). Далее предлагается один из способов выбора начальных значений весовых коэффициентов. Затем обучаем нейросеть и проверяем работоспособность полученного регулятора на нелинейном объекте. На следующем этапе сравниваются показатели качества регулирования (быстродействие, астатизм, перерегулирование) полученного регулятора с усложненной структурой нейросети и исходного регулятора.

Таким образом, целью настоящего исследования является формализация процедуры синтеза нейросетевого регулятора для управления нелинейным объектом по рассчитанному с использованием полиномиального матричного разложения регулятору для линеаризованной модели объекта.

Представляемый способ генерации архитектуры нейронной сети управляющих регуляторов дает возможность увеличить диапазон регулирования нелинейным объектом по сравнению с регулятором, полученным методом полиномиального матричного разложения для линейного объекта. Предлагаемая структура нейронной сети не избыточна и поэтому не требует дополнительных вычислительных ресурсов для ее настройки.

---

<sup>\*</sup> Статья получена 16 января 2020 г.

**Ключевые слова:** нейросетевой регулятор, управление нелинейным объектом, система управления, многоканальная система, архитектура нейронной сети, перевернутый маятник, выбор начальных весовых коэффициентов, выбор структуры нейронной сети

## ВВЕДЕНИЕ

Многослойные нейронные сети широко используются для решения задач обработки сигналов в режиме реального времени, управления динамическими и статическими системами и прогнозирования временных рядов [1–3].

Особую ценность нейросетевые регуляторы представляют для регулирования нелинейными объектами. Применение классических регуляторов в этом случае затруднительно в связи со сложностью расчета их параметров [4–6]. А линеаризация объекта, упрощающая вычисление параметров для классических регуляторов, может не всегда отражать существенные для исследования свойства объекта.

Однако при синтезе регуляторов с использованием нейросетевого подхода возникает вопрос выбора структуры нейронной сети. Обычно он решается подбором из стандартного набора архитектур. В связи с этим одним из вопросов, связанных с применением этого подхода, является определение достаточной сложности структуры используемой нейронной сети [7–10]. Избыточные нейронные связи неоптимальной структуры приводят к увеличению количества настраиваемых коэффициентов, а значит, к увеличению времени настройки и требований к вычислительным мощностям аппаратной части, а в некоторых случаях и к невозможности нахождения оптимального решения [11, 12], и напротив: недостаточная сложность не позволяет обеспечить требуемые показатели качества регулирования системы.

Таким образом, актуальность исследования продиктована отсутствием формализованного подхода к выбору структуры при проектировании нейросетевых регуляторов.

В рамках настоящей работы исследуются возможности регулирования с помощью нейросетевого подхода для нелинейной модели «перевернутый маятник на тележке». Целью является формализация процедуры синтеза нейросетевого регулятора для нелинейного объекта. Процесс синтеза регулятора состоит из выбора структуры нейросетевого регулятора, предназначенного для регулирования нелинейной модели, на основе архитектуры нейросетевого регулятора, предназначенного для регулирования линейного объекта; выбора начальных значений весовых коэффициентов полученной нейросети на основе коэффициентов усиления дискретного регулятора.

В первом разделе излагается постановка решаемой задачи и описывается система управления линеаризованной моделью объекта. Определяются проблемные вопросы, связанные с регулированием нелинейного объекта. Во втором разделе исследования рассматривается способ увеличения диапазона регулирования нелинейного объекта, а именно: производится небольшое усложнение структуры нейросетевого регулятора, описывается процесс задания и настройки весовых коэффициентов.

## 1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Из статьи [13] возьмем нелинейную модель перевернутого маятника, которая описывается уравнениями:

$$\left(1 - \frac{ml}{M_t L} \cos^2 \theta\right) \ddot{s} + \frac{ml}{M_t L} g \sin \theta \cos \theta - \frac{ml}{M_t} \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2 = \frac{1}{M_t} u; \quad (1)$$

$$\left(1 - \frac{ml}{M_t L} \cos^2 \theta\right) \ddot{\theta} - \frac{g}{L} \sin \theta + \frac{ml}{M_t L} \sin \theta \cos \theta \cdot \dot{\theta}^2 = -\frac{1}{M_t L} \cos \theta \cdot u, \quad (2)$$

где  $M_t = M + m$ ,  $M$  – масса тележки,  $m$  – масса маятника;  $L = (I + ml^2) / ml$ ,  $I$  – момент инерции маятника относительно центра тяжести,  $l$  – длина стержня маятника;  $s$  – координата центра тяжести тележки (по горизонтальной оси);  $\theta$  – угол отклонения перевернутого маятника от вертикали;  $u$  – управляющее воздействие.

Для удобства моделирования уравнения (1) и (2) преобразуем к виду:

$$\ddot{s} = \frac{\alpha}{M_t} u - b \sin \theta \cos \theta + \frac{\alpha ml \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2}{M_t}; \quad (3)$$

$$\ddot{\theta} = c \sin \theta - \frac{b \sin \theta \cos \theta \cdot \dot{\theta}^2}{g} - \frac{\alpha \cos \theta \cdot u}{M_t L}, \quad (4)$$

где  $\alpha^{-1} = 1 - ml \cos^2 \theta / M_t L$ ,  $b = \alpha ml g / M_t L$ ,  $c = \alpha g / L$ . В дальнейшем будем считать параметры объекта для случая, когда  $I = 0$ ,  $m = 70$  кг,  $M = 30$  кг,  $l = 1$  м,  $g = 10$  м/с<sup>2</sup>.

Структурная схема, составленная по формулам (3) и (4), выглядит следующим образом (рис. 1).

Начальные условия для системы «перевернутый маятник на тележке»: положение центра тяжести тележки  $s_0 = 0$ , угол отклонения перевернутого маятника от вертикали  $\theta_0 = 0^\circ$ . Потребуем от системы управления данным объектом вывод тележки в положение  $s = s_1$  (задается пользователем), при этом обеспечивая  $\theta$  – угол отклонения перевернутого маятника в заданных пределах. Управление осуществляется по одному каналу. В рамках данной задачи считаем, что если угол отклонения от вертикали  $\theta \notin [-60^\circ; 60^\circ]$ , то задача считается «нерешенной».

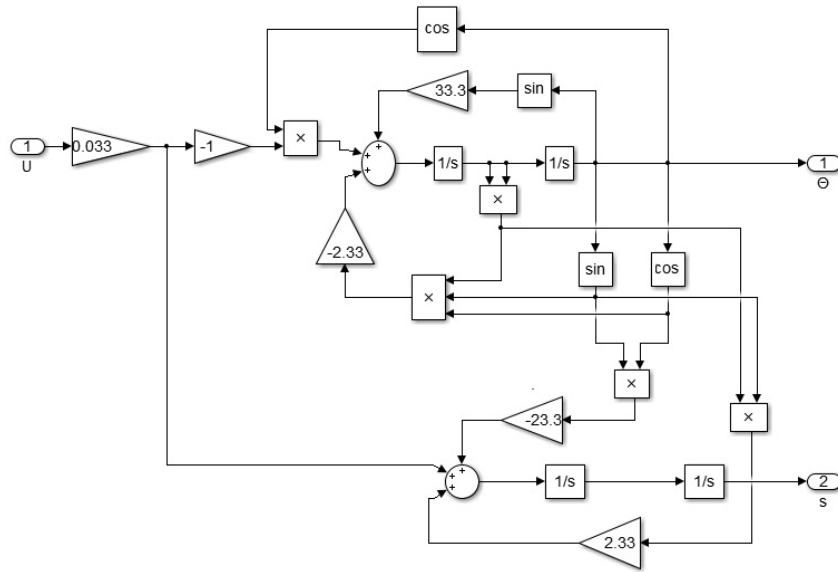


Рис. 1. Нелинейная модель перевернутого маятника

Fig. 1. A nonlinear inverted pendulum model

В следующем разделе сравниваются показатели качества регулирования линейризованной модели объекта [14] и нелинейной модели объекта (3,4) с помощью двух нейросетевых регуляторов, отвечающих за регулирование системы по углу перевернутого маятника и вывод тележки в заданное положение.

## 1.2. ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Для регулирования системы используются два нейросетевых регулятора (рис. 2). Регулятор *Neuroreg1* используется для вывода тележки в заданное положение  $s = s_1$ . Регулятор *Neuroreg2* необходим для стабилизации угла перевернутого маятника в вертикальном положении  $\theta = 0^\circ$ .

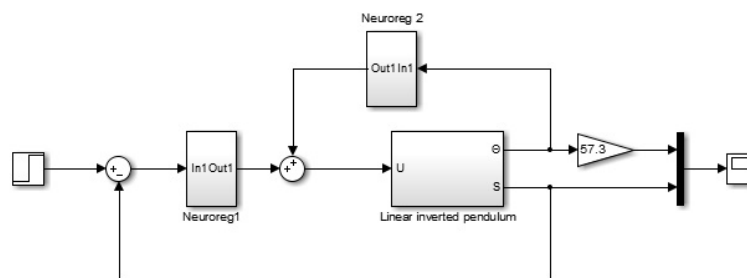


Рис. 2. Система «регулятор–модель»

Fig. 2. The regulator–model system

Нейрорегуляторы были рассчитаны по ПИД-регуляторам, используемым для работы с линейризованной системой «перевернутый маятник на тележке», представленной в статье [14]. Показатели качества регулирования нейрорегуляторами идентичны ПИД-регуляторам. Метод синтеза нейрорегулято-

ра представлен в статье [15]. Архитектура нейронных сетей *Neuroreg1* и *Neuroreg2* одинаковая и представлена на рис. 3.

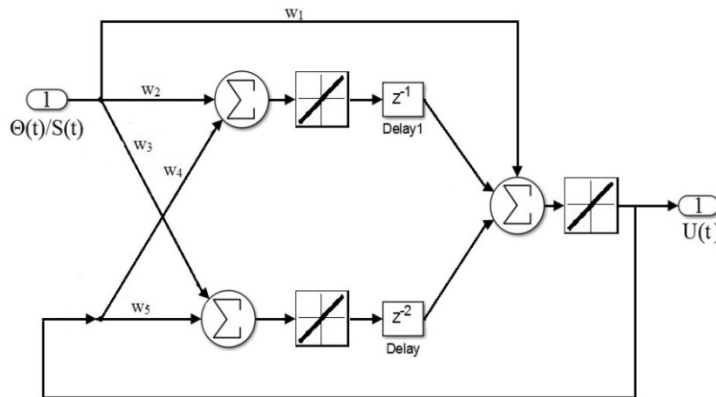


Рис. 3. Архитектура нейросетевых регуляторов

Fig. 3. Architecture of neural network regulators

Структура нейросети для регуляторов представлена двумя слоями. В первом слое два нейрона и один – во втором. В качестве функций активации используются линейные ( $y = x$ ). На рис. 3 обозначение  $\theta(t)/s(t)$  значит, что по первому каналу регулятор *Neuroreg1* будет использовать данные о положении тележки  $s(t)$ , а регулятор *Neuroreg2* будет использовать информацию об угле отклонения перевернутого маятника от вертикали  $\theta(t)$ . Кроме этого, для обоих регуляторов по второму каналу присутствует обратная связь (т. е. данные о выходе регулятора также подаются на его вход). Во втором слое сети используется задержка на один временной интервал  $z^{-1}$ , равный 1 мс, и  $z^{-2}$  – задержка на два временных интервала.

При запуске работы системы было выяснено, что нейросетевые регуляторы *Neuroreg1*, *Neuroreg2*, которые показывают хорошее управление на линейной модели, работают на ограниченном диапазоне в нелинейной модели перевернутого маятника (рис. 4). Граница возможного регулирования лежит в диапазоне задания положения тележки маятника  $s(t) \in [-3 : 3]$  метров (при этом колебания угла маятника лежат в диапазоне  $\theta(t) \in [-50^\circ : 45^\circ]$ ).

Из рис. 4 видно, что при движении тележки (изменение центра тяжести  $s(t)$ ) происходит также изменение угла отклонения перевернутого маятника  $\theta(t)$ . Этим и объясняется колебательный процесс при нулевых начальных условиях для центра тяжести тележки и угла отклонения перевернутого маятника.

Однако для случая управления нелинейным объектом характерно большее число колебаний за время переходного процесса, чем при управлении линейным объектом (рис. 4, а, б). Это связано с нелинейными параметрами модели объекта, которые не учитывались при синтезе регуляторов. В случае управления нелинейным объектом за пределами границы (рис. 4, в, г) воз-

возможного регулирования  $s(t) \in [-3 : 3]$  происходит постоянное удаление центра тяжести тележки  $s$  от требуемого значения  $s_1$  и увеличение угла отклонения от вертикали перевернутого маятника  $\theta$  на величину больше допустимой  $\theta \geq 60^\circ$  (согласно постановке задача является «нерешенной»).

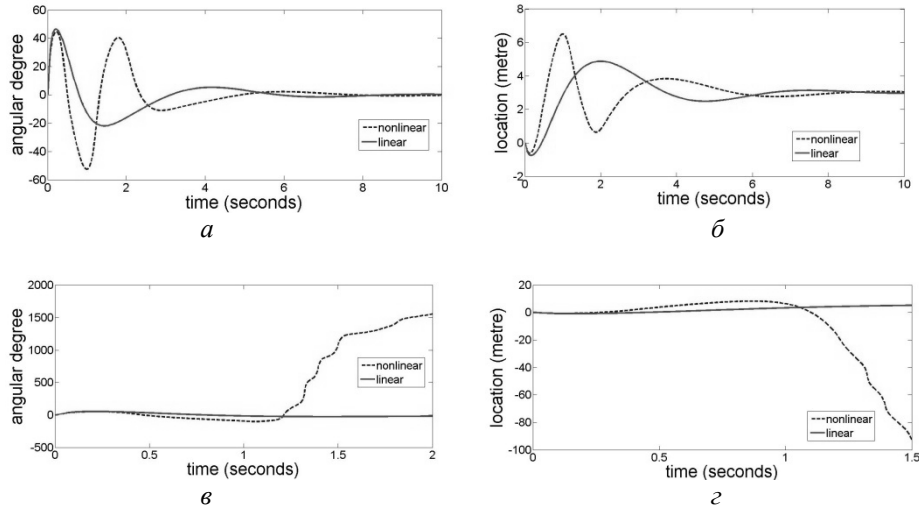


Рис. 4. Сравнение переходных процессов для линейного и нелинейного объекта:  
 а – по углу на границе устойчивости; б – по положению тележки на границе устойчивости;  
 в – по углу за пределами устойчивости; г – по положению тележки за пределами устойчивости

Fig. 4. Comparison of transient processes for a linear and nonlinear object:

*a* is by the angle at the stability boundary; *б* is by the position of the cart at the stability boundary;  
*в* is by the angle outside the stability limits; *г* is by the position of the cart beyond stability

Необходимы некоторые усложнения архитектуры нейросетевых регуляторов для улучшения возможностей регулирования нелинейного объекта. В дальнейшем будем преобразовывать архитектуру регулятора, отвечающего за вывод положения тележки в заданное положение *Neuroreg1*.

## 2. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА

В разделе 1 было показано, что нейросетевые регуляторы, полученные из ПИД-регуляторов для линейного объекта, обладают существенными ограничениями по регулированию нелинейного объекта. Это связано с тем, что при построении таких регуляторов они рассчитывались для линеаризованной модели, а значит, не учитывались нелинейные составляющие модели объекта. Кроме того, видно, что структура нейросетевых регуляторов (см. рис. 3) содержит только линейные функции активации, а значит, учитывая нелинейный характер выбранной модели объекта, необходимо усложнить выбранную структуру нейрорегулятора (в том числе добавлением нелинейных функций активации).

Модификация архитектуры нейрорегулятора проводилась только в отношении регулятора *Neuroreg1* (см. рис. 2). Этого оказалось достаточно для расширения возможностей по регулированию нелинейной моделью объекта.

## 2.1. УСЛОЖНЕНИЕ СТРУКТУРЫ НЕЙРОСЕТЕВОГО РЕГУЛЯТОРА И ВЫБОР НАЧАЛЬНЫХ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Для управления нелинейным объектом «перевернутый маятник на тележке» проведем некоторые преобразования структуры нейросетевого регулятора *Neuroreg1*. В качестве усложнений применялось следующее: использование в качестве функции активации функции «гиперболический тангенс», увеличение количества нейронов в слое и увеличение количества слоев.

При постепенном небольшом увеличении сложности структуры нейросетевого регулятора удалось эмпирическим путем получить архитектуру, способную справиться с задачей регулирования нелинейным объектом. Полученный нейросетевой регулятор *Neuroreg3* представлен на рис. 5.

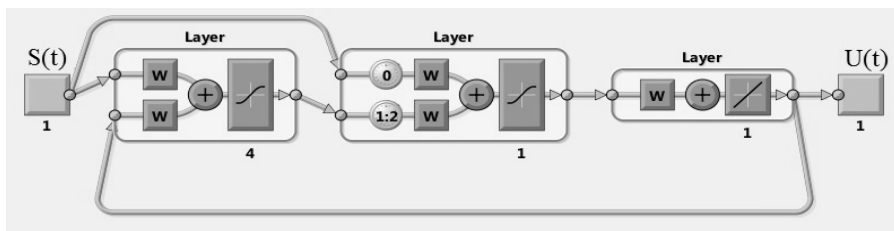


Рис. 5. Усложненная структура нейронной сети регулятора *Neuroreg3*

Fig. 5. A complicated structure of the neural network of the *Neuroreg3* regulator

По сравнению со структурой, представленной на рис. 3, приняты некоторые изменения. Усложненная структура представлена уже тремя слоями. При этом в первом и втором слое используются нелинейные функции активации – «гиперболический тангенс». В первом слое количество нейронов увеличилось до четырех. Дополнительный третий слой представлен одним нейроном с линейной функцией активации.

В качестве начальных весовых коэффициентов будем использовать данные из регулятора *Neuroreg1*, которые были взяты из коэффициентов усиления дискретного регулятора. А для вновь введенных нейронных связей, не присутствовавших в регуляторе *Neuroreg1*, выберем случайные значения в диапазоне от  $[-1;1]$ , взятые по равномерному закону распределения.

Далее будем формировать обучающую выборку и настраивать весовые коэффициенты регулятора.

## 2.2. ОБУЧЕНИЕ УСЛОЖНЕННОГО НЕЙРОСЕТЕВОГО РЕГУЛЯТОРА И РЕЗУЛЬТАТЫ УПРАВЛЕНИЯ

В качестве обучающей выборки для настройки регулятора *Neuroreg3* используем данные переходного процесса линейного регулятора *Neuroreg1*. Обучающая выборка формировалась из входных и выходных данных с шагом дискретизации 0,01 с.

Для того чтобы расширить диапазон регулирования при разных задающих сигналах, обучение будем проводить на 40 случайных сигналах. Значения сигнала берем в пределах от  $-10$  до  $+10$ .

В статье [15] показано, что при определенных условиях возможно повышение показателей регулирования по сравнению с эталонным. Для этого необходимо, чтобы обучающая выборка была снабжена информацией преимущественно о статическом режиме работы. Увеличим длительность сбора информации о положении тележки  $s(t)$  и угле перевернутого маятника  $\theta(t)$  с 10 (рис. 4,  $a$  и  $b$ ) до 20 секунд.

В качестве метода обучения использовался алгоритм Левенберга – Марквардта. В качестве оптимизируемой функции выступает среднеквадратичная ошибка между переходными процессами эталонного регулятора *Neuroreg1* и оптимизируемого регулятора *Neuroreg3*. Для обучения нейросетевого регулятора понадобилось 57 865 итераций. Процесс обучения завершился по достижении минимального градиента функции потерь и занял около 60 минут.

Сравним показатели линейной модели, управляемой регуляторами *Neuroreg1* и *Neuroreg2*, и нелинейной модели, управляемой модифицированным регулятором *Neuroreg3* и регулятором *Neuroreg2* (рис. 6). Начальные условия были взяты из постановки задачи.

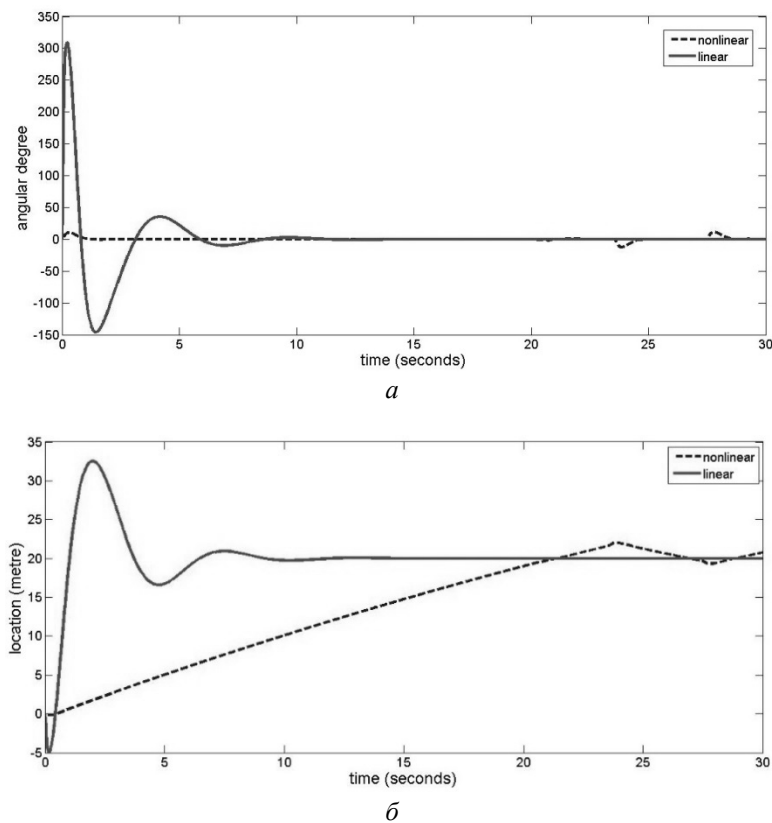


Рис. 6. Переходные процессы нелинейного и линейного регуляторов:

$a$  – по углу перевернутого маятника,  $b$  – по положению тележки

Fig. 6. Transient processes of nonlinear and linear regulators:

$a$  is by the angle of the inverted pendulum and  $b$  is by the position of the trolley



Как видно из рис. 6, б, регулятор выводит тележку с перевернутым маятником в положение +20 метров как в случае управления линейным объектом (переходный процесс – сплошная линия), так и в случае управления нелинейным объектом (переходный процесс – пунктирная линия). Вывод тележки в заданное положение регуляторами *Neuroreg1* и *Neuroreg2* для линейной модели происходит примерно за 8 секунд, а регуляторами *Neuroreg3* и *Neuroreg2* для нелинейной модели примерно за 22 секунды. Также для нелинейной модели системе автоматического управления приходится постоянно корректировать местоположение тележки в связи с недостижением устойчивого положения перевернутого маятника (т. е. имеем дело с незатухающим колебательным процессом с постоянной амплитудой). Однако усложнение архитектуры регулятора *Neuroreg1* (получили регулятор *Neuroreg3*) позволило снять ограничения на диапазон регулирования для нелинейного объекта ( $s(t) \in [-3; 3]$  метра). Расширение возможностей регулирования на нелинейной модели достигнуто в том числе благодаря перемещению тележки с постоянной скоростью, без ускорения. При этом угол отклонения перевернутого маятника от вертикали незначителен по сравнению с углом отклонения на линейной модели (рис. 6, а)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей работы были исследованы возможности регулирования с помощью нейросетевого подхода для нелинейной модели «перевернутый маятник на тележке», а именно: вывод тележки в заданное положение при сохранении вертикального положения перевернутого маятника.

Выяснено, что существующий нейросетевой регулятор, полученный из передаточной функции дискретного регулятора для линейного объекта, обладает весьма ограниченными возможностями для регулирования при включении в модель нелинейностей. Для расширения возможности регулирования осуществлены преобразования в архитектуре исходной нейронной сети. В качестве первоначальных значений весовых коэффициентов использованы коэффициенты усиления дискретного регулятора и случайные значения в диапазоне  $[-1; +1]$ . Описан алгоритм и параметры обучения нейросетевой модели.

В результате получен нейросетевой регулятор, позволяющий управлять положением «тележки с перевернутым маятником» для нелинейной модели при сохранении угла перевернутого маятника в допустимых пределах. Таким образом, в рамках работы продемонстрирован метод синтеза нейросетевого регулятора для нелинейной модели объекта на основе знаний о регулировании линеаризованной модели объекта

В дальнейшем планируется преобразовать схему управления нелинейным объектом «перевернутый маятник на тележке» с целью соединения двух регуляторов в один, а также применить вышеописанный подход для синтеза обобщающего нейросетевого регулятора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Artificial neural network classification of motor-related EEG: an increase in classification accuracy by reducing signal complexity / V.A. Maksimenko, S.A. Kurkin, E.N. Pitsik, V.Y. Musatov, A.E. Runnova, T.Y. Efremova, A.E. Hramov, A.N. Pisarchik // *Complexity*. – 2018. – Vol. 2018. – Art. 9385947. – P. 1–10.
2. Yang X.C., Yung M.H., Wang X. Neural-network-designed pulse sequences for robust control of singlet-triplet qubits // *Physical Review A*. – 2018. – Vol. 97. – P. 042324.
3. Eggersperger K., Lindauer M., Hutter F. Neural networks for predicting algorithm runtime distributions // *Proceedings of the Twenty-Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-18)*. – Stockholm, Sweden, 2018. – P. 1442–1448.
4. Golnaraghi F., Kuo B.C. *Automatic control systems*. – 10th ed. – New York: McGraw-Hill, 2017. – 1160 p.
5. Isidori A. *Lectures in feedback design for multivariable systems*. – Switzerland: Springer, 2016. – 414 p. – (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing).
6. Воевода А.А., Бобобоеков К.М., Шипагин В.И. Синтез одноканальных регуляторов с использованием факторизации передаточной функции объекта // *Сборник научных трудов НГТУ*. – 2019. – № 2 (95). – С. 7–17. – DOI: 10.17212/2307-6879-2019-2-7-17.
7. Lopez-Martin M., Carro B., Sanchez-Esguevillas A. Neural network architecture based on gradient boosting for IoT traffic prediction // *Future Generation Computer Systems*. – 2019. – Vol. 100. – P. 656–673.
8. Silva A.J. da, Oliveira W.R. de, Ludermir T.B. Weightless neural network parameters and architecture selection in a quantum computer // *Neurocomputing*. – 2016. – Vol. 183. – P. 13–22.
9. Zoph B., Le Q. Neural architecture search with reinforcement learning // *arXiv preprint*. – arXiv:1611.01578, 2016.
10. Elsken T., Metzen J., Hutter F. Neural architecture search: a survey // *arXiv preprint*. – arXiv:1808.05377, 2018.
11. Pascanu R., Mikolov T., Bengio Y. On the difficulty of training Recurrent Neural Networks // *arXiv preprint*. – arXiv:1211.5063 [cs. LG].
12. Arjovsky M., Shah A., Bengio Y. Unitary evolution Recurrent Neural Networks // *arXiv preprint*. – arXiv:1511.06464.
13. Воевода А.А., Шоба Е.В. О модели перевернутого маятника // *Сборник научных трудов НГТУ*. – 2012. – № 1 (67). – С. 3–14.
14. Воевода А.А., Шоба Е.В. Управление перевернутым маятником // *Сборник научных трудов НГТУ*. – 2012. – № 2 (68). – С. 3–14.
15. Шипагин В.И. Нейросетевая реализация регулятора для устойчивого объекта // *Сборник научных трудов НГТУ*. – 2019. – № 3–4 (96). – С. 53–63. – DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-53-63.

*Воевода Александр Александрович*, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – управление многоканальными объектами. Имеет более 300 публикаций. E-mail: ucit@ucit.ru

*Шипагин Виктор Игоревич*, аспирант кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета. В настоящее время специализируется в области синтеза систем управления техническими системами. E-mail: shipagin@mail.ru

*Voevoda Alexander A.*, D.Sc. (Eng.), professor at the automation department of the Novosibirsk State Technical University. The main field of his research is control of multichannel objects. He is the author of over 300 publications. E-mail: ucit@ucit.ru

*Shipagin Viktor I.*, post-graduate student at the department of automation, Novosibirsk State Technical University. Currently he specializes in the synthesis of control systems for technical systems. E-mail: shipagin@mail.ru

## ***Synthesis of a neural network control regulator of a nonlinear model of an inverted pendulum on a cart***\*

A.A. VOEVODA<sup>a</sup>, V.I. SHIPAGIN<sup>b</sup>

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>a</sup> ucit@ucit.ru    <sup>b</sup> shipagin@mail.ru

### **Abstract**

In this article, we consider a method for selecting a structure of a neural network used to regulate an "inverted pendulum on a cart" object taking into account its additional features of a mathematical description, namely, nonlinear parameters.

The algorithm is illustrated by the example of control synthesis which includes two neuroregulators. One of them is responsible for bringing the cart to the specified position, and the second is responsible for holding the pendulum in a vertical position. The structure transformations will be performed for the controller responsible for bringing the cart to the specified position.

The architecture of a neural network controller is based on a discrete controller synthesized using polynomial matrix decomposition. For the original controller, we define the limits of its possible control of a nonlinear system. To increase the range of control of a nonlinear object, we perform transformations of the neural network structure of the original controller. We will make some complications in the structure of the neural network of the regulator, namely, increase the number of neurons and replace some activation functions with nonlinear ones (hyperbolic tangent). Next, we suggest one of the ways to select initial values of weight coefficients. Then we train the neural network and check the performance of the resulting controller on a nonlinear object. At the next stage, we compare the obtained performance of a controller having a complicated neural network structure with the performance of a classical controller.

Thus, the purpose of this study is to formalize the synthesis procedure for a neural network controller for controlling a nonlinear object using a calculated classical controller for a linearized object model.

The proposed method of generating the architecture of a neural network of controllers makes it possible to increase the range of control by a nonlinear object in comparison with the controller obtained by the method of polynomial matrix decomposition for a linear object. Compared to the typical ones, the proposed neural network structure is not redundant and therefore does not require additional computing resources to configure it.

**Keywords:** neural network controller, nonlinear object control, control system, multi-channel system, neural network architecture, inverted pendulum, choice of initial weight coefficients, choice of neural network structure

### **REFERENCES**

1. Maksimenko V.A., Kurkin S.A., Pitsik E.N., Musatov V.Y., Runnova A.E., Efremova T.Y., Hramov A.E., Pisarchik A.N. Artificial neural network classification of motor-related EEG: an increase in classification accuracy by reducing signal complexity. *Complexity*, 2018, vol. 2018, art. 9385947, pp. 1–10.
2. Yang X.C., Yung M.H., Wang X. Neural-network-designed pulse sequences for robust control of singlet-triplet qubits. *Physical Review A*, 2018, vol. 97, p. 042324.

---

\* Received 16 January 2020.

3. Eggenberger K., Lindauer M., Hutter F. Neural networks for predicting algorithm runtime distributions. *Proceedings of the Twenty-Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-18)*, Stockholm, Sweden, 2018, pp. 1442–1448.
4. Golnaraghi F., Kuo B.C. *Automatic control systems*. 10th ed. New York, McGraw-Hill, 2017. 1160 p.
5. Isidori A. *Lectures in feedback design for multivariable systems*. Switzerland, Springer, 2016. 414 p.
6. Voevoda A.A., Bobobekov K.M., Shipagin V.I. Sintez odnokanal'nykh regulyatorov s ispol'zovaniem faktorizatsii peredatochnoi funktsii ob'ekta [Synthesis of single-channel regulators using factorization of the object transfer function]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (95), pp. 7–17. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-2-7-17.
7. Lopez-Martin M., Carro B., Sanchez-Esguevillas A. Neural network architecture based on gradient boosting for IoT traffic prediction. *Future Generation Computer Systems*, 2019, vol. 100, pp. 656–673.
8. Silva A.J. da, Oliveira W.R. de, Ludermir T.B. Weightless neural network parameters and architecture selection in a quantum computer. *Neurocomputing*, 2016, vol. 183, pp. 13–22.
9. Zoph B., Le Q. Neural architecture search with reinforcement learning. *arXiv preprint*, arXiv:1611.01578, 2016.
10. Elsken T., Metzen J., Hutter F. Neural architecture search: a survey. *arXiv preprint*, arXiv:1808.05377, 2018.
11. Pascanu R., Mikolov T., Bengio Y. On the difficulty of training Recurrent Neural Networks. *arXiv preprint*, arXiv:1211.5063 [cs.LG].
12. Arjovsky M., Shah A., Bengio Y. Unitary evolution Recurrent Neural Networks. *arXiv preprint*, arXiv:1511.06464.
13. Voevoda A.A., Shoba E.V. O modeli perevernutogo mayatnika [About model inverted pendulum]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 1 (67), pp. 3–14.
14. Voevoda A.A., Shoba E.V. Upravlenie perevernutym mayatnikom [About model inverted pendulum] *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 2 (68), pp. 3–14.
15. Shipagin V.I. Neirosetevaya realizatsiya regulyatora dlya ustoychivogo ob'ekta [Neural network implementation of a controller for a stable object]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3–4 (96), pp. 53–63. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-53-63.

Для цитирования:

Воевода А.А., Шипагин В.И. Синтез нейросетевого регулятора управления нелинейной моделью перевернутого маятника на тележке // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 2–3 (79). – С. 25–36. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-25-36.

For citation:

Voevoda A.A., Shipagin V.I. Sintez neirosetevogo regulyatora upravleniya nelineinoy model'yu perevernutogo mayatnika na telezhke [Synthesis of a neural network control regulator of a nonlinear model of an inverted pendulum on a cart]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 2–3 (79), pp. 25–36. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-25-36.

ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,  
COMPPUTER ENGINEERING  
AND CONTROL

УДК 681.5.865.8

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-37-56

## Управление группой БЛА при неопределенных запаздываниях в каналах связи\*

А.Р. ГАЙДУК<sup>1,a</sup>, С.Г. КАПУСТЯН<sup>2,b</sup>, В.С. ПЛАКСИЕНКО<sup>1,c</sup>,  
А.Э.А. КАБАЛАН<sup>1,d</sup>

<sup>1</sup> 347922, РФ, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, Институт радиотехнических систем и управления, Южный федеральный университет

<sup>2</sup> 344006, РФ, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, Южный научный центр Российской академии наук

<sup>a</sup> [gaiduk\\_2003@mail.ru](mailto:gaiduk_2003@mail.ru) <sup>b</sup> [kap56@mail.ru](mailto:kap56@mail.ru) <sup>c</sup> [vsp46\\_2003@mail.ru](mailto:vsp46_2003@mail.ru)

<sup>d</sup> [ali.kabalan.92@gmail.com](mailto:ali.kabalan.92@gmail.com)

Группы БЛА и других безэкипажных роботов всё шире используются для решения производственных и специальных задач ввиду их большей эффективности по сравнению с одиночными роботами. Эффективность группы во многом определяется возможностями средств коммуникаций между членами группы и ее лидером, влияющих на оперативность принимаемых решений. Часто управление группой БЛА осуществляется многомерной системой управления, алгоритмы которой реализуются вычислительным комплексом БЛА-лидера группы. Проблема здесь заключается в том, что в индивидуальных каналах обмена информацией БЛА-лидера с остальными БЛА группы возникает запаздывание по времени. Произвольное пространственное распределения БЛА в окрестности лидера обуславливает существенно разные, неопределенные запаздывания в каналах его связи с БЛА группы, что может приводить к потере устойчивости управления. Для преодоления этой трудности предлагается применить робастную к запаздыванию многомерную систему управления. Синтез этой системы осуществляется на основе матричного декомпозирующего управления и метода аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям (АССУВВ) с учетом условий реализуемости управлений на цифровых вычислительных элементах.

В статье получены аналитические соотношения, включающие решение линейной системы алгебраических уравнений и процедуру построения алгоритмов цифрового управления группой БЛА, при котором обеспечивается робастная к запаздываниям в каналах связи устойчивость ее движений. Эффективность предложенного подхода иллюстрируется численным примером синтеза многомерной цифровой системы группового управления БЛА. Полученные результаты могут применяться при создании цифровых систем управления как одномерными,

\* Статья получена 21 января 2020 г.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 17-29-07054 и № 19-08-01226, а также в рамках реализации гос. задания ЮНЦ РАН, № г. проекта АААА-А19-119011190173-6.

так и многомерными объектами с неопределенным запаздыванием в сельскохозяйственных, пищевых, энергетических машиностроительных и других производствах.

**Ключевые слова:** группа БЛА, многомерная система, синтез, канал связи, запаздывание по времени, матричное декомпозирующее управление, робастность, управление по выходу и воздействиям, устойчивость

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время автономные роботы, в частности беспилотные летательные аппараты (БЛА), находят всё более широкое применение для решения задач производственной, социальной и оборонной направленности. Многие задачи, такие как доставка индивидуальных заказов, мониторинг отдельных автомобильных или железнодорожных трасс, состояния линий электропередач, трубопроводов, ледовой обстановки на реках, инспектирование государственной границы и другие аналогичные задачи, могут быть успешно решены одиночными БЛА [1–4]. Однако решение таких задач, как мониторинг больших лесных массивов, картографирование административных территорий, обследование морских акваторий, а также оборонных задач одиночными БЛА весьма затруднительно и чаще всего оказывается экономически неэффективным. Поэтому в этих и многих других аналогичных случаях применяются группы, состоящие из нескольких БЛА [5–10]. Поскольку автономные роботы являются безэкипажными, они снабжаются специальными системами управления, которые обеспечивают движение роботов и выполнение их миссий. При создании соответствующих систем используются практически все известные подходы: классический [1, 3, 4], оптимальное управление [6], коллективное и многоагентное [10–2], интеллектуальное управление [2, 5, 8, 9] и другие. Наличие нескольких БЛА в группе обуславливает необходимость применения многомерного, группового управления [9, 10, 13].

Эффективность решения задач группового управления существенно зависит от коммуникационных возможностей средств связи между членами группы [5, 14, 15]. Если в группу объединяются БЛА, имеющие системы управления с ограниченными возможностями, то задача управления группой возлагается на систему группового управления (СГУ), располагающуюся на БЛА-лидере, являющемся членом этой же группы. В рамках выполнения этой роли СГУ лидера формирует управление каждым БЛА группы с учетом его ответных сигналов, поступающих по каналам связи. Из-за произвольного распределения группы в пространстве сигналы принимаются лидером от БЛА, а также БЛА от лидера с некоторой задержкой по времени. Причем сигналы распространяются по каналам связи с различной задержкой из-за использования различных способов связи [5, 12, 14]. Если БЛА находится в пределах радиуса действия средств связи, то связь осуществляется по прямому каналу «лидер – БЛА – лидер». Но так как радиус действия средств связи всех типов ограничен, то связь с БЛА, которые находятся вне радиуса прямого действия связи, осуществляется через промежуточные БЛА, выполняющие роль ретрансляторов, т. е. используются каналы типа «лидер – БЛА – ... – БЛА – лидер». В этих случаях число БЛА-ретрансляторов в разные моменты времени и для разных БЛА является различным в зависимости от простран-

ственного расположения БЛА, что и приводит к неопределенности значений задержки от различных БЛА в различные моменты времени [5, 14].

С другой стороны, область пространства, в которой распределены БЛА одной группы, всегда является ограниченной, следовательно, и максимально возможное запаздывание не превышает некоторого значения. Это значение зависит от числа БЛА в группе и от расстояния, которое они должны поддерживать между собою с тем, чтобы обеспечивалось их безопасное движение в одной группе. Другими словами, временная задержка сигналов управления в каналах связи БЛА-лидера с другими БЛА группы может изменяться в некоторых пределах, но не превышать некоторого значения.

Как известно, временная задержка в системах управления оказывает существенное влияние на их свойства, в частности на устойчивость [16–21]. Наибольшие трудности в обеспечении устойчивости замкнутых систем управления возникают в тех случаях, когда запаздывание является неопределенным [18, 19, 21]. Для преодоления этой трудности представляется целесообразным использование робастных систем управления с запаздыванием [22–25]. Применительно к управлению движением группы БЛА системы этого типа могут обеспечить асимптотическую устойчивость ее движений при любых ограниченных значениях запаздывания в каналах связи БЛА-лидера с другими БЛА.

Задача синтеза робастных многомерных дискретных систем управления непрерывными объектами рассматривалась в работах [22, 23]. В настоящей работе рассматривается задача синтеза цифровой робастной СГУ с запаздыванием, так как системы управления БЛА, как правило, реализуются на основе вычислительных средств. Наличие нескольких БЛА в группе превращает СГУ в многомерную, что существенно осложняет ее синтез. Решение задачи синтеза получено на основе матричного декомпозирующего управления и метода аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям (АССУВВ) с применением результатов по устойчивости дискретных возмущенных систем [13, 23].

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предположим, управляемое движение группы БЛА с лидером описывается системой дифференциальных уравнений

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t, \tau_c), \quad y(t) = Cx(t), \quad (1)$$

где  $x(t)$  –  $n$ -вектор состояния группы;  $A_c, B_c, C$  – числовые матрицы соответствующих размерностей;  $u(t, \tau_c) = [u_1(t, \tau_{c1}) \dots u_\chi(t, \tau_{c\chi})]^T$  и  $y(t) = [y_1(t) \dots y_\chi(t)]$  –  $\chi$ -вектор управления  $u_i(t, \tau_{ci})$  и выходных переменных  $y_i(t)$  БЛА группы;  $\chi$  – число БЛА в группе;  $\tau_{ci}$  – запаздывание в канале связи  $i$ -го БЛА с лидером,  $i = \overline{1, \chi}$ ;  $\tau_{\min}$  – минимальное,  $\tau_{\max}$  – максимальное время информационного обмена одного БЛА группы с ее лидером, а  $\tau_{cc}$  – время расчета управляющих воздействий;  $T = (\chi \tau_{\max} + \tau_{cc})$  – период работы вычислительного комплекса лидера (ВКЛ), который осуществляет расчет управляющих воздействий.

Значения запаздываний  $\tau_{ci}$ ,  $i = \overline{1, \chi}$ , заранее неизвестны, так как определяются текущим расположением БЛА относительно БЛА-лидера. Группа БЛА (1), как объект управления, является, во-первых, многомерной, а во-вторых, полной, т. е. пара матриц  $A_c$  и  $B_c$  является вполне управляемой, а пара  $A_c$  и  $C$  – вполне наблюдаемой [13]. При этом предполагается, что матрица  $A_c$  является устойчивой. Реализация алгоритмов управления группой БЛА осуществляется многомерным цифровым устройством управления (МЦУУ), которое реализуется ВКЛ. Задача синтеза системы группового управления (СГУ), включающей группу БЛА и МЦУУ, очевидно, заключается в разработке векторного дискретного управления, которое обеспечивает робастную устойчивость к неопределенным значениям запаздывания в каналах связи каждого БЛА с лидером, а также алгоритмов функционирования МЦУУ.

## 2. ПОСТРОЕНИЕ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ

Так как разрабатываемая СГУ является цифровой, а объект управления описывается непрерывной моделью (1), то прежде всего необходимо найти ее соответствующую дискретную модель [5, 10, 23]. С этой целью, учитывая, что запаздывания в каналах управления каждым БЛА являются неопределенными и не превышают одного периода  $T$ , введем расчетное время запаздывания  $\tau_0 = 0,5\tau_{\max}\chi + \tau_{cc}$ . В этом случае отклонения  $\tau_i = \tau_0 - \tau_{ci}$  запаздываний  $\tau_{ci}$  удовлетворяют следующему условию:

$$\tau_0 - \tau_{\max} < |\tau_{ci}| < \tau_0 - \tau_{\min}, \quad i = \overline{1, \chi}. \quad (2)$$

Для большей ясности процесса определения дискретной модели группы БЛА рассмотрим предварительно уравнения одиночного  $i$ -го БЛА, управляемого от ЭВМ с запаздыванием  $\tau_{ci}$  и периодом  $T$ . На рис. 1 показано распределение во времени тактовых моментов времени  $kT$  и управляющих сигналов  $u_{ik} = u_i(kT, \tau_{ci})$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$  при  $0 < \tau_{ci} < T$ . В этом случае разностные уравнения, описывающие поведение этого БЛА [26, 27], имеют вид

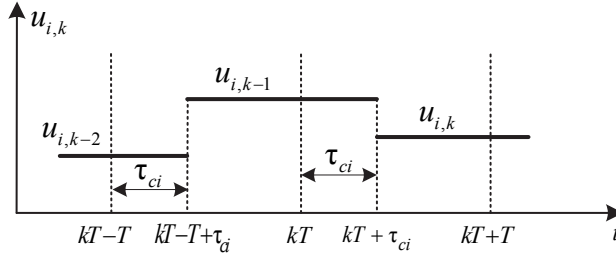
$$x_{i,k+1} = e^{A_{ci}T} x_{ik} + b_{ai}(\tau_{ci})u_{i(k-1)} + b_{bi}(\tau_{ci})u_{ik}, \quad y_{ik} = c_i x_{ik}, \quad (3)$$

где  $x_{i,k} = x_i(kT)$  – вектор дискретных значений вектора состояния, рассматриваемого  $i$ -го БЛА;  $u_{i,k-1}$ ,  $u_{ik}$  и  $y_{i,k-1}$ ,  $y_{ik}$  – значения его управления и выходной величины в соответствующие моменты времени  $t = (k-1)T$  и  $t = kT$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ . Векторы  $b_{ai}(\tau_{ci})$  и  $b_{bi}(\tau_{ci})$  определяются выражениями

$$b_{ai}(\tau_{ci}) = (e^{A_{ci}T} - e^{A_{ci}(T-\tau_{ci})})A_{ci}^{-1}b_{ci}, \quad b_{bi}(\tau_{ci}) = (e^{A_{ci}(T-\tau_{ci})} - E)A_{ci}^{-1}b_{ci}; \quad (4)$$

$A_{ci}$ ,  $b_{ci}$ ,  $c_i$  – матрица и векторы уравнений рассматриваемого одиночного  $i$ -го БЛА, аналогичных (1);  $E$  – единичная матрица соответствующей размерности.





Дискретное управление с запаздыванием

Discrete control with a delay

Учитывая в формулах (4) равенство  $\tau_{ci} = \tau_0 - \tau_i$ , получим выражения

$$b_{ai}(\tau_{ci}) = b_{ai}(\tau_0) + \bar{b}_{ai}(\tau_i), \quad b_{bi}(\tau_{ci}) = b_{bi}(\tau_0) + \bar{b}_{bi}(\tau_i), \quad (5)$$

где

$$b_{ai}(\tau_0) = \left( e^{A_{ci}T} - e^{A_{ci}(T-\tau_0)} \right) A_{ci}^{-1} b_{ci}, \quad (6)$$

$$\bar{b}_{ai}(\tau_i) = \left( e^{A_{ci}(T-\tau_0)} - e^{A_{ci}(T-\tau_0-\tau_i)} \right) A_{ci}^{-1} b_{ci};$$

$$b_{bi}(\tau_0) = \left( e^{A_{ci}(T-\tau_0)} - E \right) A_{ci}^{-1} b_{ci}, \quad (7)$$

$$\bar{b}_{bi}(\tau_i) = \left( e^{A_{ci}(T-\tau_0-\tau_i)} - e^{A_{ci}(T-\tau_0)} \right) A_{ci}^{-1} b_{ci}.$$

Подставляя выражения (4)–(7) в (3) и переходя к  $z$ -изображениям, приходим к уравнению

$$y_i(z) = c_i(zE - A_i)^{-1} \left[ z^{-1} [b_{ai}(\tau_0) + \bar{b}_{ai}(\tau_i)] + b_{bi}(\tau_0) + \bar{b}_{bi}(\tau_i) \right] u_i(z), \quad (8)$$

где  $A_i = e^{A_{ci}T}$ . Из вторых выражений (6) и (7) следует, что  $\bar{b}_{bi}(\tau) = -\bar{b}_{ai}(\tau)$ . Это позволяет уравнение (8), описывающее поведение одиночного БЛА при цифровом управлении с запаздыванием, представить следующим образом:

$$y_i(z) = z^{-1} c_i(zE - A_i)^{-1} \{ [b_{ai}(\tau_0) + z b_{bi}(\tau_0)] + (1-z) \bar{b}_{ai}(\tau_i) \} u_i(z). \quad (9)$$

На основе уравнения (9) можно заключить, что дискретная математическая модель группы, включающей  $\chi$  БЛА, движение которой описывается системой уравнений (1), (2), где  $i = \overline{1, \chi}$ , имеет следующий вид:

$$y(z) = z^{-1} C(zE - A)^{-1} \{ [b_{a,1}(\tau_0) u_1(z) \dots b_{a,\chi}(\tau_0) u_\chi(z)] + z [(b_{b,1}(\tau_0) u_1(z) \dots \dots b_{b,\chi}(\tau_0) u_\chi(z))] + (1-z) [\bar{b}_{a,1}(\tau_1) u_1(z) \dots \bar{b}_{a,\chi}(\tau_\chi) u_\chi(z)] \}, \quad (10)$$

Как известно,  $(zE - A)^{-1} = A^{-1}(z) \text{adj}(zE - A)$ , где  $A(z) = \det(zE - A)$ , а  $\text{adj}(\cdot)$  – присоединенная матрица [28]. Поэтому уравнение (10) с использованием дискретных передаточных матриц перепишем в виде

$$y(z) = [W_{yu}(z, \tau_0) + \bar{W}_{yu}(z, \tau)]u(z), \quad (11)$$

где вектор  $u(z) = [u_1(z) u_2(z) \dots u_\chi(z)]^T$ ,

$$W_{yu}(z, \tau_0) = \frac{C \text{adj}(zE - A)B(\tau_0)}{zA(z)} = \frac{1}{zA(z)} H(z, \tau_0), \quad (12)$$

$$\bar{W}_{yu}(z, \tau) = \frac{(1-z)C \text{adj}(zE - A)\bar{B}(\tau)}{zA(z)} = \frac{1}{zA(z)} \bar{H}(z, \tau), \quad (13)$$

$$B(\tau_0) = [b_{a,1}(\tau_0) \dots b_{a,\chi}(\tau_0)] + z[b_{b,1}(\tau_0) \dots b_{b,\chi}(\tau_0)], \quad (14)$$

$$\bar{B}(\tau) = [\bar{b}_{a,1}(\tau) \dots \bar{b}_{a,\chi}(\tau)]. \quad (15)$$

Столбцы матриц (14), (15) определяются выражениями (6), (7), в которых матрица  $A_{ci}$  заменяется на  $A_c$ .

Таким образом, задача синтеза искомой многомерной СГУ состоит в определении закона формирования векторного дискретного управления  $u(z)$  так, чтобы система управления объектом (11)–(15) была робастно устойчивой к неопределенным значениям  $\tau_i$ ,  $i = \bar{1}, \chi$ .

### 3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА СГУ

Для решения поставленной задачи синтеза воспользуемся матричным декомпозирующим управлением и методом аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям (АССУВВ) [13, 27, 29]. В этом случае многомерное цифровое устройство управления МЦУУ описывается уравнением

$$u(z) = \text{adj}W_{yu}(z, \tau_0)R^{-1}(z) \left[ Q(z)g(z) - z^\chi L(z)E y(z) \right], \quad (16)$$

где  $R(z)$  и  $L(z)$  – полиномы степеней  $r$  и  $l$ ;  $Q(z)$  – полиномиальная  $\chi \times \chi$  матрица, подлежащая определению;  $g(z)$  – вектор задающих воздействий, посредством которого вышестоящая система управления задает движения БЛА группы.

В соответствии с выражениями (12), (14) передаточная матрица  $W_{yu}(z, \tau_0) = H(z, \tau_0) / zA(z)$ , причем  $H(z, \tau_0)$  –  $\chi \times \chi$  матрица, элементы которой – полиномы степени  $n$ . Поэтому присоединенная матрица  $\text{adj}W_{yu}(z, \tau_0) = Ad(z, \tau_0) / z^{\chi-1} A^{\chi-1}(z)$ , а  $\det W_{yu}(z, \tau_0) = V(z, \tau_0) A(z) / z^\chi A^\chi(z)$ , где  $Ad(z, \tau_0)$  – матрица размером  $\chi \times \chi$ , причем ее элементами являются полиномы степени  $n(\chi - 1)$ , а  $V(z, \tau_0)$  – полином той же степени  $n(\chi - 1)$ .

Исключив из уравнений (11) и (16) вектор управления  $u(z)$  с учетом свойств присоединенной матрицы и ее определителя  $W_{yu}(z, \tau_0)$ , получим следующее выражение:

$$y(z) = \left[ \frac{V(z, \tau_0)A(z)}{z^\chi A^\chi(z)} E + \frac{\Delta(z, \tau)}{z^\chi A^\chi(z)} \right] R^{-1}(z) \left[ Q(z)g(z) - z^\chi L(z)Ey(z) \right]. \quad (17)$$

Отметим, что в выражении (17)  $\Delta(z, \tau)$  – полиномиальная  $\chi \times \chi$  матрица, степени элементов которой не более  $n \cdot \chi$ . Из этого выражения вытекает матричное уравнение «вход–выход» замкнутой системы (11), (16):

$$z^\chi A^\chi(z) [D_0(z)E + \Delta(z, \tau)L(z)]y(z) = [V(z, \tau_0)A(z)Q(z) + \Delta(z, \tau)Q(z)]g(z), \quad (18)$$

где

$$D_0(z) = A^{\chi-1}(z)R(z) + V(z, \tau_0)L(z), \quad (19)$$

$$\Delta(z, \tau) = \bar{H}(z, \tau)Ad(z, \tau_0). \quad (20)$$

Полиномиальное уравнение (19) имеет решение относительно полиномов  $R(z)$  и  $L(z)$ , так как полиномы  $A(z)$  и  $V(z, \tau_0)$  известны и не имеют общих корней, поскольку группа БЛА, как объект управления, является полной [13, 27]. При указанных свойствах полиномов  $A(z)$  и  $V(z, \tau_0)$  полиномиальное уравнение (19) позволяет найти такие единственные полиномы  $R(z)$  и  $L(z)$ , при которых полином  $D_0(z)$  имеет заранее заданный вид. Если запаздывание в каналах связи всех БЛА с лидером равно  $\tau_0$ , т. е.  $\tau_{ci} = \tau_0$ ,  $i = \overline{1, \chi}$ , то, как видно из выражений (6), (7) и (15), матрица  $\bar{H}(z, \tau) \equiv 0$ , при этом согласно (18) полином  $D_0(z)$  является множителем характеристического полинома  $D(z) = z^\chi A^\chi(z)D_0^\chi(z)$  замкнутой дискретной системы (11), (16).

Полином  $A(z)$  по постановке задачи является устойчивым, поэтому, применяя метод АССУВВ, будем синтезировать СГУ как систему с согласованными полюсами. С целью понижения ее сложности на комплексной плоскости  $z$  выделяется область  $\Omega_z$ , в которой с точки зрения устойчивости замкнутой системы допускается расположение корней ее характеристического полинома [13, 27]. Если все корни некоторого полинома  $\tilde{M}(z)$  располагаются в области  $\Omega_z$ , то он будет обозначаться  $\tilde{M}_\Omega(z)$ , в противном случае  $\tilde{M}_{\bar{\Omega}}(z)$ . При решении уравнения (18) целесообразно осуществлять факторизацию относительно области  $\Omega_z$  обоих полиномов  $A(z)$  и  $V(z, \tau_0)$ , т. е. целесообразно находить представления  $A(z) = A_\Omega(z)A_{\bar{\Omega}}(z)$ ,  $V_0(z, \tau_0) = V_\Omega(z, \tau_0)V_{\bar{\Omega}}(z, \tau_0)$ . При этом естественно необходимо полагать:  $D_0(z) = A_\Omega(z)V_\Omega(z, \tau_0)\tilde{D}_\Omega(z)$ ;  $R(z) = V_\Omega(z, \tau_0)\tilde{R}(z)$ ;  $L(z) = A_\Omega(z)\tilde{L}(z)$ , где  $\tilde{D}_\Omega(z)$ ,  $\tilde{R}(z)$ ,  $\tilde{L}(z)$  – полиномы

более низкого порядка, определяемые решением следующего полиномиального уравнения:

$$\tilde{D}_\Omega(z) = A_{\bar{\Omega}}(z)\tilde{R}(z) + V_{\bar{\Omega}}(z, \tau_0)\tilde{L}(z). \quad (21)$$

Здесь  $\tilde{D}_\Omega(z)$  – полином, назначаемый исходя из условий устойчивости и качества синтезируемой системы.

Полагая в (16)  $Q(z) = z^3 A_\Omega(z)V_\Omega(z, \tau)\tilde{Q}(z)$ , из выражений (18)–(20) можно найти, что передаточная матрица СГУ по задающим воздействиям при  $\tau_{ci} = \tau_0$ ,  $i = \overline{1, \chi}$ , определяется выражением

$$W_{yg}(z, \tau_0) = \frac{V_{\bar{\Omega}}(z, \tau_0)\tilde{Q}(z)}{A^{\chi-1}(z)\tilde{D}_\Omega(z)}. \quad (22)$$

Основная сложность данной задачи синтеза заключается в обеспечении робастной устойчивости к неопределенным значениям запаздываний в каналах связи. Эта неопределенность проявляется в неопределенности полиномиальной матрицы размером  $\chi \times \chi$   $\Delta(z, \tau) \neq 0$  в (18) и (20) при  $\tau_{ci} \neq \tau_0$ ,  $i \in [1, \chi]$ . Из выражения (18) следует, что характеристический полином произведения  $\Delta(z, \tau)L(z) = \bar{H}(z, \tau)Ad(z, \tau_0)L(z)$  является «возмущением» устойчивого характеристического полинома  $D(z) = z^\chi A^\chi(z)D_0^\chi(z)$ , который имеет синтезируемая СГУ при  $\tau_{ci} = \tau_0$ ,  $i = \overline{1, \chi}$ .

В данном случае решение задачи робастной устойчивости достигается на основе следующего свойства системы (21). Как показано в работе [23], если корни полинома  $A_{\bar{\Omega}}(z)$  меньше единицы, то с увеличением степени полинома  $\tilde{R}(z)$  значения коэффициентов  $\lambda_i$  полинома  $\tilde{L}(z)$  уменьшаются. Поэтому при достаточно высоком порядке МЦУУ корни возмущенного характеристического полинома замкнутой системы (18) будут мало отличаться от корней невозмущенного характеристического полинома  $D(z) = z^\chi A^\chi(z)D_0^\chi(z)$  при всех значениях запаздываний во всех каналах связи. Этим и будет обеспечиваться робастность к запаздыванию замкнутой системы.

Для определения соответствующего значения степени полинома  $\tilde{R}(z)$  можно использовать метод оценок норм полиномиальных матриц, предложенный в работе [27]. Однако этот подход приводит к завышенным значениям порядка МЦУУ, поэтому более предпочтительным является численный метод решения уравнения (21) при различных значениях степени полинома  $\tilde{R}(z)$  и определения минимального значения этой величины, при котором обеспечивается устойчивость характеристического полинома рассматриваемой системы при максимальном значении отклонений  $\tau_i$  запаздываний  $\tau_{ci}$  от расчетного значения  $\tau_0$  при всех  $i \in [1, \chi]$ .

С целью упрощения реализации полученного МЦУУ целесообразно его математическую модель (16) представить в виде двух моделей: модели «де-

композирующей части» и модели «качества» [13]. Первая часть при  $\tau_{ci} = \tau_0$  обеспечивает декомпозицию модели группы БЛА на  $\chi$  автономных каналов, а вторая служит для обеспечения робастной устойчивости и желаемого качества переходных процессов соответствующих подсистем. Как показано выше, матрица  $Ad_j \text{ adj}W_{yu}(z, \tau_0) = [Ad_{ij}(z, \tau_0)] / (zA(z))^{\chi-1}$ . Это позволяет уравнения МЦУУ (16) представить следующим образом:

$$(zA(z))^{\chi-1} u_i(z) = Ad_{i1}(z, \tau_0) v_1(z) + Ad_{i2}(z, \tau_0) v_2(z) + \dots + Ad_{i\chi}(z, \tau_0) v_\chi(z), \quad (23)$$

$$R(z) v_i(z) = \sum_{j=1}^{\chi} Q_{ij}(z) g_j(z) - z^\chi L(z) E y_i(z), \quad i = \overline{1, \chi}, \quad (24)$$

где  $v_i(z)$  – промежуточные переменные. Очень часто полиномы  $(zA(z))^{\chi-1}$ ,  $L(z)$ , а также  $R(z)$  и  $Q_{ij}(z)$ ,  $i, j = \overline{1, \chi}$ , могут иметь общие множители, что позволяет их сократить и тем самым существенно снизить сложность (порядок) МЦУУ. Результирующие выражения (23), (24) позволяют путем перехода к разностным уравнениям легко получить соответствующие алгоритмы МЦУУ для вычисления значений управляющих воздействий.

Подчеркнем, что порядок робастной СГУ, синтезированной на основе данного подхода, является довольно высоким из-за высокого порядка модели группы БЛА. Поэтому расчет параметров МЦУУ и реализацию соответствующего алгоритма необходимо осуществлять с высокой точностью. Однако современные вычислительные комплексы обладают довольно большой разрядностью и производительностью, что обеспечивает достаточно точную реализацию алгоритмов управления, соответствующих уравнениям (23), (24). Как отмечалось выше, при  $\tau_{ci} = \tau_0$ ,  $i = \overline{1, \chi}$ , матрица  $\Delta(z, \tau) \equiv 0$  в уравнении (18), поэтому при диагональной матрице  $Q(z)$  замкнутая цифровая система (11), (16) является автономной по И.Н. Вознесенскому, т. е. каждое задающее воздействие  $g_i(t)$  влияет только на «свою» управляемую переменную  $y_i(t)$ . При  $\tau_{ci} \neq \tau_0$ ,  $i = \overline{1, \chi}$ , это свойство системы теряется из-за влияния матрицы  $\Delta(z, \tau)$ . Однако элементы этой матрицы обычно малы, так что взаимовлияние каналов управления отдельными БЛА незначительно.

#### 4. ПРИМЕР СИНТЕЗА СГУ

Рассмотрим группу, состоящую из трех БЛА, один из которых является лидером. Движения этой группы описываются системой уравнений (1), где

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -3 & -6,5 & -4,5 \end{bmatrix}, \quad B_c = \begin{bmatrix} 0 & 0,3 & 0 \\ 0,2 & 2 & 3 \\ 4 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0,1 & 0 \\ 0 & 2 & 0,2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Запаздывания в каналах связи  $0,5 \text{ с} < \tau_{ci} < 1,4 \text{ с}$ ;  $i = 1, 2, 3$ , т. е.  $\chi = 3$ ; расчетное значение  $\tau_0 = 1 \text{ с}$ ; период работы ВКЛ  $T = 1,5 \text{ с}$ .

Выполнив с учетом равенств (25) преобразования, соответствующие выражениям (3)–(14), получим дискретную модель группы в виде уравнения в изображениях (10) и уравнение замкнутой системы (18). Передаточные матрицы в уравнении (10) для компактности представим следующим образом:

$$W_{yu}(z, \tau_0) = \frac{1}{zA(z)}[h_{ij}(z)], \quad \bar{W}_{yu}(z, \tau)_{\tau=-0,5} = \frac{1}{zA(z)}[\bar{h}_{ij}(z)]. \quad (26)$$

Полиномы, содержащиеся в этих выражениях, имеют вид:

$$\begin{aligned} A(z) &= z^3 - 0,3783z^2 + 0,03987z - 0,001171, \\ h_{11}(z) &= 0,1029z^3 + 0,7998z^2 + 0,1746z + 0,001446, \\ h_{12}(z) &= 0,4578z^3 + 1,7295z^2 + 0,2026z + 0,000239, \\ h_{13}(z) &= 0,4656z^3 + 2,2065z^2 + 0,3003z - 0,000254, \\ h_{21}(z) &= 0,4326z^3 - 0,1484z^2 - 0,2985z - 0,00302, \\ h_{22}(z) &= 0,6431z^3 - 0,6762z^2 - 0,4303z - 0,000981, \\ h_{23}(z) &= 0,9970z^3 - 0,7903z^2 - 0,6045z + 0,00160, \\ h_{31}(z) &= 0,5141z^3 - 1,1363z^2 + 0,4491z + 0,04105, \\ h_{32}(z) &= -0,8972z^3 - 1,7504z^2 + 0,8777z + 0,03343, \\ h_{33}(z) &= -1,2660z^3 - 1,9584z^2 + 1,1968z + 0,04654, \\ \bar{h}_{11}(z) &= 0,2574z^3 - 0,1365z^2 - 0,1195z - 0,001414, \\ \bar{h}_{12}(z) &= 0,6789z^3 - 0,5210z^2 - 0,1577z - 0,000232, \\ \bar{h}_{13}(z) &= 0,8214z^3 - 0,5921z^2 - 0,2293z + 3,71 \cdot 10^{-7}, \\ \bar{h}_{21}(z) &= 0,1598z^3 - 0,3449z^2 + 0,1818z + 0,003288, \\ \bar{h}_{22}(z) &= 0,0685z^3 - 0,3578z^2 + 0,2889z + 0,000429, \\ \bar{h}_{23}(z) &= 0,1785z^3 - 0,5829z^2 + 0,4039z + 0,000486, \\ \bar{h}_{31}(z) &= -0,4498z^3 + 0,6039z^2 - 0,1203z - 0,03379, \end{aligned}$$

$$\bar{h}_{32}(z) = -1,0300z^3 + 1,4730z^2 - 0,4136z - 0,02937,$$

$$\bar{h}_{33}(z) = -1,4710z^3 + 2,0745z^2 - 0,5627z - 0,04085.$$

Здесь приведены полиномы матрицы  $\bar{H}(z, \tau)$  при  $\tau = -0,5$ , так как это наибольшее отклонение запаздываний в каналах связи. Эта матрица будет использоваться при оценке робастной устойчивости СГУ, синтезированной в данном примере.

Предполагая синтез системы с согласованными полюсами, область  $\Omega$  определим условием  $|z_\Omega| < 0,45$  и представим полином  $V(z, \tau_0)$  – числитель  $\det W_{yu}(z, \tau_0)$  (12) при  $\tau_0 = 1$  (см. уравнения (17)–(19)) в виде произведения:  $V(z, 1) = V_\Omega(z, 1)V_{\bar{\Omega}}(z, 1)$ , где  $V_\Omega(z, 1) = z^3 + 0,08042z^2 - 0,01559z - 0,000504$ ,  $V_{\bar{\Omega}}(z, 1) = 0,15899z^3 + 0,23162z^2 + 0,01481z - 0,12899$ . Для обеспечения указанного выше свойства полиномиального уравнения (21) необходимо, чтобы  $\deg A_{\bar{\Omega}}(z) \geq V_{\bar{\Omega}}(z, \tau)$ , поэтому полином  $A_{\bar{\Omega}}(z)$  берется таким:  $A_{\bar{\Omega}}(z) = (z^2 - 0,3285z + 0,235)^2$ , тогда  $A_\Omega(z) = (z - 0,0498)^2$ . В этом случае из условия минимальности решения полиномиального уравнения (21) при указанных полиномах  $A_{\bar{\Omega}}(z)$ ,  $V_{\bar{\Omega}}(z, \tau_0)$  и условия реализуемости управления (16) на цифровых элементах [27] следуют равенства  $\deg \tilde{D}_\Omega(z) = 10$ ,  $\deg \tilde{R}(z) = 6$  и  $\deg \tilde{L}(z) = 3$ . Так как полином  $\tilde{D}_\Omega(z)$  подвергается возмущениям из-за неопределенности запаздываний в каналах связи системы, то он принимается в виде  $\tilde{D}_\Omega(z) = z^{10}$ .

Степень полинома  $\tilde{R}(z)$  довольно высокая, поэтому целесообразно оценить робастную устойчивость системы минимальной сложности, т. е. без увеличения порядка МЦУУ. С этой целью составляется и решается линейная алгебраическая система уравнений, эквивалентная полиномиальному уравнению (21). В данном случае эта система имеет 11-й порядок и весьма громоздкая. Форму этой системы и порядок ее составления можно найти в [27, с. 222] или в [29, с. 34], поэтому здесь она не приводится. Ее решение позволяет записать полиномы:

$$\tilde{L}(z) = 10^{-2}(-0,57218z^3 + 0,22872z^2 - 0,029152z + 0,0012016),$$

$$\begin{aligned} \tilde{R}(z) = & z^6 + 0,65697z^5 + 0,27669z^4 + \\ & + 0,09545z^3 + 0,03034z^2 + 0,01002z + 0,002805. \end{aligned}$$

Отметим, что если при  $\deg \tilde{R}(z) = 6$  максимальное значение модуля коэффициентов  $\lambda_i$  полинома  $\tilde{L}(z)$ :  $\max_{i=0 \div 3} |\lambda_i| \approx 0,00572$ , то при увеличении этой степени до  $\deg \tilde{R}(z) = 8$  величина  $\max_{i=0 \div 3} |\lambda_i| \approx 0,0000592$ . Это подтверждает указанное выше свойство полиномиального уравнения (21): с увеличением

степени полинома  $\tilde{R}(z)$  значения коэффициентов  $\lambda_i$  полинома  $\tilde{L}(z)$  уменьшаются, если корни полинома  $A_\Omega(z)$  по модулю меньше единицы.

С целью обеспечения автономности по И.Н. Вознесенскому при запаздываниях во всех каналах связи, равных расчетному  $\tau_0 = 1$  с, матрица  $\tilde{Q}(z)$  в (22) принимается диагональной, т. е.  $\tilde{Q}(z) = \tilde{Q}_i(z)E$ , где  $\tilde{Q}_i(z)$  – некоторый полином. В этом случае передаточные функции СГУ по задающим воздействиям  $g_i(t)$  в соответствии с (22) определяются выражением

$$W_{y_i g_i}(z, 1) = \frac{(0,15899z^3 + 0,23162z^2 + 0,01481z - 0,12899)\tilde{Q}_i(z)}{(z^3 - 0,3783z^2 + 0,03987z - 0,001171)^2 z^{10}}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (27)$$

Коэффициенты полиномов  $\tilde{Q}_i(z)$  целесообразно выбрать из условия нулевой статической ошибки по всем задающим воздействиям [27, с. 151]. Для обеспечения этого условия, очевидно, достаточно взять  $\tilde{Q}_i(z) = 1,57771$ .

Для оценки робастной устойчивости синтезируемой системы при  $\tau_{ci} \neq 1$ ,  $\chi = 3$  и при  $\deg \tilde{R}(z) = 6$ , т. е. при  $\tilde{D}_\Omega(z) = z^{10}$ , найдем ее характеристический полином при отсутствии внешних воздействий. В этом случае ее уравнение (18) с учетом полученных выше выражений принимает вид  $z^2 A^2(z) A_\Omega(z) V_\Omega(z) [\tilde{D}_\Omega(z, 1)E + \Delta(z, 1)\tilde{L}(z)] y(z) = 0$ . Следовательно, возмущенная часть характеристического полинома описывается выражением

$$D_{cd}(z, \tau) = \det \left[ \begin{array}{ccc} z^{10} & 0 & 0 \\ 0 & z^{10} & 0 \\ 0 & 0 & z^{10} \end{array} + \begin{array}{ccc} \bar{h}_{11}(z, \tau) & \bar{h}_{12}(z, \tau) & \bar{h}_{13}(z, \tau) \\ \bar{h}_{21}(z, \tau) & \bar{h}_{22}(z, \tau) & \bar{h}_{23}(z, \tau) \\ \bar{h}_{31}(z, \tau) & \bar{h}_{32}(z, \tau) & \bar{h}_{33}(z, \tau) \end{array} \tilde{L}(z) \right]. \quad (28)$$

Коэффициенты полиномов  $\bar{h}_{ij}(z, \tau)$  согласно (6), (10), (13), (15) зависят от отклонений запаздываний в каналах связи и при  $\tau_i = 0$ ,  $i = 1, 2, 3$ , обращаются в нуль. В этом случае все корни полинома (28) равны нулю. С увеличением  $|\tau_i|$  коэффициенты полиномов  $\bar{h}_{ij}(z, \tau)$  увеличиваются, что вызывает отклонения корней полинома  $D_{cd}(z, \tau)$  (28) от нулевых значений. Так как наибольшее значение отклонений запаздываний в данном случае равно  $-0,5$ , то были вычислены приведенные выше полиномы  $\bar{h}_{ij}(z) = \bar{h}_{ij}(z, \tau)$  при  $\tau_i = -0,5$  с. Модули корней полинома  $D_{cd}(z, \tau)$  (28) при этих полиномах  $\bar{h}_{ij}(z)$  лежат в пределах от 0,0363 до 0,3796. При меньших значениях  $|\tau_i|$  отклонения корней меньше. Поэтому можно заключить, что синтезированная при  $\deg \tilde{R}(z) = 6$  СГУ является робастно устойчивой к неопределенным запаздываниям в каналах связи, т. е. необходимости в увеличении порядка МЦУУ нет.

Переходя к реализации полученного МЦУУ, подставим полученные выше выражения в уравнения (23), (24) и сократим общий множитель



$z^2 A_{\Omega}(z)$ , имеющийся в данном случае у полиномов  $(zA(z))^{\chi-1} = z^2 A^2(z)$  и  $L(z)$ ,  $Q_{ij}(z)$ . В результате получим

$$A(z)A_{\Omega}(z)u_i(z) = Ad_{i1}(z,1)v_1(z) + Ad_{i2}(z,1)v_2(z) + Ad_{i3}(z,1)v_3(z), \quad (29)$$

$$V_{\Omega}(z,1)\tilde{R}(z)v_i(z) = \sum_{j=1}^3 [1,5777zV_{\Omega}(z,1)g_j(z) - z\tilde{L}(z)y_i(z)], \quad i=1, 2, 3. \quad (30)$$

В процессе функционирования МЦУУ сначала вычисляет значения промежуточных переменных  $v_{ik}$ , а затем уже определяются значения  $u_{ik}$ . Поэтому приведем сначала алгоритм вычисления промежуточных переменных  $v_{ik}$ , соответствующий уравнению (30), а затем алгоритм вычисления управлений  $u_{ik}$  в соответствии с уравнением (29). С учетом численных значений коэффициентов полиномов уравнение (30) имеет вид

$$\begin{aligned} & (z^9 + 0,7374z^8 + 0,3139z^7 + 0,108z^6 + 0,03404z^5 + 0,01111z^4 + 0,003186z^3 + \\ & + 0,00008466z^2 - 0,00003867z + 0,000001414)v_i(z) = \\ & = (1,5777z^4 + 0,12688z^3 - 0,0246z^2 + 0,0007953z)g_i(z) + \\ & + 10^{-2}(0,57218z^4 - 0,22872z^3 + 0,029152z^2 - 0,0012016z)y_i. \end{aligned}$$

Этому уравнению при  $i=1, 2, 3$  соответствуют следующие алгоритмы:

$$\begin{aligned} v_{i,k} = & -0,7374v_{i,k-1} - 0,3139v_{i,k-2} - 0,108v_{i,k-3} - 0,03404v_{i,k-4} - 0,01111v_{i,k-5} - \\ & - 0,003186v_{i,k-6} - 0,00008466v_{i,k-7} + 0,00003867v_{i,k-8} + 1,5777g_{i,k-5} + \\ & + 0,12688g_{i,k-6} - 0,024596g_{i,k-7} + 0,0007953g_{i,k-8} + 10^{-2}(0,57218y_{i,k-5} - \\ & - 0,22872y_{i,k-6} + 0,029152y_{i,k-7} - 0,0012016y_{i,k-8}). \quad (31) \end{aligned}$$

Как видно, эти алгоритмы имеют одни и те же коэффициенты при всех  $i=1, 2, 3$  и отличаются друг от друга лишь переменными. В то же время уравнения (29), соответствующие различным управлениям  $u_{ik}$ , имеют различные коэффициенты, и переменные. В данном случае их коэффициенты соответствуют коэффициентам следующих полиномов:

$$\begin{aligned} A_{\Omega}(z)A(z) = & z^7 - 1,0353z^6 + 0,4433z^5 - 0,1014z^4 + 0,01334z^3 - \\ & - 0,001006z^2 + 0,00004011z - 0,000000647; \\ Ad_{i1}(z,1) = & 0,08034z^6 + 0,6327z^5 - 0,162z^4 - 0,3342z^3 + \\ & + 0,01141z^2 - 0,00005218z - 0,000007952; \end{aligned}$$

$$Ad_{12}(z,1) = 0,16184z^6 + 0,2914z^5 - 0,6273z^4 - 0,2672z^3 + \\ + 0,01526z^2 + 0,00010z - 0,0000196;$$

$$Ad_{13}(z,1) = 0,1570z^6 + 0,2584z^5 + 0,05776z^4 - 0,05237z^3 + \\ + 0,006989z^2 - 0,0002233z + 0,000000632;$$

$$Ad_{21}(z,1) = 1,0602z^6 - 0,8798z^5 - 0,15128z^4 - 0,05726z^3 + \\ + 0,05252z^2 - 0,006587z + 0,00020635;$$

$$Ad_{22}(z,1) = -0,3696z^6 - 1,8194z^5 + 0,4796z^4 - 0,05047z^3 + \\ + 0,01761z^2 - 0,002356z + 0,00007771;$$

$$Ad_{23}(z,1) = 0,09883z^6 + 0,1694z^5 + 0,1837z^4 - 0,08493z^3 + \\ + 0,009131z^2 - 0,0002367z - 0,000001554;$$

$$Ad_{31}(z,1) = -0,7187z^6 + 0,4543z^5 + 0,07132z^4 + 0,19726z^3 - \\ - 0,03957z^2 + 0,004594z - 0,0001412;$$

$$Ad_{32}(z,1) = 0,3277z^6 + 1,2666z^5 - 0,1892z^4 + 0,16685z^3 - \\ - 0,01572z^2 + 0,001319z - 0,00003852;$$

$$Ad_{33}(z,1) = -0,13187z^6 - 0,23547z^5 - 0,16716z^4 + \\ + 0,08645z^3 - 0,009578z^2 + 0,000232z + 0,000002141.$$

Подставляя первые 4 предыдущих полинома в уравнение (29) и переходя к оригиналам, после небольших преобразований получим следующий алгоритм вычисления управления  $u_{1k}$ :

$$u_{1k} = 1,0353u_{1,k-1} - 0,4433u_{1,k-2} + 0,1014u_{1,k-3} - 0,01334u_{1,k-4} + \\ + 0,001006u_{1,k-5} - 0,0000411u_{1,k-6} + 0,000000647u_{1,k-7} + 0,08034v_{1,k-1} + \\ + 0,6327v_{1,k-2} - 0,162v_{1,k-3} - 0,3342v_{1,k-4} - 0,0000522v_{1,k-6} + \\ + 0,01141v_{1,k-5} - 0,00000795v_{1,k-7} + 0,1618v_{2,k-1} + 0,2914v_{2,k-2} - \\ - 0,6273v_{2,k-3} - 0,0000196v_{2,k-7} + 0,01526v_{2,k-5} + 0,0001v_{2,k-6} +$$

$$\begin{aligned} &+ 0,157v_{3,k-1} + 0,2584v_{3,k-2} + 0,05776v_{3,k-3} + 0,000000632v_{3,k-7} - \\ &- 0,05237v_{3,k-4} + 0,0006989v_{3,k-5} - 0,0002233v_{3,k-6}. \end{aligned} \quad (32)$$

Алгоритмы вычисления управлений  $u_{2k}$  и  $u_{3k}$  записываются совершенно аналогично, но с использованием соответствующих полиномов  $Ad_{ij}(z, 1)$ .

В приведенных выше выражениях численные коэффициенты указаны с небольшим количеством цифр. Подчеркнем, что это обусловлено исключительно компактностью записи выражений. Практически, они вычислялись в MATLAB в формате `format long`, т. е. с 15 знаками после запятой. При реализации алгоритмов (31), (32) при  $i = 1, 2, 3$  соответствующие коэффициенты должны реализовываться с такой же точностью.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана возможность обеспечения робастно устойчивого движения группы БЛА с лидером, осуществляющим управление движением, несмотря на наличие неопределенного, ограниченного запаздывания по времени во всех каналах связи БЛА-лидера с другими БЛА группы. Это достигается применением системы группового управления, многомерное цифровое устройство управления которой имеет достаточно высокий порядок. Алгоритмы вычисления значений управляющих воздействий получены с применением матричного декомпозирующего управления и метода аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям (АССУВВ). Свойство робастности к отклонениям неопределенных запаздываний в каналах связи каждого БЛА с лидером достигается за счет использования свойства полиномиальных уравнений типа  $D(z) = A(z)R(z) + V(z)L(z)$ . Это свойство заключается в том, что если корни полинома  $A(z)$  по модулю меньше единицы, то с увеличением степеней полинома  $R(z)$  и соответственно  $D(z)$  значения коэффициентов полинома  $L(z)$  минимально необходимой степени уменьшаются. Полученные результаты могут применяться при создании цифровых систем управления как одномерными, так и многомерными объектами с неопределенным запаздыванием сельскохозяйственных, пищевых, энергетических, машиностроительных и других производств.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2 кн. Кн. 1. Принципы и особенности построения комплексов с БЛА / под ред. В.С. Вербы, Б.Г. Татарского. – М.: Радиотехника, 2016. – 512 с.
2. *Morales R.S. de, Freitas E.P. de.* Distributed control for groups of unmanned aerial vehicles performing surveillance missions and providing relay communication network services // *Journal of Intelligent & Robotic Systems.* – 2018. – N 92. – P. 645–656.
3. *Абрамов Н.С., Хачумов М.В.* Моделирование проводки по маршруту беспилотного летательного аппарата как задачи преследования цели // *Авиакосмическое приборостроение.* – 2013. – № 9. – С. 9–22.

4. *Ta Duc A., Fantoni I., Lozano R.* Modeling and control of a convertible mini-UAV // Preprints of the 18th IFAC World Congress. – Milano, Italy, 2011. – P. 1492–1497.
5. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2 кн. Кн. 2. Робототехнические комплексы на основе БЛА / под ред. В.С. Вербы, Б.Г. Татарского. – М.: Радиотехника, 2016. – 824 с.
6. *Верба В.С., Меркулов В.И., Михеев В.А.* Оптимизация группового управления беспилотными летательными аппаратами в составе локальной сети // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: сборник трудов. – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 279–284.
7. *Kapustyan S.G., Gaiduk A.R., Shapovalov I.O.* Self-organization in groups of intelligent robots // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2015. – Vol. 345. – P. 171–181.
8. *Utkin L.V., Zaborovsky V.S., Popov S.G.* Siamese neural network for intelligent information security control in multi-robot systems // *Automatic Control and Computer Sciences*. – 2017. – N 8 (51). – P. 881–887.
9. Нейросетевая система управления группой роботов в неопределенной двумерной среде / А.Р. Гайдук, О.В. Мартыанов, М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов, Н. Хамдан, А. Фархун // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2020. – № 21 (8). – С. 470–479. – DOI: 10.17587/mau.21.470-479.
10. *Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Концепция построения систем коллективного управления беспилотными летательными аппаратами // *Системы радиоуправления* / под ред. В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2018. – Кн. 4: Оптимизация алгоритмов управления. – С. 39–46.
11. Мультиагентное управление механизмом параллельной структуры на основе декомпозирующего подхода / А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян, Е.А. Плаксиенко, К.В. Колоколова // *Научный вестник НГТУ*. – 2018. – № 1 (70). – С. 51–66.
12. Алгоритмы автономного группового управления горизонтальными движениями БЛА / А.Р. Гайдук, А.А. Дьяченко, С.Г. Капустян, Е.А. Плаксиенко // *Научный вестник НГТУ*. – 2017. – № 2 (67). – С. 120–134. – DOI: 10.17212/1814-1196-2017-2-120-134.
13. *Гайдук А.Р.* Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – М.: Физматлит, 2011. – 419 с.
14. *Gerla M., Yi Y.* Team communications among autonomous sensor swarms // *SIGMOD Record*. – 2004. – Vol. 33. – P. 20–25.
15. *Гайдук А.Р., Плаксиенко В.С., Кабалан А.Э.А.* Синтез систем с учетом ограничений на управление и переменные состояния // *Математические методы в технике и технологиях*. – 2020. – Т. 2. – С. 27–30.
16. *Zhu Y., Su H.-Y., Krstic M.* Adaptive backstepping control of uncertain linear systems under actuator delay // *Automatica*. – 2015. – Vol. 345, N 54. – P. 256–265.
17. *Stojanović S.B., Debeljković D.Lj., Antić D.S.* Finite-time stability and analysis of discrete time-delay systems using discrete convolution of delayed states // *Facta Universitatis. Series: Automatic Control and Robotics*. – 2015. – Vol. 14, N 3. – P. 147–158.
18. Global adaptive stabilization and tracking control for high-order stochastic nonlinear systems with time-varying delays / L. Xue, T. Zhang, W. Zhang, X.-J. Xie // *IEEE Transaction on Automatic Control*. – 2018. – Vol. 63, N 9. – P. 2928–2943.
19. *Xiao F., Shi Y., Ren W.* Robustness analysis of asynchronous sampled-data multiagent networks with time-varying delays // *IEEE Transaction on Automatic Control*. – 2018. – Vol. 63, N 7. – P. 2145–2152.
20. *Zhang D., Shen Y.* Continuous sampled-data observer design for nonlinear systems with time delay larger or smaller than the sampling period // *IEEE Transaction on Automatic Control*. – 2018. – Vol. 62, N 11. – P. 5822–5829.
21. *Имангазиева А.В.* Компенсация возмущений в задаче робастного управления сетью объектов с распределенным и дискретным запаздыванием // *Научный вестник НГТУ*. – 2018. – № 3 (72). – С. 59–72. – DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-59-72.
22. *Джурри Э.И.* Робастность дискретных систем // *Автоматика и телемеханика*. – 1990. – № 1. – С. 3–28.
23. *Гайдук А.Р.* Синтез робастных систем управления с запаздыванием // *Автоматика и телемеханика*. – 1997. – № 5. – С. 90–99.
24. *Furtat I.B., Vrazhevsky S.A., Kremlev A.S.* Robust control algorithm under mismatched disturbances // 9th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT). – Munich, Germany, 2017. – P. 61–66.

25. *Vilanova R., Arrieta O.* Robust PI/PID controllers for load disturbance based on direct synthesis // ISA Transactions. – 2018. – Vol. 81. – P. 177–196.
26. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2004. – 902 с.
27. *Гайдук А.Р., Плаксиенко Е.А.* Анализ и аналитический синтез цифровых систем управления: монография. – СПб.: Лань, 2018. – 272 с.
28. *Гантмахер Ф.Р.* Теория матриц. – 4-е изд., доп. – М.: Наука, 1988. – 549 с.
29. *Гайдук А.Р., Колоколова К.В.* Синтез систем автоматического управления неустойчивыми многомерными объектами // Научный вестник НГТУ. – 2017. – № 1 (66). – С. 26–40. – DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-26-40.

*Гайдук Анатолий Романович*, доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматического управления Южного федерального университета, действительный член Академии инженерных наук имени А.М. Прохорова. Основное направление научных исследований – теория систем автоматического управления и робототехнических комплексов, анализ и синтез. Имеет более 350 научных публикаций, в том числе 19 монографий. E-mail: gaiduk\_2003@mail.ru

*Капустян Сергей Григорьевич*, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Южного научного центра Российской академии наук. Основное направление научных исследований – групповая робототехника, многопроцессорные информационно-управляющие и вычислительные системы. Имеет более 300 научных публикаций, в том числе 5 монографий. E-mail: kap56@mail.ru

*Плаксиенко Владимир Сергеевич*, доктор технических наук, профессор кафедры встраиваемых и радиоприемных систем Южного федерального университета, действительный член Академии инженерных наук имени А.М. Прохорова. Основное направление научных исследований – прием и обработка сигналов. Имеет более 300 научных публикаций, в том числе 3 монографии. E-mail: vsp46@mail.ru

*Кабалан Али Эль Акбар*, аспирант кафедры систем автоматического управления Южного федерального университета. Основное направление научных исследований – теория робототехнических систем. Имеет 3 научные публикации. E-mail: ali.kabalan.92@gmail.com

*Gaiduk Anatoly R.*, D.Sc. (Eng.), professor at the Southern Federal University; full member of the Academy of Engineering Sciences named after A.M. Prokhorov. The main field of his scientific research is the theory of automatic control systems and robotic complexes, analysis and design. He has over 350 scientific publications, including 19 monographs. E-mail: gaiduk\_2003@mail.ru

*Kapustyan Sergey G.*, D.Sc. (Eng.), leading researcher at the Southern scientific center of the Russian Academy of Sciences. The main fields of his scientific research are group robotics, multiprocessor, control-information and computing systems. He has over 300 scientific publications, including 5 monographs. E-mail: kap56@mail.ru

*Plaksienko Vladimir S.*, D.Sc. (Eng.), professor at the Southern Federal University; full member of the Academy of Engineering Sciences named after A.M. Prokhorov. The main field of his scientific research is reception and processing of signals. He has over 300 scientific publications, including 3 monographs.

*Kabalan Ali El A.*, graduate student at the Southern Federal University. The main field of his scientific research is the theory of robotic systems. He has 3 scientific publications. E-mail: ali.kabalan.92@gmail.com.

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-37-56

### ***Control of the UAV group at uncertain delays in communication channels\****

A.R. GAIDUK<sup>1,a</sup>, S.G. KAPUSTYAN<sup>2,b</sup>, V.S. PLAKSIENKO<sup>1,c</sup>, A.E.A. KABALAN<sup>1,d</sup>

<sup>1</sup> Southern Federal University, 44, Nekrasovsky Lane, Taganrog, 347922, Russian Federation

<sup>2</sup> Federal State Budgetary Institution of Science, 41, st. Chehova, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation

<sup>a</sup> gaiduk\_2003@mail.ru <sup>b</sup> kap56@mail.ru <sup>c</sup> vsp46\_2003@mail.ru

<sup>d</sup> ali.kabalan.92@gmail.com

#### **Abstract**

The UAV groups and other unmanned robots are more and more widely used to solve production and special problems in view of their bigger efficiency in comparison with single robots. The efficiency of a group in many respects is defined by the opportunities of the communications means between members of the group and its leader, which influences the efficiency of the decisions made. The control of the UAV group is often exercised by a multivariable control system whose algorithms are implemented by a computer complex of the group UAV leader. The problem here is that in individual channels of information exchanges between the UAV-leader and other UAVs of the group there is a time delay. Any space distributions of the UAV in the neighborhood of the leader cause significantly different, uncertain delays in channels of its contact with the UAV group that can lead to a loss of control stability. It is proposed to apply a multivariable, robust to delay control system to overcome this difficulty. The design of this system is carried out on the basis of the matrix decoupling control and the method of an analytical design of systems with control on output and impact (ADSCOI) taking into account conditions of feasibility of controls on digital computing elements.

Analytical expressions including the solution to the linear system algebraic equations and the creation procedure of the digital control algorithms are found in the article. This control provides robustness of the system to delays in communication channels. The efficiency of the proposed approach is illustrated by a numerical design example of the multivariable group control system of the UAV. The results obtained can be applied to create digital control systems by both single input-single-output and multi-input-multi-output objects with an uncertain delay in agricultural, food, power, machine-building and other industries.

**Keywords:** UAV group, multivariable control system, communication channel, time delay, matrix decoupling control, robustness, control on output and impacts, stability

#### **REFERENCES**

1. Verba V.S., Tatarskii B.G., eds. *Kompleksy s bespilotnymi letatel'nymi apparatami*. V 2 kn. Kn. 1. *Printsipy i osobennosti postroeniya kompleksov s BLA* [Complexes with unmanned aerial vehicles. In 2 bk. Bk. 1. The principles and features of complexes creation with UAV]. Moscow, Radio-tehnika Publ., 2016. 512 p.
2. Morales R.S. de, Freitas E.P. de. Distributed control for groups of unmanned aerial vehicles performing surveillance missions and providing relay communication network services. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2018, no. 92, pp. 645–656.
3. Abramov N.S., Khachumov M.V. Modelirovanie provodki po marshrutu bespilotnogo letatel'nogo apparata kak zadachi presledovaniya tseli [Modeling of wiring along route of unmanned aerial vehicle as problems of purpose prosecution]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie = Aerospace Instrument-Making*, 2013, no. 9, pp. 9–22.

---

\* Received 21 January 2020.

4. Ta Duc A., Fantoni I., Lozano R. Modeling and control of a convertible mini-UAV. *Preprints of the 18th IFAC World Congress*, Milano, Italy, August 28 – September 2, 2011, pp. 1492–1497.
5. Verba V.S., Tatarskii B.G., eds. *Kompleksy s bespilotnymi letatel'nymi apparatami*. V 2 kn. Kn. 2. *Robototekhnicheskie komplekсы na osnove BLA* [Complexes with unmanned aerial vehicles. In 2 bk. Bk. 2. Robotic complexes on UAV basis]. monograph / Under editorship of V.S. Verba, B.G. Tatarsky]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2016. 824 p.
6. Verba V.S., Merkulov V.I., Mikheev V.A. [Optimization of group control of unmanned aerial vehicles as a part of local network]. *XIII Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2019* [XIII All-Russian meeting on problems of control VSPC-2019]. Moscow, ICS RAS Publ., 2019, pp. 279–284.
7. Kapustyan S.G., Gaiduk A.R., Shapovalov I.O. Self-organization in groups of intelligent robots. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015, vol. 345, pp. 171–181.
8. Utkin L.V., Zaborovsky V.S., Popov S.G.: Siamese neural network for intelligent information security control in multi-robot systems. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2017, no. 8 (51), pp. 881–887.
9. Gaiduk A.R., Martjanov O.V., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.K., Hamdan N., Farhood A. Neural network based control system for robots group operating in 2-d uncertain environment. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*, 2020, no. 21 (8), pp. 470–479. DOI: 10.17587/mau.21.470-479.
10. Gaiduk A.R., Kapustyan S.G. Kontseptsiya postroeniya sistem kollektivnogo upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami [Concept of collective control systems creation of unmanned aerial vehicles]. *Sistemy radioupravleniya*. Kn. 4. *Optimizatsiya algoritmov upravleniya* [Systems of radio control. Bk. 4. Optimization of control algorithms]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2018, pp. 39–46.
11. Gaiduk A.R., Kapustyan S.G., Plaksienko E.A., Kolokolova K.V. Mul'tiagentnoe upravlenie mekhanizmom paralel'noi struktury na osnove dekompoziruyushchego podkhoda [Multiagent control by parallel structure mechanisms based on the decoupled approach]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (70), pp. 51–66. DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-51-66.
12. Gaiduk A.R., Dyachenko A.A., Kapustyan S.G., Plaksienko E.A. Algoritmy avtonomnogo gruppovogo upravleniya gorizonta'nymi dvizheniyami BLA [Algorithms of autonomous group control of UAV horizontal motion]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 2 (67), pp. 120–134. DOI: 10.17212/1814-1196-2017-2-120-134.
13. Gaiduk A.R. *Teoriya i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya (polinomial'nyi podkhod)* [Theory and methods of analytical design of automatic control systems (polynomial approach)]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2011. 419 p.
14. Gerla M., Yi Y. Team communications among autonomous sensor swarms. *SIGMOD Record*, 2004, vol. 33, pp. 20–25.
15. Gaiduk A.R., Plaksienko V.S., Kabalan A.E.A. Sintez sistem s uchedom ogranichenii na upravlenie i peremennye sostoyaniya [Systems design with restrictions on control and state variables]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT = Mathematical Methods in Technique and Technologies – MMTT*, 2020, vol. 2, pp. 27–30.
16. Zhu Y., Su H.-Y., Krstic M. Adaptive backstepping control of uncertain linear systems under actuator delay. *Automatica*, 2015, vol. 345, no. 54, pp. 256–265.
17. Stojanović S.B., Debeljković D.Lj., Antić D.S. Finite-time stability and analysis of discrete time-delay systems using discrete convolution of delayed states. *Facta Universitatis. Series: Automatic Control and Robotics*, 2015, vol. 14, no. 3, pp. 147–158.
18. Xue L., Zhang T., Zhang W., Xie X.-J. Global adaptive stabilization and tracking control for high-order stochastic nonlinear systems with time-varying delays. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 2018, vol. 63, no. 9, pp. 2928–2943.
19. Xiao F., Shi Y., Ren W. Robustness analysis of asynchronous sampled-data multiagent networks with time-varying delays. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 2018, vol. 63, no. 7, pp. 2145–2152.
20. Zhang D., Shen Y. Continuous sampled-data observer design for nonlinear systems with time delay larger or smaller than the sampling period. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 2018, vol. 62, no. 11, pp. 5822–5829.
21. Imangazieva A.V. Kompensatsiya vozmushchenii v zadache robustnogo upravleniya set'yu ob'ektov s raspredelennym i diskretnym zapazdyvaniem [Compensation of disturbances in the problem of robust control of a plant network with distributed and discrete delays]. *Nauchnyi vestnik Novo-*

*sibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 59–72. DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-59-72.

22. Dzhuri E.I. Robastnost' diskretnykh sistem [Robustness of discrete systems]. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*, 1990, no. 1, pp. 3–28. (In Russian).

23. Gaiduk A.R. Sintez robastnykh sistem upravleniya s zapazdyvaniem [Design of robust control systems with delay]. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*, 1997, no. 5, pp. 90–99. (In Russian).

24. Furtat I.B., Vrazhevsky S.A., Kremlev A.S. Robust control algorithm under mismatched disturbances. *9th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT)*, Munich, Germany, 2017, pp. 61–66.

25. Vilanova R., Arrieta O. Robust PI/PID controllers for load disturbance based on direct synthesis. *ISA Transactions*, 2018, vol. 81, pp. 177–196.

26. Besekerskii V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control systems]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2004. 902 p.

27. Gaiduk A.R., Plaksienko E.A. *Analiz i analiticheskii sintez tsifrovyykh sistem upravleniya* [Analysis and analytical design of digital control systems]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2018. 272 p.

28. Gantmakher F.R. *Teoriya matrits* [Theory of matrixes]. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, Nauka Publ., 1988. 549 p.

29. Gaiduk A.R., Kolokolova K.V. Sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya neustoichivymi mnogomernymi ob'ektami [Synthesis of control systems by unstable multivariable plants]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 1 (66), pp. 26–40. DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-26-40.

Для цитирования:

Управление группой БЛА при неопределенных запаздываниях в каналах связи / А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян, В.С. Плаксиенко, А.Э.А. Кабалам // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 2–3 (79). – С. 37–56. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-37-56.

For citation:

Gaiduk A.R., Kapustyan S.G., Plaksienko V.S., Kabalan A.E.A. Upravlenie gruppoy BLA pri neopredelennykh zapazdyvaniyakh v kanalakh svyazi [Control of the UAV group at uncertain delays in communication channels]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 2–3 (79), pp. 37–56. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-37-56.



ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,  
COMPPUTER ENGINEERING  
AND CONTROL

UDC 004.93

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-57-76

## Recognition of Russian and Indian sign languages used by the deaf people\*

R. ELAKKIYA<sup>1,a</sup>, M.G. GRIF<sup>2,b</sup>, A.L. PRIKHODKO<sup>2,c</sup>, M.A. BAKAEV<sup>2,d</sup>

<sup>1</sup> 613401, India, Thanjavur, Tamil Nadu, SASTRA Deemed University, PhD, AP-III,  
School of Computing, CSE

<sup>2</sup> 630073, Russian Federation, Novosibirsk, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk State  
Technical University

<sup>a</sup> [elakkiya@cse.sastra.edu](mailto:elakkiya@cse.sastra.edu) <sup>b</sup> [grif@corp.nstu.ru](mailto:grif@corp.nstu.ru) <sup>c</sup> [alexeyayay@yandex.ru](mailto:alexeyayay@yandex.ru)

<sup>d</sup> [bakaev@corp.nstu.ru](mailto:bakaev@corp.nstu.ru)

In our paper, we consider approaches towards the recognition of sign languages used by the deaf people in Russia and India. The structure of the recognition system for individual gestures is proposed based on the identification of its five components: configuration, orientation, localization, movement and non-manual markers. We overview the methods applied for the recognition of both individual gestures and continuous Indian and Russian sign languages. In particular we consider the problem of building corpuses of sign languages, as well as sets of training data (datasets). We note the similarity of certain individual gestures in Russian and Indian sign languages and specify the structure of the local dataset for static gestures of the Russian sign language. For the dataset, 927 video files with static one-handed gestures were collected and converted to JSON using the OpenPose library. After analyzing 21 points of the skeletal model of the right hand, the obtained reliability for the choice of points equal to 0.61, which was found insufficient. It is noted that the recognition of individual gestures and sign speech in general is complicated by the need for accurate tracking of various components of the gestures, which are performed quite quickly and are complicated by overlapping hands and faces. To solve this problem, we further propose an approach related to the development of a biosimilar neural network, which is to process visual information similarly to the human cerebral cortex: identification of lines, construction of edges, detection of movements, identification of geometric shapes, determination of the direction and speed of the objects movement. We are currently testing a biologically similar neural network proposed by A.V. Kugaevskikh on video files from the Russian sign language dataset.

**Keywords:** Russian sign language, Indian sign language, gesture recognition, deaf sign components, artificial neural network, machine learning, training data sets

---

\* Received 15 January 2020.

## INTRODUCTION

Communication and collaboration between deaf-mute people and hearing people is hindered by lack of a common language. Although there has been a lot of research in this domain, there is still room for work towards a system that is ubiquitous, non-invasive, works in real-time and can be trained interactively by the user. Sign Language (SL) serves as a communication medium among the deaf and hard of hearing society. In general, SL is not only used primarily by the deaf and hearing impaired community, but also by the hearing community who are all not able to speak or have some trouble with the spoken language because of some other disabilities (augmentative communication). Also, SL is used by people who can hear, but cannot speak because of other conditions such as the Parkinson's disorder. Sign languages are not international and are not the same all over the world. Currently, there is no clarity about the number of sign languages in use worldwide – each and every country has its native SL, and some countries can have more than one SL too. Some of the sign languages in existence are American Sign Language (ASL), British Sign Language (BSL), Chinese Sign Language (CSL), German Sign Language (DSL), Indian Sign Language (ISL), Russian Sign Language (RSL), etc. Also, some sign languages have obtained a legal recognition whereas the others do not have such recognition worldwide.

The problem of the computer-aided SLs recognition has high social importance, and many researchers around the world work on it. Still, currently it cannot be considered satisfactory resolved, mostly due to a low accuracy of the SL recognition.

### 1. GENERAL OVERVIEW OF THE RUSSIAN AND INDIAN SIGN LANGUAGES USED BY THE DEAF PEOPLE

According to the census released by World Health Organization in 2011 Census, the total population of deaf persons in India numbered about 5 million and the mute persons numbered around 2 million. The Indian Sign Language (ISL) is used in the deaf-mute community all over India. But ISL is not used in schools for deaf children to teach them. Teacher training programs do not orient teachers towards teaching methods that use ISL. There is no teaching material that incorporates a sign language. Parents of deaf children are not aware of the availability of a sign language and its ability to remove communication barriers. ISL interpreters are an urgent requirement at institutes and places where there is communication between the deaf and hearing people but India has only fewer than 300 certified sign language interpreters [1]. There even was an argument that other countries such as Nepal, Sri Lanka, Bangladesh and some border places of Pakistan [2] also use ISL.

Sign language habitually contributes considerable resemblances to their relevant spoken words; however, SL has its own structure and grammar and it varies according to the efficiency and fluency of signing. Although general linguistics consider both signed and spoken languages as different types of the natural language, a sign language should not be considered as a body language just because it is another way of non-linguistic communication. Similarly, ISL also has its own structure, syntax, morphology, phonology and grammatical variations. ISL involves visual conveying of meaning instead of spoken words. This communication

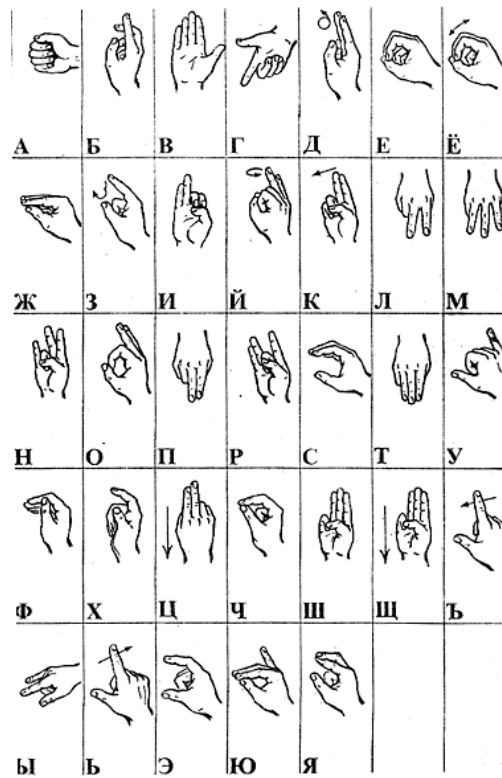
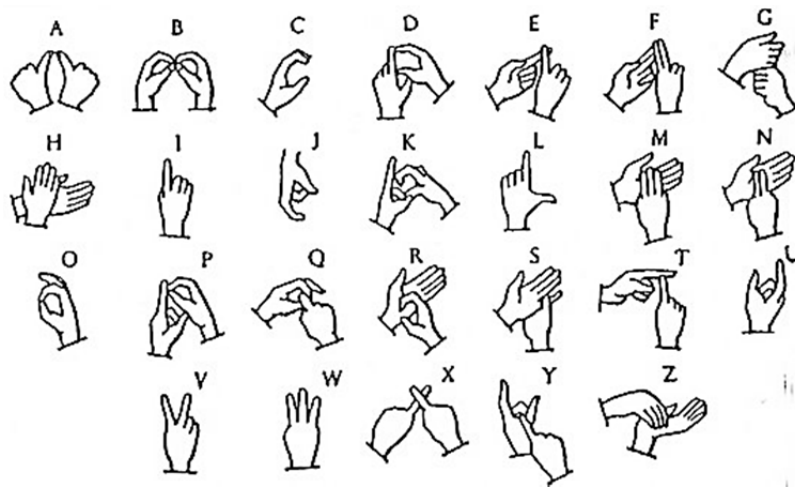


Fig. 1. ISL-alphabets

Рис. 1. ISL-алфавиты

involves a simultaneous combination of both manual and non-manual means of expression. Manual parameters include hand shape, hand position, hand orientation, hand trajectories and arms movements while non-manual parameters include facial expressions, head and body postures, mouth and gaze directions. All these expressions together convey an intended meaning and information of the signer in terms of visual projection. ISL consists of both isolated words [3] and continuous sentences like other sign languages. Fig. 1 represents the ISL alphabets. The offi-

cial ISL dictionary is continuously updated starting from 1,000 words in initial release to 3,000 words in the second release and now with a newer vocabulary of 6,000 words in various categories. Unlike ASL and other SLs, ISL is highly complex because:

- It consists of combination of single and double handed sign gestures and it often consists of more double handed signs even for isolated words.
- When it comes to double handed signs, there is a high chance of overlapping of hands and occlusion of hands over facial expressions.
- Hand positioning with respect to face and body implies different signs at different locations.

In India, it is estimated that more than one million deaf adults and more than half million deaf children use ISL [4]. But still there were certain limitations to develop a dictionary for ISL which arise due to cultural factors and societal impacts. Some of them [2] are:

- In rural parts of India, impairments are ill-treated and signing with gestures is not motivated by people.
- Until the late 1990s, it was believed there was no such a thing as ISL and so the Indian system lacked research into ISL linguistics.
- The non-availability of standardization of the lexicon, syntax and grammar of ISL with documentation and non-availability of ISL automation tools for learning.
- Availability of ISL interpreters is often problematic.

The focus on ISL studies began after 1978 and it was finally accepted countrywide to use ISL. ISL was a language in its own right and a few hundred sign languages are used in cities such as Delhi, Mumbai, Kolkata and Bengaluru [5]. Later, the Ramakrishna Mission Vivekananda University [6] collated signs from across 42 places in the country and released a sign dictionary for 1,600 words. ISL Recognition (ISLR) is a breakthrough for helping impaired (deaf-mute) people and has been researched in recent years. Unfortunately, every reported research has its own limitations and is still unable to be used commercially. Some of the studies achieved certain success in recognizing SL, but required high costs to be commercialized. Nowadays, researchers pay more attention for developing ISLR that can be used commercially. Tracking and recognizing specialized multimodal gesture signs are crucial, especially in recognizing signs and sign gestures.

The Russian Sign Language is utilized by the hearing-impaired people in the Russian Federation – 120,5 thousand users, according to the Census of 2010 – and to some extent in the former Soviet republics. Despite a significant number of users, the RSL has got its official backing just recently, after the amendments to the Federal Law “On the social security for the invalids in the Russian Federation” were signed by President V. Putin at the end of 2012. There, the RSL is defined as “the communication language used in case of hearing and/or speaking impairments, particularly in the context of the oral use of the Russian Federation’s official state language”.

A comprehensive review and the comparison of the dictionaries for the three different variants (dialects) of RSL – the St. Petersburg, Moscow, and Siberian dialects – can be found for example in [7]. At the first stage of their research, continuous sampling was done from the four RSL dictionaries [8–11], so that the signs were extracted and organized alphabetically. The total number of signs in the resulting sample amounted to nearly 13,000 lexical items. At the second stage, they composed a

comparative table of the signs included in the above lexicographic sources, and performed a comparative analysis. The research resulted in the joint list of the signs contained in the covered dictionaries, in total including 6,200 items.

The subsequent analyses of the language material was aimed at identifying the number of the signs that correspond to homonyms and polysemantic words in the Russian language [12], as well as refining the understanding of the performance of the signs corresponding to homonyms [13], of which 54 sign pairs were identified. Unlike the spoken homonyms, the signs are shown differently, but their performance allows accurate communication of the meaning. For the polysemantic words, in total 280 signs were identified, and their particularity is that the different performance of the corresponding signs allows the communication of the meaning without relying on the context. Some signs from this group are imitative, and some have performance which is similar to the non-verbal component that accompanies the corresponding terms in the Russian language.

The particular features of the RSL word-formation system are as follows:

1. The basic units of the word-formation system are chains, paradigms and nests in which motivating and motivated gestures are highlighted, and the motivating words of the Russian speaking language are not always the names of the motivating gestures.

2. The system does not have the means that fully correspond to the word-formation formants of the Russian language. However, this system has its own specific means of forming new gestures. Since the sign language uses visual-kinesthetic channel for transmitting information instead of sounds, the gestures similar to one-root words can be created using a combination of two independent gestures of the RSL, adding special additional gestures (for example, the gesture meaning *man*) to the nominative gesture, repeating an additional gesture, changing the amplitude / intensity of the gesture, its localization, converting a one-handed gesture into a two-handed gesture, using facial expressions and / or turning the body when performing the gesture. The above means are applied systematically, which suggests the existence of original word-formation models in RSL, some of which have analogues in the Russian speaking language.

3. The sign formation techniques in RSL can differ:

– similar performance of the gestures that are cognates from the point of view of word formation of the Russian language, but are not included in word-formation chains;

– identical performance of the gestures whose analogues are cognates in the Russian language;

– dissimilarity in the performance of the gestures, whose names in Russian are cognates.

RSL has gestures similar to the classes of words that are called parts of speech in the Russian-speaking language. In RSL, noun gestures predominate (at least 66 %); while in the 20<sup>th</sup> century there were more adjective gestures. The shares of the verb gestures are almost identical in all available dictionaries (9-11 %), and generally the data on the number of gestures have slight differences similar to numerals, pronouns, adverbs, participles, conjunctions, interjections, prepositions and particles. For instance, the I.F. Geilman dictionary does not contain predicates, while the video dictionary developed by the Social Support Institute of NSTU lacks modal words.

## 2. THE STRUCTURE OF THE SIGN LANGUAGES RECOGNITION SYSTEM

The main objective of the SL Recognition (SLR) system is to recognize a large vocabulary under unrestricted environments which would make the communication between the hearing-impaired community and the normal hearing people easy. SL linguistics is mainly composed of three components; namely manual signals, non-manual signals and finger spelling. Manual signals are made only with hand gestures employing hand shape, position, orientation and motion trajectories, non-manual signals are those made with facial expressions, body postures and head positions which are used as a part of the sign or to modify the meaning of a manual signals, and finger spelling are the gestures which spell out the words as individual letters using local verbal language.

Manual linguistics is the essential component that is required to recognize the sign language. The manual signals are further divided in terms of three major components namely hand shape, hand motion and place of articulation. When considering the manual signals without incorporating the non-manual components, it is treated as a subset of elements of gestural communication. Also, manual signals are highly structured, restricted and more complex concerning the two-handed signs.

Albeit, the manual cue analysis is treated as a part of gesture communication and it needs more personalized methods in case of solving large-vocabulary sign recognition system, or in analyzing the correlation of hands. Many of the existing approaches in SLR focus on hand postures that are static hand shapes ignoring the fact that many sign languages contain signs with motion invariants. When it comes to a large-vocabulary recognition system, it is highly infeasible to recognize all signs only with the help of static postures. Fig. 2 shows various methods of extracting manual signals in SLR systems.

A non-manual signal in SLR plays a vital role in conveying the significant amount of meaningful information in addition to manual signals. The most useful non-manual cues are *Facial Expressions*, *Lip Movements* and *Head Pose Estimation*. The non-manual cue expressions are raising or lowering the eyebrows, eye gaze, head nods and shakes, nose wrinkling, lip movements and different degrees of eye aperture. These cues will manoeuvre as an indicator and provide supplementary information to work as a modulation function involved in adding lexical and semantic properties of signs. Combination of these facial expressions and head pose estimation helps in understanding certain grammatical status which includes question types, negations, 'when' clauses and relative clauses.

## 3. APPROACHES TOWARDS RECOGNITION OF SIGN LANGUAGES

Research in the field of SLR mainly focuses on two dimensions, namely *Isolated Sign Recognition* (SR) and *Continuous Sentence Recognition* (CSR). The isolated word recognition involves recognizing single and double hand static postures that the signer performs to convey information, whereas the continuous recognition involves identifying the sequence of gestures signed by the signer one after the other.

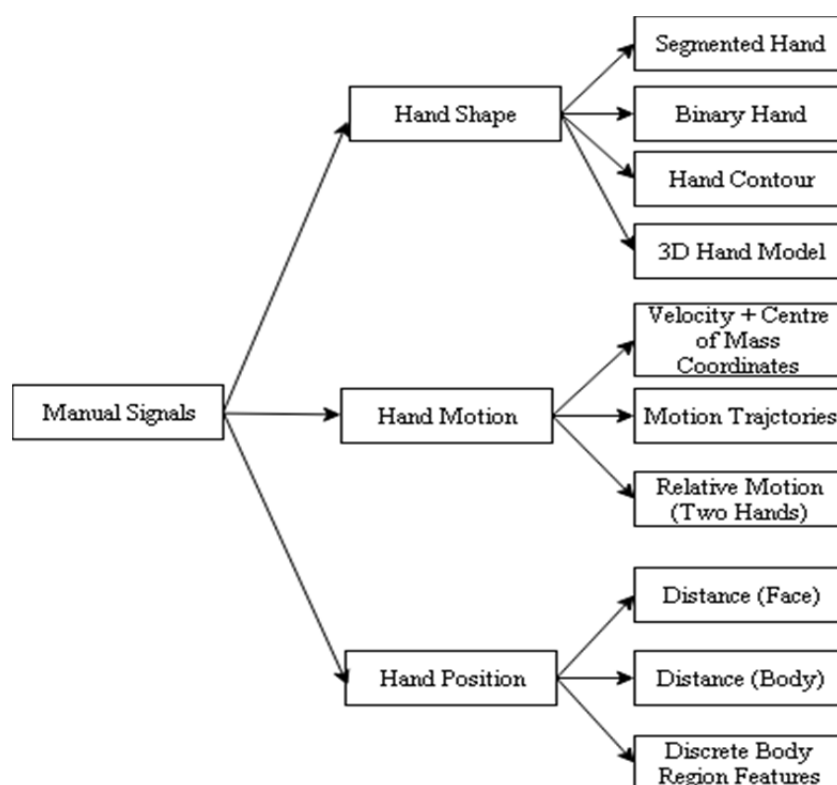


Fig. 2. Extraction of manual signal in SLR

Рис. 2. Распознавание ручного жеста в SLR

Among these two recognition problems, CSR is quite different because in hand gesture recognition it is considered as gesture spotting and in sign language recognition the problem is considered as a co-articulation problem. The co-articulation problem makes recognition more complex because the ascendant sign affects the descendant sign and the transition between the signs i.e. *Epentheses Movements* (EM) ought to be explicitly or implicitly modelled to be integrated into the recognition systems.

ISLR research started with the recognition of ISR and CSR based on the *Device-Based* approaches using sensors and trackers. Albeit these approaches produce accurate results in tracking and pointing the gestures, the signer loses their natural way of signing by being constantly required to wear burdensome devices or trackers on their hands. On the other hand, *Vision-Based* approaches in sign language recognition provide a user-friendly environment for signers. However, this approach also faces several challenges in CSR which are handling occlusion of hands over face, the co-articulation problem, segmenting, detecting hand and finger configuration and modelling the transition movements between the signs. In order to overcome these challenges, many vision-based approaches use different coloured gloves on hands or colour markers for fingers. Despite all these, the marker-free recognition of sign language detection, recognition and classification in cluttered and unrestricted environments is an open research problem.

Let us consider individual signs recognition for the ISL. An ISLR system was proposed by Nandi et al. [14] and recognized 22 ISL signs with an accuracy of

92.29 %. Rekha et al. [15] produced an accuracy of 91.30 % for 26 ISL gestures using 2D computer vision techniques. However, their proposed approach suffered from varying illuminations. Lilha and Shivmurthy [16] developed an ISL recognition system to recognize static and dynamic sign gestures. Their system achieved an accuracy of 98.1 % but a signer would lose the natural way of signing due to the necessity of wearing a wristband to differentiate palm and forearm. Adithya et al. [17] used *Artificial Neural Networks* (ANN) to recognize ISL alphabets and numbers. Their system showed an accuracy of 91.1 % but failed to cope up in the real time environment. Dixit and Jalal [18] proposed an approach to recognize single and double handed ISL gestures of 720 isolated words and attained an accuracy of 96.2 %.

Ananya et al. [4] adapted *Conditional Random Fields* (CRF) to segment the one-handed and two-handed signs of an isolated ISL and got an accuracy of 90 % and 86 % respectively. Sahoo & Ravulakollu [19] designed a recognition system to recognize isolated signs using the *K-Nearest Neighbour* (KNN) and ANN classifier. They have achieved 95 % accuracy for the single-handed signs and 96% for the double-handed signs. Singh et al. [20] decomposed single and double handed features using *Histogram of Gradients* (HOG) and geometric descriptors and classified them using the *Support Vector Machine* (SVM) and ANN. Their system produced an accuracy of 94.23 %. Gangrade et al. The authors [21] recognized ISL numbers from 0 to 9 using a bag of words and achieved an accuracy of 93.26 %. However, all the developed systems recognize only isolated words and include only manual features. It is mandatory for the SLR system to include both manual and non-manual parameters to produce an accurate result.

Let us further consider the actual ISL recognition. Bhuyan et al. [22] introduced a novel method for recognizing transition movements between the continuous signs in trajectory-based gesture recognition. They have used the concept of recognizing co-articulation point between fast and slow frames to separate the transition movements from sign gestures. Li & Greenspan [23] proposed a more efficient gesture segmentation method for continuous gesture recognition of the ISL using continuous dynamic programming and got an accuracy of 95 %. Bhuyan et al. [24] proposed a gesture trajectory model to identify the dynamic gestures and their approach achieved an accuracy of 95 %. Kishore & Kumar [25] designed an ISL system to recognize ISL gestures from videos under different complex backgrounds and achieved an accuracy of 96 % for 351 signs.

Nanivadekar et al. [26] proposed a step algorithm that takes into consideration the motion tracking, pattern recognition and hand tracking. Their system worked on videos of dynamic gestures but they failed to consider the phrases and facial movements. Kishore et al. [27] proposed a 4-Camera model to segment the hand gestures using the features obtained from the elliptical Fourier descriptors and classified them using ANN. The recognition rate of their system was about 92.23 %. Tripathi et al. [28] separated the continuous gestures using the gradient method by calculating the gradient for each frame and overlapping between continuous frames are also checked. Prasad et al. [29] developed the ISLR system with a recognition rate of 92.34 % for the 80 self-collected video sequences consisting of 59 letters and numbers, and 20 words. Athira et al. [28] developed a signer independent ISLR model with finger spelling alphabets and dynamic single-handed signs with a recognition accuracy of 91 % and 89 % respectively.



Let us consider the particulars and of *Vision and Sensor Based Recognition*. Most researchers focused on vision based approaches to recognize the ISL. Rekha et al. [15] used *Wavelet Packet Decomposition* and *Principal Curvature* as *Region Detectors* for recognizing ISL hand postures and produced an accuracy of 93.1 %. Bhuyan & Bora [30] recognized dynamic and static gestures of the ISL with the aid of hand oriented video abstraction technique based on hand shapes, trajectory and hand motion. Agarwal et al. [31] adapted a feature fusion algorithm for recognizing gestures by extracting *Geometric Features*, HOG and *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT) features and achieved an accuracy of 93 %. Joshi et al. [32] considered manual features as essential and the focus is particularly on the boundary of the shape. It is observed that the enhancement is achieved only up to a particular level, therefore the accuracy saturates at higher orders. Kumar et al. [33] analyzed the performance of the combination of different feature vectors and Kaur et al. [34] proposed the ISL recognition system that acquired a high accuracy for a feature vector of size 638. The larger size of feature vector imposes problems in terms of memory space requirement and time to process the feature vector.

Mehrotra et al. [20] recognized 37 ISL signs and attained an accuracy of 86.16 % based on 3D skeleton point features from the Kinect sensor using SVM. Raheja et al. [35] proposed an ISLR system based on depth based information using Kinect and used SVM for classifying the signs. Kumar et al. [36] proposed a multimodal framework using the *Leap Motion Controller* (LMC) and a Kinect sensor for SLR based on classifiers combines both sensors to detect the signs. They have recognized 50 ISL signs and attained an accuracy of 40.23 % for all gestures. Joshi et al. [37] designed a unimodal feature fusion that helps in minimising the feature vector size, as well as enhances performance for all the datasets but fails in recognizing the Indian Sign Language (ISL) complex background dataset. Raghuvvera et al. [38] proposed an ensemble method to recognize ISL single-handed signs, double-handed signs and finger spelling signs of 4,600 images and got an accuracy of 71.85 %. Moreover, all these sensors have their advantages in terms of low cost and drawbacks related to motion data. However, all these methods used sensors to recognize the signs and still addressing epenthesis movements are open challenges.

Let us consider the RSL recognition. The research in this field [39, 40] started with translation of the Russian spoken language into the sign language using differential object marking [41, 42]. Lately, the translation approach has been adjusted together with the RSL recognition using dynamic programming [43] and *Convolutional Neural Networks* (CNN) [44]. However, these methods relied on the Kinect sensor for the recognition of the features [45]. In [46–48] the attempts are made to recognize RSL signs and the non-manual components. The general requirement is that the recognition algorithms must work in real time and recognize the signs as they unfold in the sign space [49].

#### 4. SIGN CORPUS

For the Indian Sign Language, IITA-ROBITA ISL [50] there is one developed by the Indian Institute of Technology Allahabad, with 23 sign gestures signed by one native signer. A vocabulary of 140 symbols [51] created using 18 subjects consisting of 5041 images with most of double-handed gestures and another set of 24 static

hand shapes of ISL [52] are used. A dataset with 3000 images consisting of alphabets, numbers, words and emotions are used to recognize signs in different domains like sports and traffic symbols. However, the datasets cited in the research article are not made available to the public to download as an open source. The same author created a new dataset consisting of 100 sign sentences of ISL signed by two native signers and the preliminary work of pre-processing is going on in the collected data using the methodologies discussed in [53]. It was initially planned to proceed with the classification [54] but based on the state-of-the-art performance of deep learning technologies in today's perception systems of sign recognition, the classification will be done using the *fine tuned Convolutional Neural Networks* and the *Long-Short Term Memory*. Once the pre-processing and classification is conducted, the data will be made available as an open-source for other researchers to make use of it.

Application of the deep learning techniques that currently show their effectiveness in general visual recognition remains problematic for SLs, due to the limited availability of labeled datasets. Compared to speaking languages they are scarce, and for some national sign languages are virtually non-existent. One of the directions of our work involves creation of SL dataset for the Russian language, for which we have already collected 927 video image files with static one-handed signs (Fig. 3). Each gesture is shown by 2-3 different people with 5 repetitions. After converting the video files to JSON using the Open Pose library and analyzing 21 points of the right hand skeletal model, we obtained the point selection confidence of 0.61. So, in Fig. 4 the initial gesture, its markup in Open Pose and estimates of the probability of choosing each of the 21 points of the skeletal model of the finger joints are presented. This accuracy confidence so far remains insufficient to recognize one-handed static gestures, so we are considering other approaches, as described in the current paper.

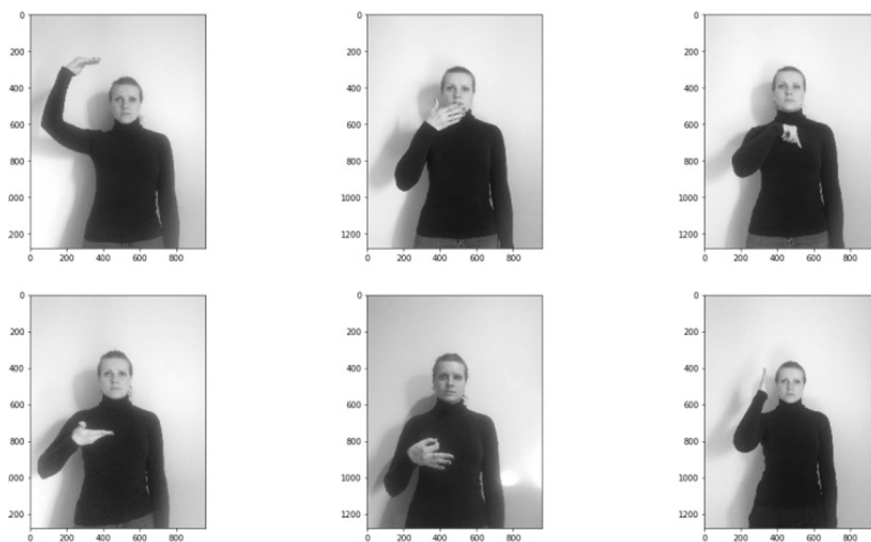


Fig. 3. An extract from the dataset with one-handed signs we are developing for the Russian SL

Рис. 3. Примеры из набора данных с одноручными жестами, которые мы разрабатываем для русского SL

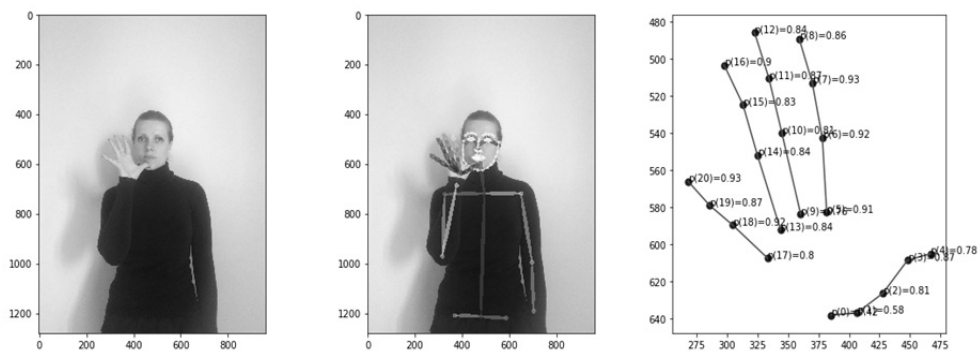


Fig. 4. The procedure of Open Pose detection for assessing the probability (confidence) of choosing 21 points of the skeletal model of finger joints

Рис. 4. Процедура обнаружения OpenPose для оценки вероятности (достоверности) выбора 21 точки скелетной модели суставов пальцев

During the development of the dataset for the Russian language, the similarity of gestures of the Russian sign language and the Indian sign language was revealed. Some of them are presented in Table. 1.

## 5. THE BIO-SIMILAR NEURAL NETWORK APPROACH

The recognition of individual signs and SLs in general is challenging due to the need to perform fine tracking of various sign components that are made rapidly and are further complicated by the overlapping of hands, face, etc. To solve this problem, the approach based on bio-similar neural networks seems particularly promising [55].

The visual cortex in the human brain is responsible for the processing of the visual information [56] and includes 5 zones, whose functioning can be roughly described as follows:

- V1 is the identification of the lines, with the mechanism being functionally similar to the Gabor filter [57];
- V2 is the construction of the edges;
- V3 is the detection of movements;
- V4 is the identification of geometric forms;
- V5 is the detection of the direction and movement speed of the objects.

It should be noted that the numbers above do not reflect the actual order of the signal processing as the zones have both direct and reverse interconnections.

The dorsal and ventral paths for the signals distribution in the cortex are special. The former goes through the V1, V2 and V5 zones being responsible for the spatial judgments and assessments. The latter goes through V1, V2 and V4, and it's considered to be related to the recognition of the form, the comprehension of the object and the long-term memory [58].

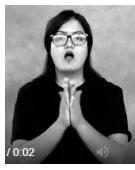
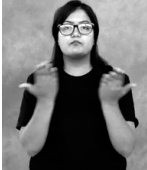




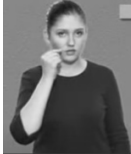
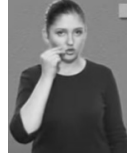












Currently, we perform testing of the network proposed by A.V. Kugaevskikh on the video files of the RSL dataset. The architecture of the network (the model of the neurons) is organized similarly to the visual cortex in the human brain.

Table 1

Таблица 1

## Similar gestures in RSL and ISL

## Похожие жесты в RSL и ISL

Gesture name	ISL		RSL	
	Start of gesture	End of gesture	Start of gesture	End of gesture
Book (Книга)				
Man (Мужчина)				
Internet (Интернет)				
Clean (Школа)				
Child (Низкий)				

## CONCLUSION

In our paper, we overview the available methods for the recognition of both individual signs and sign languages in general. The study has been performed for Indian and Russian sign languages. We have also covered the structure of the individual signs recognition system, which involves five components: the hand shape, orientation, localization, movement and non-manual markers. We also consider the available datasets for the two languages, particularly the static signs of the RSL.

Finally, we briefly describe the novel approach towards prompt and accurate recognition of various sign components based on the bio-similar neural network.

Funding: The reported study was funded by RFBR and DST according to the research project No. 19-57-45006.

## REFERENCES

1. *Indian Sign Language Research and Training Centre (ISLRTC). History.* Available at: <http://www.islrtc.nic.in/history-0> (accessed 13.10.2020).
2. Dasgupta T., Shukla S., Kumar S., Diwakar S., Basu A. A multilingual multimedia Indian sign language dictionary tool. *The 6th Workshop on Asian Language Resources (ALR 6): Proceedings of the Workshop*, Hyderabad, India, 2008, pp. 57–64.
3. *ISL dictionary launch.* Indian Sign Language Research and Training Centre. Available at: <http://www.islrtc.nic.in/isl-dictionary-launch> (accessed 13.10.2020).
4. Tavari N.V., Deorankar A.V., Chatur P.N. Hand gesture recognition of Indian sign language to aid physically impaired people. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2014, Spec. iss. ICIAC, vol. 5, pp. 60–66.
5. Vasishtha M., Woodward J., Santis S. de. An introduction to Indian sign language: (Focus on Delhi). New Delhi, India, All India Fedearation of the Deaf, 1980. 176 p.
6. *Indian sign language dictionary.* Available at: <http://indiansignlanguage.org/dictionary/> (accessed 13.10.2020)
7. Korolkova O.O. Determining the scope of the “Complete Dictionary of Russian Sign Language”. *Sovremennye issledovaniya sotsial'nykh problem = Modern Studies of Social Issues*, 2014, no. 3 (19), pp. 69–74. (In Russian).
8. Video dictionary of Russian sign language. *Institute of Social Rehabilitation of NSTU: website.* Novosibirsk, 2011. (In Russian). Available at: <http://www.nisor.ru/snews/oa/> (accessed 13.10.2020).
9. Geil'man I.F. *Spetsificheskie sredstva obshcheniya glukhikh: daktilologiya i mimika.* Ch. 1–4 [Specific means of deaf communication: dactylology and mimicry. Pt. 1–4]. Leningrad, 1975–1979.
10. Bazoev V.Z. et al. *Slovar' russkogo zhestovogo yazyka* [Dictionary of Russian sign language]. Moscow, Flinta Publ., 2009. 525 p.
11. Fradkina R.N. *Govoryashchie ruki: tematicheskii slovar' zhestovogo yazyka glukhikh Rossii* [Talking hands. Thematic dictionary of sign language for the deaf in Russia]. Moscow, MosgorVOG Publ., 2001. 598 p.
12. Korolkova O.O. Osobnosti omonimii i polisemii v russkom zhestovom yazyke (na materiale videoslovary russkogo zhestovogo yazyka) [Features homonymy and polysemy in russian sign language (based on videodictionary of russian sign language)]. *V mire nauchnykh otkrytii = In the world of scientific discoveries*, 2013, no. 5-1 (41), pp. 169–184.
13. Korolkova O.O. Osobnosti zhestov russkogo zhestovogo yazyka, nazvaniyami kotorykh yavlyayutsya omonimiy russkogo yazyka [Features gestures Russian sign language, the name of which is a homonym Russian language]. *V mire nauchnykh otkrytii = In the world of scientific discoveries*, 2015, no. 7-8 (67), pp. 2931–2942.
14. Tripathi K., Baranwal N., Nandi G.C. Continuous dynamic Indian Sign Language gesture recognition with invariant backgrounds. *2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, Kochi, India, 2015, pp. 2211–2216.
15. Rekha J., Bhattacharya J., Majumder S. Shape, texture and local movement hand gesture features for indian sign language recognition. *3rd International Conference on Trendz in Information Sciences & Computing (TISC2011)*, Chennai, India, 2011, pp. 30–35.
16. Lilha H., Shivmurthy D. Evaluation of features for automated transcription of dual-handed sign language alphabets. *2011 International Conference on Image Information Processing*, Shimla, India, 2011, pp. 1–5.
17. Adithya V., Vinod P.R., Gopalakrishnan U. Artificial neural network based method for Indian sign language recognition. *2013 IEEE Conference on Information & Communication Technologies*, Thuckalay, Tamil Nadu, India, 2013, pp. 1080–1085.

18. Dixit K., Jalal A.S. Automatic Indian sign language recognition system. *2013 3rd IEEE International Advance Computing Conference (IACC)*, Ghaziabad, India, 2013, pp. 883–887.
19. Sahoo A.K., Ravulakollu K.K. Vision based Indian sign language character recognition. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 2014, vol. 67, iss. 3.
20. Singh A., Arora S., Shukla P., Mittal A. Indian Sign Language gesture classification as single or double handed gestures. *2015 Third International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*, Wagnaghat, India, 2015, pp. 378–381.
21. Gangrade J., Bharti J., Mulye A. Recognition of Indian Sign Language using ORB with bag of visual words by Kinect Sensor. *IETE Journal of Research*, 2020, 15 March, pp. 1–5. DOI: 10.1080/03772063.2020.1739569.
22. Bhuyan M.K., Ghosh D., Bora P.K. Continuous hand gesture segmentation and co-articulation detection. *Computer vision, graphics and image processing: 5th Indian conference, ICVGIP 2006*, Madurai, India, December 13–16, 2006: proceedings. Berlin, New York, Springer, 2006, pp. 564–575.
23. Li H., Greenspan M. Segmentation and recognition of continuous gestures. *2007 IEEE International Conference on Image Processing*, 2007, vol. 1, pp. I-365–I-368.
24. Bhuyan M.K., Bora P.K., Ghosh D. Trajectory guided recognition of hand gestures having only global motions. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2008, vol. 2, no. 9, pp. 2012–2023.
25. Kishore P.V., Kumar P.R. Segment, track, extract, recognize and convert sign language videos to voice/text. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2012, vol. 3, no. 6, pp. 35–47.
26. Nanivadekar P.A., Kulkarni V. Indian sign language recognition: database creation, hand tracking and segmentation. *2014 International Conference on Circuits, Systems, Communication and Information Technology Applications (CSCITA)*, Mumbai, India, 2014, pp. 358–363.
27. Kishore P.V., Prasad M.V., Prasad C.R., Rahul R. 4-Camera model for sign language recognition using elliptical fourier descriptors and ANN. *2015 International Conference on Signal Processing and Communication Engineering Systems*, Guntur, India, 2015, pp. 34–38.
28. Athira P.K., Sruthi C.J., Lijiya A. A signer independent sign language recognition with co-articulation elimination from live videos: an Indian scenario. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 2019. DOI: 10.1016/j.jksuci.2019.05.002.
29. Prasad M.V., Kishore P.V., Kumar E.K., Kumar D.A. Indian sign language recognition system using new fusion based edge operator. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 2016, vol. 88 (3), pp. 574–584.
30. Bhuyan M.K., Ghosh D., Bora P.K. A frame work of hand gesture recognition with applications to sign language. *2006 Annual IEEE India Conference*, New Delhi, India, 2006, pp. 1–6.
31. Agrawal S.C., Jalal A.S., Bhatnagar C. Recognition of Indian Sign Language using feature fusion. *2012 4th International Conference on Intelligent Human Computer Interaction (IHCI)*, Kharagpur, India, 2012, pp. 1–5.
32. Joshi G., Vig R., Singh S. Analysis of Zernike moment-based features for sign language recognition. *Intelligent Communication, Control and Devices*. Singapore, Springer, 2018, pp. 1335–1343.
33. Kumar D.A., Sastry A.S., Kishore P.V., Kumar E.K., Kumar M.T. S3DRGF: spatial 3-D relational geometric features for 3-D sign language representation and recognition. *IEEE Signal Processing Letters*, 2019, vol. 26 (1), pp. 169–173.
34. Kaur B., Joshi G., Vig R. Identification of ISL alphabets using discrete orthogonal moments. *Wireless Personal Communications*, 2017, vol. 95 (4), pp. 4823–4845.
35. Raheja J.L., Mishra A., Chaudhary A. Indian Sign Language recognition using SVM 1. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2016, vol. 26 (2), pp. 434–441.
36. Kumar P., Gauba H., Roy P.P., Dogra D.P. A multimodal framework for sensor based sign language recognition. *Neurocomputing*, 2017, vol. 259, pp. 21–38.
37. Joshi G., Vig R., Singh S. DCA-based unimodal feature-level fusion of orthogonal moments for Indian sign language dataset. *IET Computer Vision*, 2018, vol. 12 (5), pp. 570–577.

38. Raghuvеera T., Deepthi R., Mangalashri R., Akshaya R. A depth-based Indian Sign Language recognition using Microsoft Kinect. *Sādhanā*, 2020, vol. 45, no. 1, p. 34.
39. Grif M.G., Prihodko A.L. Approach to the Sign language gesture recognition framework based on HamNoSys analysis. *Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2018): proceedings*, Novosibirsk, 2018, vol. 1, pt. 4, pp. 426–429. DOI: 1109/APEIE.2018.8545086.
40. Grif M.G., Lukoyanychev A.V. Gesture localization in the test mode in the integral system of sign language training. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol.1333, p. 032023.
41. Börstell C. Differential object marking in sign languages. *Glossa: a Journal of General Linguistics*, 2019, vol. 4 (1).
42. Polinsky M. Sign languages in the context of heritage language: a new direction in language research. *Sign Language Studies*, 2018, vol. 18 (3), pp. 412–428.
43. Ryumin D., Karpov A.A. Towards automatic recognition of sign language gestures using kinect 2.0. *International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction*. Cham, Springer, 2017, pp. 89–101.
44. Gruber I., Ryumin D., Hruz M., Karpov A. Sign language numeral gestures recognition using convolutional neural network. *Interactive Collaborative Robotics*. Cham, Springer, 2018, pp. 70–77.
45. Rozaliev V.L. Avtomatizatsiya raspoznavaniya kistei ruk cheloveka s pomoshch'yu Kinect dlya perevoda zhestovogo yazyka [Automated recognition of the hands of the person with Kinect for funds sign language]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2015, no. 6 (163), pp. 74–78.
46. Dorofeev N.S., Rozaliev V.L., Orlova Yu.A., Soloshenko A.N. Raspoznavaniya daktil'nykh zhestov russkogo yazyka glukhikh [Recognition of fingerprints of the deaf Russian language]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2013, no. 14 (117), pp. 42–45.
47. Konstantinov V.M., Orlova Yu.A., Rozaliev V.L. Razrabotka 3D-modeli tela cheloveka s ispol'zovaniem MS Kinect [Development of a 3D model of the human body using MS Kinect]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2015, no. 6 (163), pp. 65–69.
48. Klimov A.S., Rozaliev V.L., Orlova Yu.A. Avtomatizatsiya postroeniya ob'emnoi modeli golovy cheloveka [Automation of the construction of a three-dimensional model of the human head]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2014, no. 25(152), pp. 67–71.
49. Fan N.Kh., Spitsyn V.G. Raspoznavanie formy ruki na videoposledovatel'nosti v rezhime real'nogo vremeni na osnove Surf-deskriptorov i neuronnoi seti [Hand shape recognition on real-time video sequences based on Surf descriptors and a neural network]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy = Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 2012, vol. 17, no. 7, pp. 31–39.
50. IIITA-ROBITA Indian Sign Language Gesture Database. Available at: <https://robita.iita.ac.in/dataset.php> (accessed 14.10.2020).
51. Ansari Z.A., Harit G. Nearest neighbour classification of Indian sign language gestures using Kinect camera. *Sadhana*, 2016, vol. 41 (2), pp. 161–182.
52. Singha J., Das K. Recognition of Indian sign language in live video. *arXiv preprint*, arXiv:1306.1301, 2013.
53. Elakkiya R., Vanitha V. Interactive real time fuzzy class level gesture similarity measure based sign language recognition using artificial neural networks. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2019, vol. 37, no. 5, pp. 6855–6864.
54. Elakkiya R., Selvamani K. Enhanced dynamic programming approach for subunit modeling to handle segmentation and recognition ambiguities in sign language. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2018, vol. 117, pp. 246–255.
55. Kugaevskikh A.V., Sogreshilin A.A. Analyzing the efficiency of segment boundary detection using neural networks. *Optoelectronics Instrumentation and Data Processing*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 414–422. DOI: 10.3103/S8756699019040137.
56. Visual cortex. *Wikipedia*. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Visual\\_cortex](https://en.wikipedia.org/wiki/Visual_cortex) (accessed 14.10.2020).

57. Jones J.P., Palmer L.A. An evaluation of the two-dimensional Gabor filter model of simple receptive fields in cat striate cortex. *Journal of Neurophysiology*, 1987, vol. 58(6), pp. 1233–1258.

58. Two-streams hypothesis. *Wikipedia*. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Two-streams\\_hypothesis](https://en.wikipedia.org/wiki/Two-streams_hypothesis) (accessed 14.10.2020).

*Elakkiya R.*, AP-III, School of Computing, CSE, SASTRA Deemed University, India. His research interests include methods for recognizing sign languages of the deaf. He has published more than 30 scientific and educational works. E-mail: [elakkiya@cse.sastra.edu](mailto:elakkiya@cse.sastra.edu)

*Grif Mikhail G.*, professor at the Department of Automated Control Systems, Faculty Automation and Computer Engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests: design of complex systems and computer sign language translation systems. He has published more than 300 scientific and educational works. E-mail: [grif@corp.nstu.nstu.ru](mailto:grif@corp.nstu.nstu.ru)

*Prikhodko Alexey L.*, junior researcher at the Department of Automated Control Systems, Faculty of Automation and Computer Engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests include methods for recognizing sign languages of the deaf. He has published 15 scientific papers. E-mail: [alexeyayay@yandex.ru](mailto:alexeyayay@yandex.ru)

*Bakaev Maxim A.*, associate professor at the Department of Automated Control Systems, Faculty of Automation and Computer Engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests include human-computer interaction, interface design, machine learning. He has over 100 publications. E-mail: [bakaev@corp.nstu.ru](mailto:bakaev@corp.nstu.ru)

*Элаккия Р.*, AP-III, Школа компьютерных технологий, CSE, Университет SASTRA Deemed, Индия. Научные интересы – методы распознавания жестовых языков глухих. Опубликовано более 30 научных и учебных работ. E-mail: [elakkiya@cse.sastra.edu](mailto:elakkiya@cse.sastra.edu)

*Гриф Михаил Геннадьевич*, профессор кафедры автоматизированных систем управления факультета автоматки и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Сфера научных интересов – проектирование сложных систем и систем компьютерного перевода на язык жестов. Опубликовано более 300 научных и учебных работ. E-mail: [grif@corp.nstu.nstu.ru](mailto:grif@corp.nstu.nstu.ru)

*Приходько Алексей Леонидович*, младший научный сотрудник кафедры автоматизированных систем управления факультета автоматки и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Научные интересы – методы распознавания жестовых языков глухих. Опубликовано 15 научных работ. E-mail: [alexeyayay@yandex.ru](mailto:alexeyayay@yandex.ru)

*Бакаев Максим Александрович*, доцент кафедры автоматизированных систем управления факультета автоматки и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Научные интересы: взаимодействие человека с компьютером, дизайн интерфейса, машинное обучение. Имеет более 100 публикаций. E-mail: [bakaev@corp.nstu.ru](mailto:bakaev@corp.nstu.ru)



DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-57-76

**Распознавание русского и индийского языков жестов глухих\***Р. ЭЛАККИЯ<sup>1,a</sup>, М.Г. ГРИФ<sup>2,b</sup>, А.Л. ПРИХОДЬКО<sup>2,c</sup>, М.А. БАКАЕВ<sup>2,d</sup><sup>1</sup> 613401, Индия, Танджавур, Тамил Наду, Университет SASTRA, PhD, AP-III, Школа компьютерных технологий, CSE<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет<sup>a</sup> elakkiya@cse.sastra.edu   <sup>b</sup> grif@corp.nstu.ru   <sup>c</sup> alexeyayay@yandex.ru<sup>d</sup> bakaev@corp.nstu.ru**Аннотация**

Рассматриваются подходы к распознаванию жестовых языков глухих на примере русского и индийского жестовых языков. Предлагается структура системы распознавания отдельных жестов на основе выявления пяти его компонент – конфигурации, ориентации, локализации, движения и немануальных маркеров. Приведен анализ применяемых методов распознавания отдельных жестов и непрерывной жестовой речи для индийского и русского языков жестов. Рассматривается проблема построения корпусов жестовых языков, а также наборов обучающих данных (Датасет). Отмечается сходство отдельных жестов русского и индийского жестовых языков. Приводится структура локального Датасет для статичных жестов русского жестового языка. Было собрано 927 файлов видеоизображений со статическими одноручными жестами. После преобразования видеофайлов в формат JSON с использованием библиотеки OpenPose и анализа 21 точек скелетной модели правой руки была получена достоверность выбора точек 0,61. Делается вывод, что эта достоверность является недостаточной. Отмечается, что распознавание отдельных жестов глухих и жестовой речи в целом осложнено необходимостью точного отслеживания различных компонентов жестов, которые выполняются достаточно быстро и осложнены перекрытием рук, лица. Для решения этой задачи предлагается подход, связанный с разработкой биологически подобной нейронной сети. Моделируемая нейронная сеть должна проводить обработку визуальной информации аналогично коре головного мозга человека: идентификация линий, построение ребер, обнаружение движений, идентификация геометрических форм, определение направления и скорости движения объектов. В настоящее время мы проводим тестирование биологически подобной нейронной сети, предложенной А.В. Кугаевских, на видеофайлах обучающих данных русского жестового языка.

**Ключевые слова:** русский жестовый язык, индийский жестовый язык, распознавание жестов, компоненты жестов глухих, искусственная нейронная сеть, машинное обучение, наборы обучающих данных

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Indian Sign Language Research and Training Centre (ISLRTC). History. – URL: <http://www.islrtc.nic.in/history-0> (accessed: 13.10.2020).
2. A multilingual multimedia Indian sign language dictionary tool / T. Dasgupta, S. Shukla, S. Kumar, S. Diwakar, A. Basu // The 6th Workshop on Asian Language Resources (ALR 6): Proceedings of the Workshop. – Hyderabad, India, 2008. – P. 57–64.
3. ISL dictionary launch / Indian Sign Language Research and Training Centre. – URL: <http://www.islrtc.nic.in/isl-dictionary-launch> (accessed: 13.10.2020). – Пер. загл.: Запуск словаря ISL.

---

\* Статья получена 15 января 2020 г.

4. *Tavari N.V., Deorankar A.V., Chatur P.N.* Hand gesture recognition of Indian sign language to aid physically impaired people // *International Journal of Engineering Research and Applications.* – 2014. – Spec. iss. ICIAC, vol. 5. – P. 60–66.
5. *Vasishta M., Woodward J., Santis S. de.* An introduction to Indian sign language: (Focus on Delhi). – New Delhi, India: All India Federation of the Deaf, 1980. – 176 p.
6. Indian sign language dictionary. – URL: <http://indiansignlanguage.org/dictionary/> (accessed: 13.10.2020). – Пер. загл.: Словарь индийского языка жестов.
7. *Королькова О.О.* Определение объема «Полного словаря русского языка жестов» // *Современные исследования социальных проблем.* – 2014. – № 3 (19). – С. 69–74.
8. Видео словарь русского языка жестов // Институт социальной реабилитации НГТУ: сайт. – Новосибирск, 2011. – URL: <http://www.nisor.ru/snews/oa-/> (дата обращения: 13.10.2020).
9. *Гейльман И.Ф.* Специфические средства общения глухих: дактилология и мимика: в 4 ч. – Л.: ВОГ, 1975–1979. – 4 ч.
10. Словарь русского жестового языка / В.З. Базоев и др. – М.: Флинта, 2009. – 525 с.
11. *Фрадкина П.Н.* Говорящие руки: тематический словарь жестового языка глухих России. – М.: МосгорВОГ, 2001. – 598 с.
12. *Королькова О.О.* Особенности омонимии и полисемии в русском жестовом языке (на материале видеословаря русского жестового языка) // *В мире научных открытий.* – 2013. – № 5-1 (41). – С. 169–184.
13. *Королькова О.О.* Особенности жестов русского жестового языка, названиями которых являются омонимы русского языка // *В мире научных открытий.* – 2015. – № 7-8 (67). – С. 2931–2942.
14. *Tripathi K., Baranwal N, Nandi GC.* Continuous dynamic Indian Sign Language gesture recognition with invariant backgrounds // 2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). – Kochi, India, 2015. – P. 2211–2216.
15. *Rekha J., Bhattacharya J., Majumder S.* Shape, texture and local movement hand gesture features for Indian sign language recognition // 3rd International Conference on Trends in Information Sciences & Computing (TISC 2011). – Chennai, India, 2011. – P. 30–35.
16. *Lilha H., Shivmurthy D.* Evaluation of features for automated transcription of dual-handed sign language alphabets // 2011 International Conference on Image Information Processing. – Shimla, India, 2011. – P. 1–5.
17. *Adithya V., Vinod P.R., Gopalakrishnan U.* Artificial neural network based method for Indian sign language recognition // 2013 IEEE Conference on Information & Communication Technologies. – Thuckalay, Tamil Nadu, India, 2013. – P. 1080–1085.
18. *Dixit K., Jalal A.S.* Automatic Indian sign language recognition system // 2013 3rd IEEE International Advance Computing Conference (IACC). – Ghaziabad, India, 2013. – P. 883–887.
19. *Sahoo A.K., Ravulakollu K.K.* Vision based Indian sign language character recognition // *Journal of Theoretical & Applied Information Technology.* – 2014. – Vol. 67, iss. 3.
20. Indian Sign Language gesture classification as single or double handed gestures / A. Singh, S. Arora, P. Shukla, A. Mittal // 2015 Third International Conference on Image Information Processing (ICIIP). – Wanknaghat, India, 2015. – P. 378–381.
21. *Gangrade J., Bharti J., Mulye A.* Recognition of Indian Sign Language using ORB with bag of visual words by Kinect Sensor // *IETE Journal of Research.* – 2020. – 15 March. – P. 1–5. – DOI: 10.1080/03772063.2020.1739569.
22. *Bhuyan M.K., Ghosh D., Bora P.K.* Continuous hand gesture segmentation and co-articulation detection // *Computer vision, graphics and image processing: 5th Indian conference, ICVGIP 2006, Madurai, India, December 13–16, 2006: proceedings.* – Berlin; New York: Springer, 2006. – P. 564–575.
23. *Li H., Greenspan M.* Segmentation and recognition of continuous gestures // 2007 IEEE International Conference on Image Processing. – 2007. – Vol. 1. – P. I-365–I-368.
24. *Bhuyan M.K., Bora P.K., Ghosh D.* Trajectory guided recognition of hand gestures having only global motions // *World Academy of Science, Engineering and Technology.* – 2008. – Vol. 2, N 9. – P.2012–2023.
25. *Kishore P.V., Kumar P.R.* Segment, track, extract, recognize and convert sign language videos to voice/text // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications.* – 2012. – Vol. 3, N 6. – P. 35–47.

26. Nanivadekar P.A., Kulkarni V. Indian sign language recognition: database creation, hand tracking and segmentation // 2014 International Conference on Circuits, Systems, Communication and Information Technology Applications (CSCITA). – Mumbai, India, 2014. – P. 358–363.
27. 4-Camera model for sign language recognition using elliptical Fourier descriptors and ANN / P.V. Kishore, M.V. Prasad, C.R. Prasad, R. Rahul // 2015 International Conference on Signal Processing and Communication Engineering Systems. – Guntur, India, 2015. – P. 34–38.
28. Athira P.K., Sruthi C.J., Lijiya A. A signer independent sign language recognition with co-articulation elimination from live videos: an Indian scenario // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. – 2019. – DOI: 10.1016/j.jksuci.2019.05.002.
29. Indian sign language recognition system using new fusion based edge operator / M.V. Prasad, P.V. Kishore, E.K. Kumar, D.A. Kumar // Journal of Theoretical & Applied Information Technology. – 2016. – Vol. 88 (3). – P. 574–584.
30. Bhuyan M.K., Ghosh D., Bora P.K. A frame work of hand gesture recognition with applications to sign language // 2006 Annual IEEE India Conference. – New Delhi, India, 2006. – P. 1–6.
31. Agrawal S.C., Jalal A.S., Bhatnagar C. Recognition of Indian Sign Language using feature fusion // 2012 4th International Conference on Intelligent Human Computer Interaction (IHCI). – Kharagpur, India, 2012. – P. 1–5.
32. Joshi G., Vig R., Singh S. Analysis of Zernike moment-based features for sign language recognition // Intelligent Communication, Control and Devices. – Singapore: Springer, 2018. – P. 1335–1343.
33. S3DRGF: spatial 3-D relational geometric features for 3-D sign language representation and recognition / D.A. Kumar, A.S. Sastry, P.V. Kishore, E.K. Kumar, M.T. Kumar // IEEE Signal Processing Letters. – 2019. – Vol. 26 (1). – P. 169–173.
34. Kaur B., Joshi G., Vig R. Identification of ISL alphabets using discrete orthogonal moments // Wireless Personal Communications. – 2017. – Vol. 95 (4). – P. 4823–4845.
35. Raheja J.L., Mishra A., Chaudhary A. Indian Sign Language recognition using SVM 1 // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2016. – Vol. 26 (2). – P. 434–441.
36. A multimodal framework for sensor based sign language recognition / P. Kumar, H. Gauba, P.P. Roy, D.P. Dogra // Neurocomputing. – 2017. – Vol. 259. – P. 21–38.
37. Joshi G., Vig R., Singh S. DCA-based unimodal feature-level fusion of orthogonal moments for Indian sign language dataset // IET Computer Vision. – 2018. – Vol. 12 (5). – P. 570–577.
38. A depth-based Indian Sign Language recognition using Microsoft Kinect / T. Raghuvvera, R. Deepthi, R. Mangalashri, R. Akshaya // Sādhanā. – 2020. – Vol. 45, N 1. – P. 34.
39. Grif M.G., Prihodko A.L. Approach to the Sign language gesture recognition framework based on HamNoSys analysis // Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2018): proceedings. – Novosibirsk, 2018. – Vol. 1, pt. 4. – P. 426–429. – DOI: 1109/APEIE.2018.8545086.
40. Grif M.G., Lukoyanychev A.V. Gesture localization in the test mode in the integral system of sign language training // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1333. – P. 032023.
41. Börstell C. Differential object marking in sign languages // Glossa: a Journal of General Linguistics. – 2019. – Vol. 4 (1).
42. Polinsky M. Sign languages in the context of heritage language: a new direction in language research // Sign Language Studies. – 2018. – Vol. 18 (3). – P. 412–428.
43. Ryumin D., Karpov A.A. Towards automatic recognition of sign language gestures using kinect 2.0 // International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction. – Cham: Springer, 2017. – P. 89–101.
44. Sign language numeral gestures recognition using convolutional neural network / I. Gruber, D. Ryumin, M. Hruz, A. Karpov // Interactive Collaborative Robotics. – Cham: Springer, 2018. – P. 70–77.
45. Розалиев В.Л. Автоматизация распознавания кистей рук человека с помощью Kinect для перевода жестового языка // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2015. – № 6 (163). – С. 74–78.
46. Распознавания дактильных жестов русского языка глухих / Н.С. Дорофеев, В.Л. Розалиев, Ю.А. Орлова, А.Н. Солошенко // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2013. – № 14 (117). – С. 42–45.

47. Константинов В.М., Орлова Ю.А., Розалиев В.Л. Разработка 3D-модели тела человека с использованием MS Kinect // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2015. – № 6 (163). – С. 65–69.

48. Климов А.С., Розалиев В.Л., Орлова Ю.А. Автоматизация построения объемной модели головы человека // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2014. – № 25 (152). – С. 67–71.

49. Фан Н.Х., Спицын В.Г. Распознавание формы руки на видеопоследовательности в режиме реального времени на основе Surf-дескрипторов и нейронной сети // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2012. – Т. 17, № 7. – С. 31–39.

50. IITB-ROBITA Indian Sign Language Gesture Database. – URL: <https://robita.iiita.ac.in/dataset.php> (accessed: 14.10.2020).

51. Ansari Z.A., Harit G. Nearest neighbour classification of Indian sign language gestures using Kinect camera // Sadhana. – 2016. – Vol. 41 (2). – P. 161–182.

52. Singha J., Das K. Recognition of Indian sign language in live video // arXiv preprint. – arXiv:1306.1301, 2013.

53. Elakkiya R., Vanitha V. Interactive real time fuzzy class level gesture similarity measure based sign language recognition using artificial neural networks // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 2019. – Vol. 37, N 5. – P. 6855–6864.

54. Elakkiya R., Selvamani K. Enhanced dynamic programming approach for subunit modelling to handle segmentation and recognition ambiguities in sign language // Journal of Parallel and Distributed Computing. – 2018. – Vol. 117. – P. 246–255.

55. Kugaevskikh A.V., Sogreshilin A.A. Analyzing the efficiency of segment boundary detection using neural networks // Optoelectronics Instrumentation and Data Processing. – 2019. – Vol. 55, N 4. – P. 414–422. – DOI: 10.3103/S8756699019040137.

56. Visual cortex // Wikipedia. – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Visual\\_cortex](https://en.wikipedia.org/wiki/Visual_cortex) (accessed: 14.10.2020).

57. Jones J.P., Palmer L.A. An evaluation of the two-dimensional Gabor filter model of simple receptive fields in cat striate cortex // Journal of Neurophysiology. – 1987. – Vol. 58 (6). – P. 1233–1258.

58. Two-streams hypothesis // Wikipedia. – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Two-streams\\_hypothesis](https://en.wikipedia.org/wiki/Two-streams_hypothesis) (accessed: 14.10.2020).

Для цитирования:

Распознавание русского и индийского языков жестов глухих / Р. Элаккия, М.Г. Гриф, А.Л. Приходько, М.А. Бакаев // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 2–3 (79). – С. 57–76. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-57-76. – Текст англ.

For citation:

Elakkiya R., Grif M.G., Prikhodko A.L., Bakaev M.A. Recognition of Russian and Indian sign languages used by the deaf people. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 2–3 (79), pp. 57–76. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-57-76.

ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,  
COMPPUTER ENGINEERING  
AND CONTROL

УДК 004.82

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-77-94

## **Имитационная модель управления оперативно-выездными бригадами электросетевой компании\***

**А.Р. КИНЖАЛИЕВА<sup>а</sup>, А.А. ХАНОВА<sup>б</sup>**

414056, РФ, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Астраханский государственный технический университет

<sup>а</sup> [satobalova@mail.ru](mailto:satobalova@mail.ru)    <sup>б</sup> [akhanova@mail.ru](mailto:akhanova@mail.ru)

Отсутствие необходимого объема инвестиций в электросетевой комплекс за последние 20 лет привело к значительному физическому и технологическому устареванию электрических сетей. В связи с этим задача обеспечения надежности оказания услуг электросетевыми компаниями при минимальном уровне затрат является актуальной. Реализация указанной задачи во многом зависит от сокращения продолжительности перерыва электроснабжения потребителей, что может быть достигнуто путем совершенствования процесса управления дежурным персоналом оперативно-выездных бригад при возникновении аварий и технологических нарушений. При этом современные электросетевые компании ориентированы на минимальные экономически обоснованные затраты и нацелены на повышение эффективности финансово-хозяйственной деятельности за счет рационального использования ресурсов. Предложена структура имитационной модели управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений в электросетевой компании на среднем уровне абстракции системы. Имитационная модель включает агентную модель, модель системной динамики, компонент геоинформационной системы и модули с экспериментами. Формализовано описание имитационной модели управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений, выделена входная и выходная информация по компонентам модели, структурирована информация, описывающая агентную модель, построена схема модели системной динамики. Проведена проверка адекватности имитационной модели на примере статистических данных компании ПАО «Ленэнерго». Разработаны схемы экспериментов для имитационной модели управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений с целью определения наилучших показателей надежности и затрат.

Разработанный подход может применяться для создания многоподходных имитационных моделей управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений для различных электросетевых компаний путем подбора параметров

---

\* Статья получена 26 декабря 2019 г.

моделей по данным статистической отчетности электросетевых компаний и подключения соответствующих модулей ГИС.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, агентная модель, системная динамика, надежность, электросетевая компания, управление, оперативно-выездные бригады, затраты

## ВВЕДЕНИЕ

Производственные активы электросетевых компаний России обновляются всего на 5...10 % от необходимого по причине недостатка инвестиций в электросетевую комплекс страны, при этом 69 % активов выработали ресурс, а более 80 % нуждается в перевооружении [1]. Такая ситуация приводит к снижению надежности электроснабжения потребителей: перерывы составляют до 70 ч в год на один фидер, среднее число повреждений – 30 на 100 км [1]. В связи с этим обеспечение надежного энергоснабжения потребителей является одним из ключевых стратегических приоритетов электросетевых компаний России, ее достижение оценивается уровнем надежности оказываемых услуг [2] (рис. 1, I). На показатель надежности производственных активов электросетевых компаний непосредственно влияет средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей [3]. В связи с этим актуальной является задача поиска путей снижения средней продолжительности перерывов передачи электроэнергии [4].

Решать эту задачу, с одной стороны, можно предотвращением перерывов электроснабжения потребителей путем вложения средств в элементную надежность электрических сетей за счет использования новых технических решений и устройств [5–8], внедрения современных методов управления [9–11], привлечения квалифицированного персонала [12, 13] (рис. 1, II). В настоящее время реализация инвестиционных программ электросетевых компаний направлена главным образом как раз на замену устаревшего аварийного оборудования.

С другой стороны, вложение средств можно осуществить в интеллектуализацию электрической сети и тем самым повысить эффективность работы оперативно-выездных бригад (ОВД) при возникновении аварий и технологических нарушений, определить необходимое и достаточное количество ресурсов (в том числе трудовых) и сократить зону распространения повреждений [14, 15] (рис. 1, II). В работах российских и зарубежных авторов описано применение методов искусственного интеллекта для оптимизации ремонтных работ и управления ими [16, 17], определения места повреждения линий электропередачи, диагностики систем и прогнозирования надежности на основе нейронных сетей [18–20], теории нечетких множеств для оценки рисков [21, 22]. Онтологический инжиниринг систем ситуационного управления, поддержки принятия решений в области электроэнергетики рассмотрен в работах [23, 24]. Значительное число работ посвящено анализу надежности систем электроснабжения на основе имитационного моделирования [25–27]. Это обусловлено тем, что процесс управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений является сложным, с огромным, практически необозримым числом возможных ситуаций и состояний, в которых при реализации задачи снижения продолжительности перерывов передачи электроэнергии происходит процесс обслуживания потока заявок на ремонт,

распределения материальных ресурсов и формирования оперативно-выездных бригад [27]. При этом стохастический характер возникновения аварийных ситуаций, на который влияют особенности работы оперативно-выездных бригад, и распределения материально-технических ресурсов подразумевает целесообразность выбора метода многоподходного имитационного моделирования в качестве инструмента исследования [28].

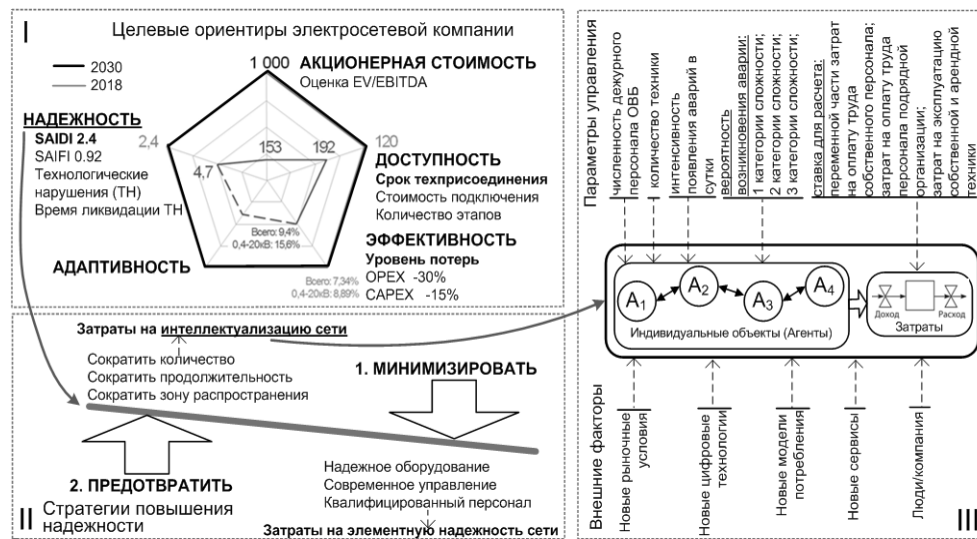


Рис. 1. Соотношение целевых ориентиров, стратегий повышения надежности и системы управления ОБВ при возникновении аварий и технологических нарушений в электросетевой компании

Fig. 1. Correlation of targets, strategies for increasing the reliability and the AES management system in the event of accidents and technological disturbances in the power grid company

Основной задачей работы является разработка имитационной модели управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений, позволяющей моделировать ситуации достижения желаемого уровня надежности оказываемых услуг электросетевых компаний.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Процесс управления оперативно-выездными бригадами выполняется в соответствии с регламентом выполнения действий при возникновении аварий и технологических нарушений, в котором закреплен следующий порядок. В случае получения оповещения о возникновении аварии специалист Центра управления сетями (ЦУС) определяет категорию сложности аварии, затем определяет достаточность численности дежурного персонала на базе расположения ОБВ. Исходя из этого специалист ЦУС формирует бригаду и обеспечивает ее техникой. Численный состав бригады зависит от категории сложности аварии и предполагаемого времени ее устранения, количество техники зависит от численного состава бригады (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

**Численный состав ОВБ и количество техники, комплектуемые при возникновении аварий****The team size of ATS and the number of technological units completed in the event of accidents**

Категория сложности аварии	Состав бригады, чел.	Количество техники, ед.	Время устранения аварии, ч
1	25	5	3,3 ± 0,2
	21	5	3,8 ± 0,2
	17	4	4,3 ± 0,2
2	15	3	2,6 ± 0,2
	13	3	2,9 ± 0,2
	10	2	3,2 ± 0,2
3	7	2	1,4 ± 0,2
	5	1	1,7 ± 0,2
	3	1	2,0 ± 0,2

В случае недостаточности численности собственного дежурного персонала на место возникновения аварии направляется весь имеющийся на базе расположения ОВБ резерв, а также привлекается подрядная организация для доукомплектования ОВБ до минимального состава. При необходимости (когда весь собственный персонал задействован на аварийно-восстановительных работах) привлекается подрядная организация, в таких случаях задействуется минимальный состав бригады подрядной организации. Учитывая то, что труд рабочих подрядной организации для предприятия может обходиться значительно дороже, затраты на содержание штатного персонала соизмеряются с затратами на оплату труда привлеченного персонала.

Для определения повышения уровня надежности электроснабжения, в том числе за счет снижения продолжительности отключений электроэнергии, используются международный показатель SAIDI (System Average Interruption Duration Index) [13] – эквивалентная продолжительность перерывов в электроснабжении на одного потребителя, показывает среднее время отключения одного потребителя в системе электроснабжения и рассчитывается по формуле

$$\text{SAIDI} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i N_i}{N_t}, \quad (1)$$

где  $N_i$  – количество потребителей в системе, в которой произошел  $i$ -й перерыв в электроснабжении,  $i = \overline{1, n}$ ;  $r_i$  – время  $i$ -го перерыва в часах,  $i = \overline{1, n}$ ;



$N_t$  – общее количество потребителей в системе. В концепции «Цифровая трансформация 2030» [2] компанией Россети задано снижение целевого значения показателя SAIDI с 4,7 до 2,4 к 2030 году (см. рис. 1, I).

Предлагается построить имитационную модель процесса управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений в электросетевых компаниях, которая будет учитывать показатель  $r_i$ , непосредственно влияющий на показатель SAIDI, и которая предназначена для определения:

1) минимального значения «Средняя продолжительность перерыва электроснабжения»  $\bar{r}$ ;

2) достаточной численности дежурного персонала  $A'$  ОББ и количества техники  $B'$ , задействованных при устранении аварий и технологических нарушений;

3) минимального значения суммы затрат  $Z$ , связанных с оплатой труда как собственного, так и привлеченного персонала, а также затрат, связанных с эксплуатацией и арендой техники, задействованных при устранении аварий и технологических нарушений.

Рассматриваемый процесс предполагает множество индивидуальных объектов (ОББ, ЦУС, трансформаторные подстанции (ТС)) и их взаимосвязь, поэтому основная часть имитационной модели будет построена на основе агентного подхода (см. рис. 1, III). При использовании агентного метода выбран средний уровень абстракции: в обработку включаются только значимые факторы (порядок формирования ОББ и комплектования техникой, время устранения аварии и т. д.), а такие факторы, как материалы, используемые при аварийно-восстановительных работах, время следования к месту возникновения аварии и т. п., не включаются. Учитывая сложность рассматриваемого процесса, для построения отдельных частей системы будет использован системно-динамический подход [28].

Рассмотрим структуру многоподходной имитационной модели процесса управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий в электросетевых компаниях.

## 2. СТРУКТУРА И ЛОГИКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Разрабатываемая модель должна имитировать процесс управления ОББ при возникновении аварий. Имитационная модель включает в себя модуль системной динамики расчета затрат, агентную модель управления ОББ при возникновении аварий, модуль анимации в виде ГИС-карты, на которой ГИС-точками отмечены энергообъекты, а также модуль с экспериментами (рис. 2). В качестве среды разработки выбран пакет имитационного моделирования Anylogic.

Для моделирования процесса возникновения аварий выбран пуассоновский закон распределения вероятностей с интенсивностью  $N$  аварий в сутки. С вероятностью  $P_1$  моделируется возникновение аварий первой категории сложности, с вероятностью  $P_2$  – аварий второй категории сложности, с вероятностью  $P_3$  – аварий третьей категории сложности.

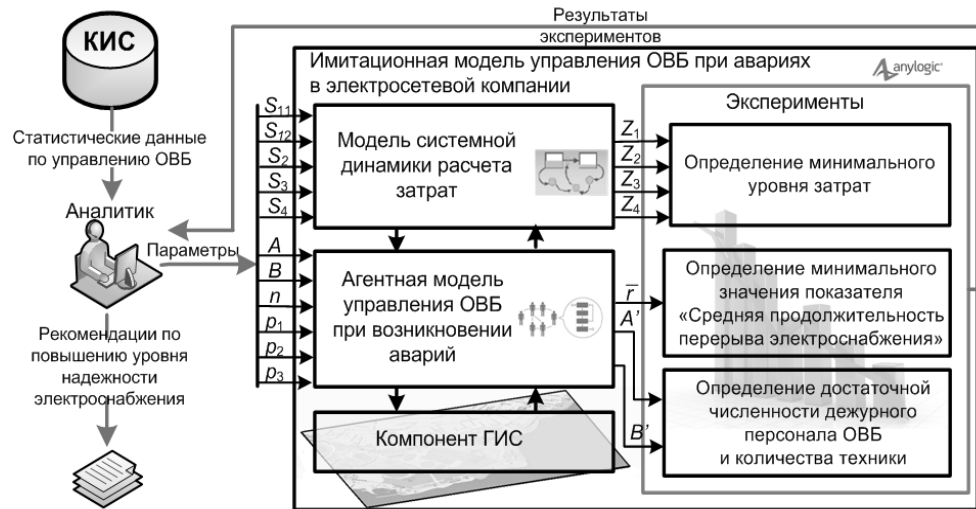


Рис. 2. Структура имитационной модели управления ОВБ при возникновении аварий в электросетевой компании

Fig. 2. The structure of the simulation model of ATS management in the event of accidents in the power grid company

Исходя из того, что ежедневно дежурят оперативно-выездные бригады (ОВБ) общей численностью  $A$  человек и  $B$  единиц техники, процесс их формирования, комплектации техникой осуществляется в соответствии с зависимостью от категории сложности аварий и времени устранения аварии (табл. 1).

В случае недостаточности численности собственного персонала в системе должен быть реализован механизм временной задержки  $D$  на докомплектацию ОВБ привлеченным персоналом, равной трем минутам на каждого человека привлеченного персонала.

В модели отражена упрощенная схема начисления затрат на оплату труда персонала и затрат, связанных с эксплуатацией и арендой техники:

- затраты на оплату труда собственного  $Z_1$  персонала рассчитываются исходя из постоянной части, равной  $S_{11}$  рублей в сутки и переменной части; переменная часть начисляется только тому персоналу, который был задействован при устранении аварий и ликвидации их последствий, и рассчитывается в зависимости от времени устранения аварии  $T$  и ставки, равной  $S_{12}$  рублей за одного человека в час;

- затраты на оплату труда персонала подрядной организации  $Z_2$  зависят от времени устранения аварии  $T$  и рассчитываются по ставке  $S_2$  рублей за одного человека в час выполненной работы;

- затраты, связанные с эксплуатацией техники  $Z_3$ , зависят от времени эксплуатации и рассчитываются по ставке  $S_3$  рублей за один машиночас работы техники;

- затраты, связанные с арендой техники  $Z_4$ , зависят от времени эксплуатации в аренде и рассчитываются по ставке  $S_4$  рублей за один машиночас работы техники.

Аналитик (см. рис. 2) может выполнять следующие функции: запустить модель, задать значения параметров, управлять выполнением модели, просматривать и копировать результаты моделирования, экспортировать модель в AnyLogic Private Cloud, просматривать модель в AnyLogic Private Cloud.

### 3. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Определим агентную модель управления ОВБ при возникновении аварий в электросетевой компании как

$$A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}, \quad (2)$$

где  $A_1$  – агент, моделирующий ТС и аналогичные энергообъекты и их реакцию на возникновение аварий первой, второй или третьей категории сложности;  $A_2$  – агент, моделирующий ЦУС и его действия при поступлении сигнала о возникновении аварии;  $A_3$  – агент, моделирующий ОВБ;  $A_4$  – агент, предназначенный для описания высокоуровневого объекта, где взаимодействуют агенты  $A_1, A_2, A_3$ .

Агент  $A_1$  определим как

$$A_1 = \{Fn_1, Sch\}, \quad (3)$$

где  $Fn_1$  – функция агента (написанная языке Java), предназначенная для определения категории аварии;  $Sch$  – диаграмма состояний агента (стейт-чарт), предназначенная для описания поведения агента в процедуре возникновения и устранения аварии.

Диаграмму состояний агента (стейтчарт)  $Sch$  определим как

$$Sch = \{Bgn, Bc, St, Trn, Var_1\}, \quad (4)$$

где  $Bgn$  – начало диаграммы состояний;  $Bc$  – указатель начального состояния;  $St$  – множество состояний;  $Trn$  – множество переходов;  $Var_1$  – множество переменных.

Множество переменных  $Var_1$  определим как

$$Var_1 = \{Ctg, Br, Str_1, Str_2\}, \quad (5)$$

где  $Ctg$  – категория аварии;  $Br$  – бригада;  $Str_1$  – начало движения бригады к месту аварии;  $Str_2$  – начало простоя на базе расположения ОВБ.

Агент  $A_2$  определим как

$$A_2 = \{Fn_2, Fn_3, Evt\}, \quad (6)$$

где  $Fn_2$  – функция агента (написанная языке Java), предназначенная для определения ближайшего от места возникновения аварии пункта формирования бригады;  $Fn_3$  – функция агента (написанная на языке Java), описывающая алгоритм формирования бригады;  $Evt$  – событие (специальный элемент

AnyLogic), предназначенное для задания условий, при выполнении которых запускается действие – распределение по бригадам.

Агент  $A_3$  определим как

$$A_3 = \{Var_2, Pr_1\}, \quad (7)$$

где  $Var_2$  – множество переменных агента  $A_3$ ;  $Pr_1$  – множество параметров агента  $A_3$ .

Множество переменных  $Var_2$  определим как

$$Var_2 = \{S, P, F\}, \quad (8)$$

где  $S$  – станция;  $P$  – пункт формирования бригады;  $F$  – статус «свободна».

Множество параметров  $Pr_1$  определим как

$$Pr_1 = \{SP, ST, PP, PT\}, \quad (9)$$

где  $SP$  – собственный персонал;  $ST$  – собственная техника;  $PP$  – привлеченный персонал;  $PT$  – привлеченная техника.

Агент  $A_4$  определим как

$$A_4 = \{Pop_1, Pop_2, A_2, Pr_2, M\}, \quad (10)$$

где  $Pop_1$  – популяция агентов  $A_1$ ;  $Pop_2$  – популяция агентов  $A_3$ ;  $Pr_2$  – множество параметров агента  $A_4$ ;  $M$  – модель системной динамики.

Модель системной динамики  $M$  предназначена для аккумуляции суммы затрат на оплату труда собственного персонала и персонала подрядной организации, а также суммы затрат, связанных с эксплуатацией и арендой техники. Схема модели системной динамики представлена на рис. 3.



Рис. 3. Схема модели системной динамики

Fig. 3. Scheme of the system dynamics model

Множество параметров  $Pr_2$  определим как

$$Pr_2 = \{A, B, D, N, P_1, P_2, P_3, S_{11}, S_{12}, S_2, S_3, S_4\}, \quad (11)$$

где  $A$  – численность дежурного персонала ОВБ;  $B$  – количество техники;  $D$  – время задержки на докомплектацию ОВБ привлеченным персоналом;  $N$  – интенсивность появления аварий в сутки;  $P_1$  – вероятность возникновения аварии первой категории сложности;  $P_2$  – вероятность возникновения аварии второй категории сложности;  $P_3$  – вероятность возникновения аварии третьей категории сложности;  $S_{11}$  – постоянная часть затрат на оплату труда собственного персонала;  $S_{12}$  – ставка для расчета переменной части затрат на оплату труда собственного персонала;  $S_2$  – ставка для расчета затрат на оплату труда персонала подрядной организации;  $S_3$  – ставка для расчета затрат, связанных с эксплуатацией техники;  $S_4$  – ставка для расчета затрат, связанных с арендой техники.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для оценки степени уверенности в достаточной корректности выводов о реальной системе, полученных в результате обращений к модели, проведено сравнение значений выходных данных информационной системы со значениями аналогичных показателей реальной системы. Рассмотрим реализацию модели на основании данных годовой отчетности ПАО «Ленэнерго» за период с 2015 по 2019 г. Средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей по данным отчетности ПАО «Ленэнерго» составляет 2,38 ч (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

**Расчет среднего значения показателя «Средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей» по данным годовой отчетности**

**Calculation of the average value of the indicator "An average duration of power supply interruption to consumers" according to the annual report**

Средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей, ч					
в 2015 г.	в 2016 г.	в 2017 г.	в 2018 г.	в 2019 г.	Среднее значение
3,8	2,9	2,0	1,7	1,5	2,38

Для оценки адекватности информационной системы по показателю «Средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей» проведено сравнение результатов простого эксперимента со средним значением показателя «Средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей», рассчитанного на основании данных годовой отчетности (табл. 3).

Таблица 3

Table 3

**Сравнительный анализ значений показателя «Средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей»**

**A comparative analysis of the values of the indicator "An average duration of power supply interruption to consumers"**

Номер эксперимента	Средняя длительность перерыва электроснабжения за год модельного времени, ч	Относительное отклонение от среднего значения показателя, рассчитанного на основании данных годовой отчетности, %
1	2,286	-3,95
2	2,279	-4,24
3	2,283	-4,08
...	....	...
100	2,287	-3,91
Среднее значение	2,286	-3,95

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что отклонение показателя «Средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей», полученного по результатам экспериментов, от среднего значения данного показателя, рассчитанного на основании данных годовой отчетности, является допустимым как в целом по всем экспериментам, так и отдельно по каждому эксперименту.

Анимационная схема модели содержит следующие элементы (рис. 4):

- ГИС-карта «map» предназначена для задания ГИС-пространства, в котором «обитают» агенты. Тип карты – тайловая, загружена с сайта поставщика ПО AnyLogic (сервер OpenStreetMap);

- коллекции используются для задания объекта данных, объединяющего несколько однотипных элементов (ГИС-точек). Коллекция «места расположения» объединяет точечные объекты (ГИС-точки), обозначающие трансформаторные подстанции и другие энергообъекты, а коллекция «точки сбора» – пункты сбора ОВБ. ГИС-точки, размещенные на карте, имеют свои координаты широты и долготы, заданные в градусах;

- анимационная схема модели системной динамики;

- временные графики предназначены для отображения временного тренда затрат на оплату труда собственного персонала  $Z_1$ ; затрат на оплату труда персонала подрядной организации  $Z_2$ ; затрат, связанных с арендой техники  $Z_3$ ; затрат, связанных с эксплуатацией собственной техники  $Z_4$ ;

- график «Продолжительность перерыва электроснабжения потребителей», отображающий среднюю длительность перерыва электроснабжения потребителей за всё время;

• гистограмма «Продолжительность перерыва электроснабжения потребителей», отображающая данные о распределении продолжительностей перерыва электроснабжения потребителей по заданным интервалам. Гистограмма разбивает временную шкалу на 10 интервалов. Тот интервал, в который попадает большее число продолжительностей, становится выше, что означает большую плотность попаданий в данный интервал.

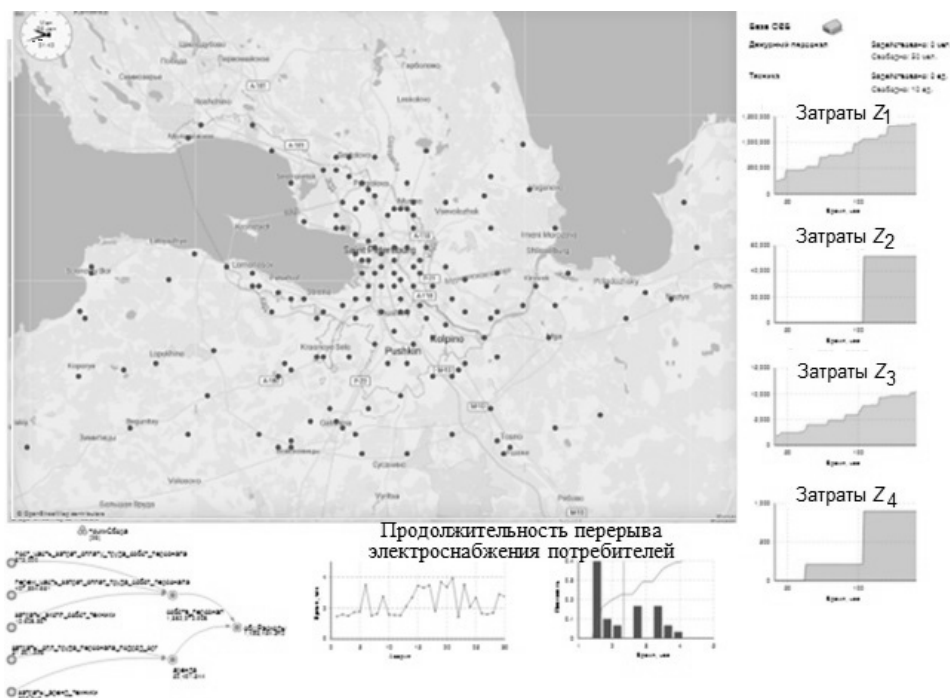


Рис. 4. Анимационная схема модели управления ОВБ при возникновении аварий в электросетевой компании

Fig. 4. An animation diagram of the ATS management model in case of accidents in the power grid company

В зависимости от того, какую задачу требуется решить с помощью имитационной модели и какую информацию необходимо получить о системе, проведена серия экспериментов, при этом учтены ограничения на ресурсы.

Для определения оптимальной численности дежурного персонала и оптимального количества техники с целью минимизации затрат заданы следующие ограничения на ресурсы (рис. 5).

Параметр	Тип	Значение			
		Мин.	Макс.	Шаг	Начальное
числоСтанций	фиксированный	153			
A	набор значений	75	87	1	
B	набор значений	20	38	1	

Рис. 5. Ограничения ресурсов для оптимизационного эксперимента № 1

Fig. 5. Resource constraints for optimization experiment No. 1

В результате проведенного эксперимента получен наилучший результат (лучшее допустимое значение целевой функции) –  $Z = 224\,609\,199,40$  рубля, который достигается при значениях параметра  $A' = 75$  и параметра  $B' = 37$  (рис. 6). По оси  $X$  откладываются номера итераций, а по оси  $Y$  – значение целевого функционала ( $Z$ ).

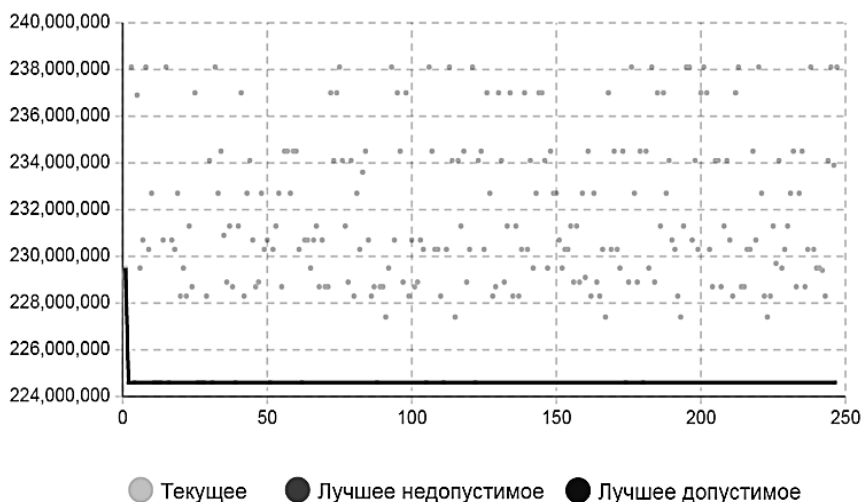


Рис. 6. Результат оптимизационного эксперимента № 1

Fig. 6. Result of optimization experiment No. 1

Для определения оптимальной численности дежурного персонала и оптимального количества техники с целью сокращения продолжительности перерыва электроснабжения заданы следующие ограничения на ресурсы (рис. 7).

Параметр	Тип	Значение			
		Мин.	Макс.	Шаг	Начальное
числоСтанций	фиксированный	153			
A	набор значений	87	200	1	0
B	набор значений	38	80	1	

Рис. 7. Ограничения ресурсов для оптимизационного эксперимента № 2

Fig. 7. Resource constraints for optimization experiment No. 2

В результате проведения экспериментов найдено лучшее допустимое значение целевой функции  $\bar{r} = 2,238$  ч, которое достигается при значениях параметра  $A' = 111$  и параметра  $B' = 50$  (рис. 8). По оси  $X$  откладываются номера итераций, а по оси  $Y$  – значение целевого функционала ( $\bar{r}$ ).



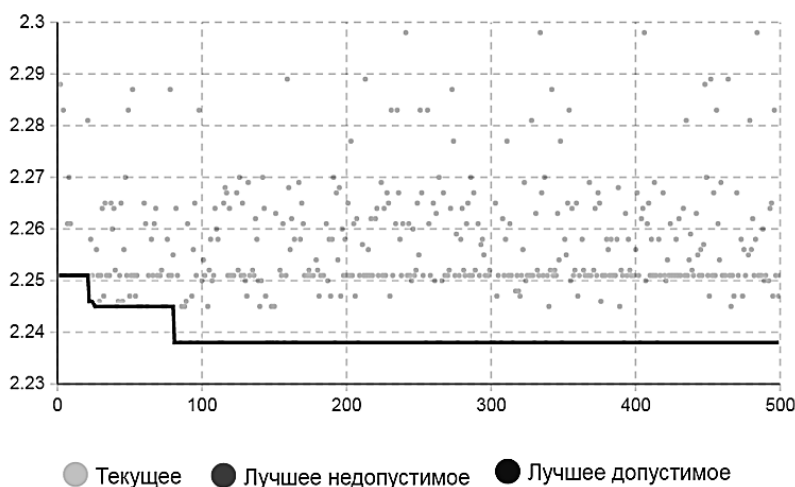


Рис. 8. Результат оптимизационного эксперимента № 2

Fig. 8. Result of optimization experiment No. 2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в данной работе структура имитационной модели управления ОВБ при возникновении аварий в электросетевой компании позволяет создавать многоподходные модели управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений.

Положительный эффект от внедрения моделей управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений заключается в следующем:

- повышении удовлетворенности конечных потребителей за счет снижения средней продолжительности перерыва электроснабжения;
- повышении эффективности при принятии тактических решений в области оптимизации ресурсов, задействованных при устранении аварий (технологических нарушений).

Совокупность указанных эффектов позволит обеспечить качественное выполнение социальной функции электросетевых компаний в существующих экономических условиях и модели рынка.

Разработанная имитационная модель предполагает возможность добавления и (или) изменения значимых факторов, влияющих на уровень абстракции, изменения алгоритмов формирования оперативно-выездными бригадами, пополнения коллекции мест расположения энергообъектов на ГИС-карте и изменения других настроек, что позволит адаптировать систему к меняющимся условиям деятельности электросетевой компании.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Как радикально повысить надежность электроснабжения, вложив минимум средств? – URL: [https://www.startbase.ru/download.html?file=file%2F13154216&title=Rec15\\_A1\\_5\\_General\\_Idea.pdf](https://www.startbase.ru/download.html?file=file%2F13154216&title=Rec15_A1_5_General_Idea.pdf) (дата обращения: 14.10.2020).

2. Концепция «Цифровая трансформация 2030». – М.: ПАО «Россети», 2018. – URL: [https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya\\_Tsifrovaya\\_transformatsiya\\_2030.pdf](https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf) (дата обращения: 14.10.2020).
3. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике : монография / отв. ред.: Н.И. Воропай, Г.Ф. Ковалёв. – М.: Энергия, 2013. – 212 с.
4. Strategic decision support in the process of manufacturing systems management / O. Protalinskiy, A. Andryushin, I. Shcherbatov, A. Khanova, N. Urazaliev // Proceedings of 2018 11th International Conference "Management of Large-Scale System Development", MLSD 2018. – Moscow, 2018. – P. 8551760.
5. Орлов П.С., Морозов В.В., Кочкин С.П. Технические мероприятия повышения надежности электроснабжения в АПК // Вестник АПК Верхневолжья. – 2017. – № 3 (39). – С. 94–100.
6. Вертугин А.А. Повышение надежности электроснабжения промышленных предприятий за счет применения быстродействующего резервного источника питания // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2017. – № 2. – С. 196–202.
7. Борисов А.Л. Внедрение реклоузеров в целях повышения надежности электроснабжения // Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века. – 2017. – № 9. – С. 108–110.
8. Зацаринная Ю.Н., Маргулис С.М., Федотов Е.А. Применение динамических компенсаторов искажений напряжения для повышения надежности системы электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2018. – Т. 10, № 1 (37). – С. 55–63.
9. Таранов М.А., Корчагин П.Т. Системный анализ надежности и перспективы ее повышения для систем электроснабжения потребителей // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3 (50). – С. 55.
10. Шарыгин М.В. Принципы организации банка мероприятий по управлению надежностью электроснабжения // Промышленная энергетика. – 2014. – № 9. – С. 6–9.
11. Автоматизированная система управления мобильными бригадами ПАО «МОЭСК»: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019614776. – Заявка № 2019613198; заявл. 25.03.2019; зарег. 11.04.2019.
12. Купоносова В.С., Андрюшин А.В., Щербатов И.А. Управление производственными активами на основе стоимостных и надежностных характеристик // Энергосбережение и эффективность в технических системах: материалы V Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – М., 2018. – С. 253–254.
13. Мусаев Т.А., Шагеев С.Р. Повышение эффективности формирования целевых значений показателей надежности электроснабжения SAIFI, SAIDI для предприятий электрических сетей // Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: материалы IX Международной молодежной научно-технической конференции: в 3 т. – Казань, 2018. – С. 164–167.
14. Елтышев Д.К. Интеллектуальные модели комплексной оценки технического состояния высоковольтных выключателей // Информационно-управляющие системы. – 2016. – № 5 (84). – С. 45–53.
15. Овсянников А.А. Методика управления затратами на повышение надежности функционирования межрегиональных распределительных электросетевых компаний // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2012. – № 1 (29). – С. 49–54.
16. Оптимизация ремонтных программ энергетического оборудования с использованием методов искусственного интеллекта / В.А. Бородин, А.В. Андрюшин, О.М. Проталинский, А.А. Ханова // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2019: материалы двенадцатой международной конференции / под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – М., 2019. – С. 576–579.
17. Проталинский О.М., Проталинский И.О., Кладов О.Н. Система оптимального управления производственными активами энергетических предприятий // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2017. – № 4 (93). – С. 5–8.
18. Применение нейронных сетей в целях определения места повреждения воздушных и кабельных линий электропередачи / И.Н. Горбунов, С.Г. Захаренко, С.А. Захаров, Т.Ф. Малахова // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – № 4 (144). – С. 48–55.
19. Application of Kohonen's self-organizing network to the diagnosis system for rotating machinery / M. Tanaka, M. Sakawa, I. Shiromaru, T. Matsumoto // 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century. – Vancouver, BC, Canada, 1995. – Vol. 5. – P. 4039–4044.

20. Адаптивная система прогнозирования надежности технологического оборудования объектов энергетики / О.М. Проталинский, И.А. Щербатов, А.А. Ханова, И.О. Проталинский // Информатика и системы управления. – 2019. – № 1 (59). – С. 93–105.

21. Малафеев А.В., Юлдашева А.И. Использование теории нечетких множеств для оценки производственных рисков при управлении режимами промышленной системы электропитания // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конференции. – Иваново, 2015. – С. 294–297.

22. Бобырь М.В., Милостная Н.А. Анализ методов повышения надежности нечетких систем // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2017. – № 7 (157). – С. 22–30.

23. Массель Л.В., Ворожцова Т.Н., Пяткова Н.И. Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике // Онтология проектирования. – 2017. – Т. 7, № 1 (23). – С. 66–76.

24. Онтологический инжиниринг ситуационного управления в энергетике / Л.В. Массель, А.Г. Массель, Т.Н. Ворожцова, Н.Н. Макагонова // Знания – Онтологии – Теории (ЗОНТ-2015): материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Новосибирск, 2015. – Т. 2. – С. 36–43.

25. Степанов В.М., Базыль И.М. Имитационное и физическое моделирование систем электроснабжения для повышения надежности их работы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 12-2. – С. 139–142.

26. Дробов А.В., Галушко В.Н. Имитационная модель надежности системы электроснабжения // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов. – Уфа, 2016. – С. 228–231.

27. Уразалиев Н.С., Ханова А.А., Тумпуров В.С. Концептуальная структура имитационной модели логистических процессов управления ремонтами предприятия электрических сетей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2018. – № 2. – С. 91–100.

28. Борцев А. Как строить простые, красивые и полезные модели сложных систем // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД 2013). – Казань, 2013. – Т. 1. – С. 21–34.

*Кинжалиева Алия Рахметовна*, студентка кафедры «Прикладная информатика» Астраханского государственного технического университета. Основное направление исследований – имитационное моделирование электросетевых компаний. Имеет 2 публикации. E-mail: satobalova@mail.ru

*Ханова Анна Алексеевна*, доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная информатика» Астраханского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – стратегическое управление сложными системами на основе имитационного моделирования. Имеет более 170 публикаций, в том числе две монографии. E-mail: akhanova@mail.ru

*Kinzhalieva Aliya R.*, student at the department of applied informatics, Astrakhan State Technical University. The main area of her research is simulation modeling of power grid companies. She has 2 publications. E-mail: satobalova@mail.ru

*Hanova Anna A.*, D.Sc. (Eng.), professor at the department of applied informatics, Astrakhan State Technical University. The main area of her research is strategic management of complex systems based on simulation. She is the author of over 170 publications, including two monographs. E-mail: akhanova@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-77-94

### ***A simulation model for managing field service teams of a power grid company\****

A.R. KINZHALIEVA<sup>a</sup>, A.A. KHANOVA<sup>b</sup>

*Astrakhan State Technical University, 16, Tatischeva Street, Astrakhan, 414056, Russian Federation*

<sup>a</sup> *satobalova@mail.ru*    <sup>b</sup> *akhanova@mail.ru*

#### **Abstract**

The lack of the necessary investment in the electric grid complex over the past 20 years has led to a significant physical and technological obsolescence of electrical networks. In this regard, the task of ensuring the reliability of the provision of services by electric grid companies with a minimum level of costs is urgent. The implementation of this task in many respects depends on the reduction of the duration of the interruption of power supply to consumers, which can be achieved by improving the process of management of duty personnel of field service teams in case of accidents and technological disturbances. At the same time, modern grid companies were focused on minimum economically sound costs and aimed at improving the efficiency of financial and economic activities through the rational use of resources. The structure of a simulation model of field service team management in the event of accidents and technological disturbances in an electric grid company at the middle level of system abstraction is proposed. The simulation model includes an agent model, a system dynamics model, a component of the geo information system and experiments modules. The description of the simulation model of field service team management in the event of accidents and technological disturbances is formalized, input and output information on the components of the model is selected, the information describing the agent model is structured, and a diagram of the system dynamics model is built. The adequacy of the simulation model was checked based on the statistics of Lenenergo PJSC. Experimental schemes have been developed for a simulation model of operational team management in the event of accidents and technological disturbances in order to determine the best reliability and cost indicators.

The developed approach can be used to create multi-approach simulation models for the management of operational teams in the event of accidents and technological disturbances for various electric grid companies by selecting modes according to the statistical reports of the electric grid company and connecting the corresponding GIS modules.

**Keywords:** simulation, agent model, system dynamics, reliability, power grid company, management, field service teams, costs

#### **REFERENCES**

1. *Kak radikal'no povysit' nadezhnost' elektrosnabzheniya, vlozhiv minimum sredstv?* [How to radically increase the reliability of electricity supply by investing a minimum of funds?]. Available at: [https://www.startbase.ru/download.html?file=file%2F13154216&title=Rec15\\_AI\\_5\\_General\\_Idea.pdf](https://www.startbase.ru/download.html?file=file%2F13154216&title=Rec15_AI_5_General_Idea.pdf) (accessed 14.10.2020).
2. *Kontseptsiya "Tsifrovaya transformatsiya 2030"* [Concept "Digital Transformation 2030"]. Moscow, Rosseti Publ., 2018. Available at: [https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya\\_Tsifrovaya\\_transformatsiya\\_2030.pdf](https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf) (accessed 14.10.2020).
3. Voropai N.I., Kovalev G.F., eds. *Kontseptsiya obespecheniya nadezhnosti v elektroenergetike* [The concept of ensuring reliability in the electric power industry]. Moscow, Energiya Publ., 2013. 212 p.
4. Protalinskiy O., Andryushin A., Shcherbatov I., Khanova A., Urazaliev N. Strategic decision support in the process of manufacturing systems management. *Proceedings of 2018 11th International Conference "Management of Large-Scale System Development", MLSD 2018*, Moscow, 2018, p. 8551760.
5. Orlov P.S., Morozov V.V., Kochkin S.P. *Tekhnicheskie meropriyatiya povysheniya nadezhnosti elektrosnabzheniya v APK* [Technical measures to improve the reliability of power supply in the agro-

---

\* Received 26 December 2019.

industrial complex]. *Vestnik APK Verhnevolzh'ya = Agroindustrial Complex of Upper Volga Region Herald*, 2017, no. 3 (39), pp. 94–100.

6. Vertugin A.A. Povyshenie nadezhnosti elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy za schet primeneniya bystrodeistviyushchego rezervnogo istochnika pitaniya [Improving the reliability of power supply to industrial enterprises due to the use of a fast-acting backup power source]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta = Scientific and Technical Journal of Bryansk State University*, 2017, no. 2, pp. 196–202.

7. Borisov A.L. Vnedrenie reklouzerov v tselyakh povysheniya nadezhnosti elektrosnabzheniya [Introduction of advertisers in order to improve the reliability of electricity supply]. *Nauchno-obrazovatel'nyi potentsial molodezhi v reshenii aktual'nykh problem XXI veka = The scientific and educational potential of youth in solving the actual problems of the XXI century*, 2017, no. 9, pp. 108–110.

8. Zatsarinnaya Yu.N., Margulis S.M., Fedotov E.A. Primenenie dinamicheskikh kompensatorov iskazhenii napryazheniya dlya povysheniya nadezhnosti sistemy elektrosnabzheniya [Using dynamic voltage distortion compensators to increase the reliability of the power supply system]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Kazan state power engineering university bulletin*, 2018, Vol. 10, no. 1 (37), pp. 55–63.

9. Taranov M.A., Korchagin P.T. Sistemnyi analiz nadezhnosti i perspektivy ee povysheniya dlya sistem elektrosnabzheniya potrebiteli [System analysis of reliability and prospects for its improvement for consumer power supply systems]. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, 2018, no. 3 (50), p. 55.

10. Sharygin M.V. Printsipy organizatsii banka meropriyatiy po upravleniyu nadezhnost'yu elektrosnabzheniya [Principles of organization of the bank of measures for power supply reliability management]. *Promyshlennaya energetika = Industrial power engineering*, 2014, no. 9, pp. 6–9.

11. *Avtomatizirovannaya sistema upravleniya mobil'nymi brigadami PAO "MOESK"* [Automated system for managing mobile teams of PAO "MOESK"]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2019614776, 2019.

12. Kuponosova V.S., Andryushin A.V., Shcherbatov I.A. [Management of production assets on the basis of cost and reliability characteristics]. *Energoberezhenie i effektivnost' v tekhnicheskikh sistemakh: materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, molodykh uchemykh i spetsialistov* [Energy saving and efficiency in technical systems: materials of the V International scientific and technical conference of students, young scientists and specialists], Moscow, 2018, pp. 253–254. (In Russian).

13. Musaev T.A., Shageev S.R. [Improving the efficiency of generating target values of reliability indicators of power supply SAIFI, SAIDI for electric grid enterprises]. *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2018: materialy IX Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Electric power industry through the eyes of youth - 2018: materials of the IX International Youth Scientific and Technical Conference], Kazan, 2018, pp. 164–167. (In Russian).

14. Eltyshov D.K. Intellektual'nye modeli kompleksnoi otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovol'tnykh vyklyuchatelei [Intelligent models of integrated assessment of technical condition of high-voltage switches]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*, 2016, no. 5 (84), pp. 45–53.

15. Ovsyannikov A.A. Metodika upravleniya zatratami na povyshenie nadezhnosti funktsionirovaniya mezhregional'nykh raspredelitel'nykh elektrosetevykh kompanii [The method of reliability functioning costs management for switch power network companies]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie = Modern High Technologies. Regional Application*, 2012, no. 1 (29), pp. 49–54.

16. Borodin V.A., Andryushin A.V., Protalinskii O.M., Khanova A.A. [Optimization of re-installation programs of energy equipment using artificial intelligence methods]. *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem MLS'D'2019: materialy dvenadtsatoi mezhdunarodnoi konferentsii* [Management of large-scale system development MLS'D'2019], Moscow, 2019, pp. 576–579. (In Russian).

17. Protalinskii O.M., Protalinskii I.O., Kladov O.N. Sistema optimal'nogo upravleniya proizvodstvennymi aktivami energeticheskikh predpriyatiy [System of optimal management of production assets of energy enterprises]. *Avtomatizatsiya i IT v energetike*, 2017, no. 4 (93), pp. 5–8. (In Russian).

18. Gorbunov I.N., Zakharenko S.G., Zakharov S.A., Malakhova T.F. Primenenie neironnykh setei v tselyakh opredeleniya mesta povrezhdeniya vozdushnykh i kabel'nykh linii elektroperedachi [Application of neural networks for determining the location of damage to air and cable electrical transmission lines]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*, 2019, no. 4 (144), pp. 48–55.

19. Tanaka M., Sakawa M., Shiromaru I., Matsumoto T. Application of Kohonen 's self-organizing network to the diagnosis system for rotating machinery. 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century, Vancouver, BC, Canada, 1995, vol. 5, pp. 4039–4044.

20. Protalinskii O.M., Shcherbatov I.A., Khanova A.A., Protalinskii I.O. Adaptivnaya sistema prognozirovaniya nadezhnosti tekhnologicheskogo oborudovaniya ob"ektov energetiki [Adaptive system for predicting the reliability of technological equipment of energy facilities]. *Informatika i sistemy upravleniya = Information Science and Control Systems*, 2019, no. 1 (59), pp. 93–105.

21. Malafeev A.V., Yuldasheva A.I. [Using the theory of fuzzy sets to assess production risks in managing the regimes of the industrial electric power supply system]. *Elektroenergetika glazami molodezhi: trudy VI mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Electric power industry through the eyes of youth: proceedings of the VI International Youth Scientific and Technical Conference], Ivanovo, 2015, pp. 294–297. (In Russian).

22. Bobyr' M.V., Milostnaya N.A. Analiz metodov povysheniya nadezhnosti nechetkikh sistem [Analysis of methods for improving the reliability of fuzzy systems]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Herald of computer and information technologies*, 2017, no. 7 (157), pp. 22–30.

23. Massel' L.V., Vorozhtsova T.N., Pyatkova N.I. Ontologicheskii inzhiniring dlya podderzhki prinyatiya strategicheskikh reshenii v energetike [Ontological engineering to support strategic decision-making in power engineering]. *Ontologiya proektirovaniya = Ontology of Designing*, 2017, Vol. 7, no. 1 (23), pp. 66–76.

24. Massel' L.V., Massel' A.G., Vorozhova T.N., Makagonova N.N. [Ontological engineering of situational management in the energy sector]. *Znaniya – Ontologii – Teorii (ZONT-2015): materialy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [The All-Russian Conference “Knowledge – Ontology – Theory” (KONT-13)], Novosibirsk, 2015, pp. 36–43. (In Russian).

25. Stepanov V.M., Bazyl' I.M. Imitatsionnoe i fizicheskoe modelirovanie sistem elektrosnabzheniya dlya povysheniya nadezhnosti ikh raboty [Simulation and physical modeling of power supply systems to increase the reliability of their work]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula state university. Technical sciences*, 2015, no. 12-2, pp. 139–142.

26. Drobov A.V., Galushko V.N. Imitatsionnaya model' nadezhnosti sistemy elektrosnabzheniya [Simulation model of reliability of the electrical supply system]. *Povyshenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotekhnicheskikh sistem i kompleksov* [Improving the reliability and energy efficiency of electrical systems and complexes]. Ufa, 2016, pp. 228–231.

27. Urazaliev N.S., Khanova A.A., Tumpurov V.S. Kontseptual'naya struktura imitatsionnoi modeli logicheskikh protsessov upravleniya remontami predpriyatiya elektricheskikh setei [Conceptual structure of the imitation model of logistic processes for managing repairs of the electric grid enterprise]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2018, no. 2, pp. 91–100.

28. Borshchev A. [How to build simple, beautiful and useful models of complex systems]. *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika (IMMOD 2013)* [Simulation modeling. Theory and Practice "IMMOD-2013"], Kazan, 2013, vol. 1, pp. 21–34. (In Russian).

Для цитирования:

Кинжалиева А.Р., Ханова А.А. Имитационная модель управления оперативно-выездными бригадами электросетевой компании // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 2–3 (79). – С. 77–94. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-77-94.

For citation:

Kinzhalieva A.R., Khanova A.A. Imitatsionnaya model' upravleniya operativno-vyezdnyimi brigadami elektrossetevoi kompanii [A simulation model for managing field service teams of a power grid company]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 2–3 (79), pp. 77–94. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-77-94.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,  
МЕТРОЛОГИЯ  
И ИНФОРМАЦИОННО–  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ  
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENT MAKING,  
METROLOGY AND  
INFORMATION  
MEASUREMENT DEVICES  
AND SYSTEMS

УДК: 004 (681.518)

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-95-108

## **Исследование соответствия информационных процессов и зрения специалистов в системах с высокой профессиональной информативной нагрузкой\***

**К.А. ГАФУРОВ**

*367000, РФ, г. Махачкала, пл. Ленина, 1, Дагестанский государственный медицинский университет*

*[gafurovkerim@mail.ru](mailto:gafurovkerim@mail.ru)*

Для большинства профессий острота зрения специалиста не является критичным показателем, но есть ряд направлений деятельности, где зрительный фактор является первостепенным – это диспетчеры, операторы и контролеры. Работа в условиях постоянного зрительного напряжения требует высокой моторной активности глазодвигательного аппарата, остроты зрения и высоких когнитивных способностей. Целью исследования является разработка технологии анализа соответствия информационных процессов и работы зрительной системы специалистов с высокой профессиональной информативной нагрузкой. Для определения информационных составляющих рабочего цикла оператора рабочее информационное поле было представлено в виде матрицы элементов, в которой каждому элементу присваивается свой вес, определяющий важность информационного процесса, находящегося в данной точке информационного поля оператора. Для прецизионного определения остроты зрения были выбраны тест-объект и соответствующая таблица для прецизионной визометрии. Исследование соответствия информационных процессов и зрения специалистов в системах с высокой профессиональной информативной нагрузкой было проведено с использованием разработанного специализированного программного обеспечения. Разработанное специализированное программное обеспечение синхронизировано с матрицей важности информационных процессов, позволяет проводить мониторинг состояния зрительной системы специалистов с высокой профессиональной информативной нагрузкой и создавать информационное пространство, наиболее оптимальное и адаптивное под зрительный аппарат конкретных диспетчеров-операторов.

Разработанный способ позволяет снизить риск ошибок и неточностей в работе диспетчеров, что имеет весомое значение для экономики страны, так как от любой ошибки может пострадать огромное количество людей и производственных процессов. Программное обеспечение позволяет вести статистику данных и вводить данные в единую информационную базу, что облегчит обследование в дальнейшем. Результаты, полученные в ходе выполнения исследова-

---

\* *Статья получена 27 января 2020 г.*

дования, могут широко использоваться в различных сферах производств с высокой информативной нагрузкой информационных процессов.

**Ключевые слова:** информационные процессы, информативная нагрузка, объектно-ориентированное программирование, матрица, диспетчер, мониторинг, визометрия, оптотип

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, в век высоких технологий, больших скоростей и огромных информативных нагрузок, важное значение для восприятия окружающего мира имеет зрение человека. В результате больших информативных нагрузок человек теряет зрение, он хуже различает простые и сложные объекты, ему больше времени требуется на распознавание знаков и символов, которые он раньше видел и различал намного быстрее и проще. Для большинства профессий данное обстоятельство является не критичным, но есть ряд направлений деятельности человека, где зрительный фактор является первостепенным. Прежде всего это касается специалистов, работающих за контрольно-мониторинговой аппаратурой – диспетчеров, операторов и контролеров. В настоящее время в зависимости от сферы деятельности различают диспетчерские пункты и ситуационные центры, например, нефтегазовой отрасли, атомных и гидроэлектростанций, электроэнергетических компаний в крупных урбанистических центрах, транспортных компаний крупных городов, финансово-аналитических центров мониторинга рынка, телекоммуникационных систем, жилищно-коммунальных хозяйств, Министерства чрезвычайных ситуаций, авиационной отрасли, систем видеонаблюдения и др. Наличие диспетчерских пунктов и ситуационных центров предполагает работы с высокой степенью ответственности персонала, так как любая невнимательность или слабая реакция может повлечь за собой не только аварии техногенного характера, но и большое число человеческих жертв. Работа в условиях постоянного зрительного напряжения требует высокой моторной активности глазодвигательного аппарата, остроты зрения и высоких когнитивных способностей.

Таким образом, важной задачей является выявление и постоянный мониторинг зрительных рефлексов диспетчеров, работающих в условиях высокой зрительной и информационной нагрузки [1].

Современные пульты управления представляют собой мощные информационные табло на жидкокристаллических матрицах-мониторах (рис. 1). Каждый элемент монитора задействован в представлении какого-либо рода информации, и диспетчер практически весь рабочий день контролирует объекты по всему информационному полю.

Работа современного диспетчера за пультом предполагает движение глазного яблока как по горизонтальной плоскости, так и по вертикальной. Также необходимо учитывать постоянную фокусировку хрусталика глаза (глазная линза) на отдельных элементах мониторов (рис. 2). С учетом вышесказанного возникает острая необходимость в систематических проверках диспетчеров и операторов на зрительную чувствительность, так как зрение человека не является статическим и постоянным параметром, не зависящим от условий работы и жизни человека.





*Рис. 1.* Диспетчерский пункт ТЭЦ

*Fig. 1.* The dispatch center of CHP



*Рис. 2.* Пульт ситуационного центра

*Fig. 2.* The situation center console

Исследование остроты зрения, или визометрия, является основным функциональным тестом в офтальмологии [2]. Но в большинстве стандартных офтальмологических методик [2] не учитывается скорость реакции пациента на изменение информации в различных плоскостях и точках пространства, время фокусировки на отдельном элементе информационного табло и т. д.

Также существуют некоторые методики [3–7], исследующие психомоторику, которые используют технические средства для оценки характеристик опорно-двигательного аппарата и рабочих движений рук с обратной связью через зрительный анализатор. В таких экспериментах используют секундомер, учитывающий время выполнения заданий.

На сегодняшний день для решения поставленных проблем существуют и различные устройства. Например, устройство для профессионального отбора и начального обучения операторов систем слежения [3], которое работает

следующим образом: получив команду на начало работы (рис. 3), исследуемый кандидат в операторы, совместив с помощью датчика команд, имитирующего орган управления конкретного пульта, курсор-указатель с началом предложенной координограммы, осуществляет задачу, соответствующую его последующей работе, проводя курсор-указатель от начала до конца координограммы. Таким образом, счетчики блока регистрации закрепят показатели качества прохождения координограммы (время теста, суммарное время нахождения курсора-указателя за пределами координограммы и количество его выходов за ее пределы) и подают замеренные данные на обработку в блок определения интегрального критерия качества сопровождения. Данный показатель вычисляется по формуле, и результаты выводятся на экран монитора.

Стимульный материал размещается в четырех граничащих друг с другом зонах  $A, B, C, D$ , каждая из которых представляет зеркальное отражение двух соседних по одной из осей координат, что позволяет увеличить возможности аппарата за счет изменения условий отслеживания координограммы и осуществления тем самым различных законов управления:

- прямого наведения по координатам  $X$  и  $Y$ ;
- обратного наведения по координате  $X$  и прямого по координате  $Y$ ;
- прямого наведения по координате  $X$  и обратного по координате  $Y$ ;
- обратного наведения по координатам  $X$  и  $Y$ ;

Подобные тестовые задачи, по мнению авторов устройства [3], позволят более объективно оценить уровень сенсомоторной координации испытуемого при реализации различных законов управления и тем самым повысить качество профотбора.

Технический результат достигается за счет того, что при выполнении задания, функционально адекватного задаче отслеживания на экране прибора наведения, имитирующего поведение сложно движущейся цели, устройство для профотбора операторов обеспечивает регистрацию наиболее информативных показателей качества двухкоординатного сопровождения и в конечном счете определение интегрального критерия уровня сенсомоторной координации, а также производительности безошибочной работы, имеющего высокий коэффициент корреляции результатов тестирования.

Известны устройства для измерения тремора рук [4, 5]. Тремор является примером самого элементарного непреднамеренного движения рук. В основном тремор связан с организацией согласованных движений рук на разных уровнях, так как сочетает энергетические, регуляторные и информационно-координационные параметры.

В патенте под названием «Устройство для исследования динамического тремора» [4] приводится конструкция, которая содержит датчик, вычислитель, первый и второй аналого-цифровые преобразователи, блок формирования импульсов времени реализации, генератор тактовых импульсов, блок задания темпа. В устройстве датчик имеет панель из диэлектрика, в которой сделана прорезь замкнутой произвольной конфигурации, а также находится щуп с металлическим шарообразным наконечником, защищенный экраном, внутри которого расположен высокочастотный генератор, лампочки задания темпа, металлические пластины и катушки индуктивности. Блок формирования импульсов времени реализации составляющих тремора содержит элемент ИЛИ, триггер, счетчик и клавиатуру задания времени. Блок задания темпа содержит кла-

виатуру задания темпа, счетчик темпа и дешифратор темпа. Первый и второй аналого-цифровые преобразователи выполнены аналогично и содержат усилитель, детектор, графический регистратор, фильтр низких частот, дифференцирующий элемент, нуль-орган, три пороговых элемента, счетчик частоты тремора, три счетчика, элемент НЕ, элемент ИЛИ, первый элемент И, четвертый счетчик, управляемый генератор пилообразного напряжения, элемент сравнения, триггер, второй элемент И, блок управления коммутатором, коммутатор, цифровой регистратор и три переменных резистора.

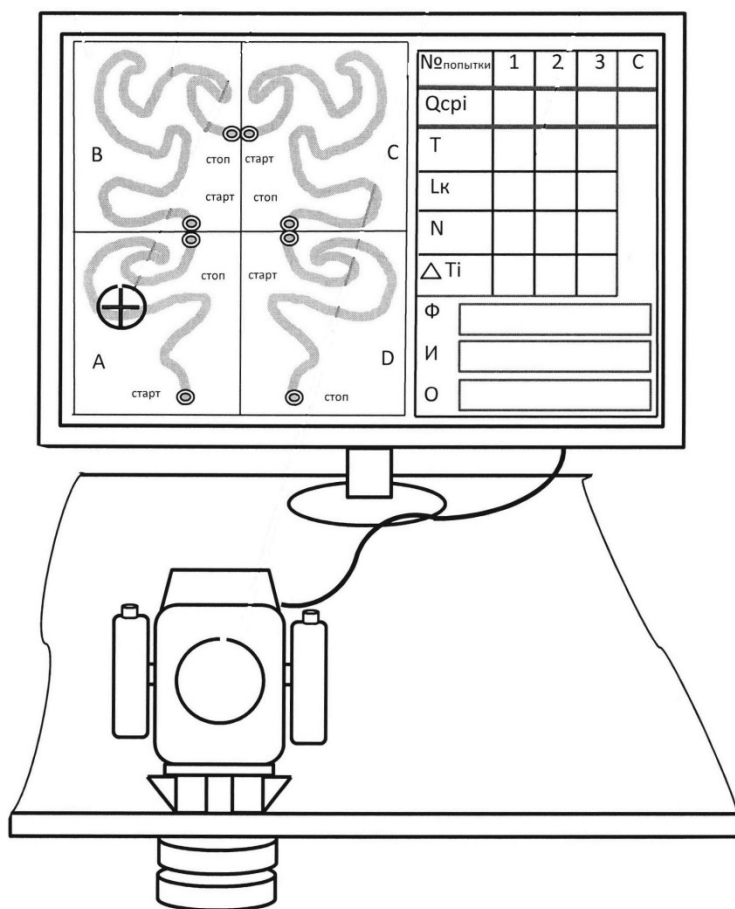


Рис. 3. Устройство для профессионального отбора

Fig. 3. A professional selection device

Недостатками данного устройства являются невозможность движения по другим траекториям, кроме заданной; ограниченность амплитуды тремора шириной, изготовленной в пластине прорези; отсутствие возможности получения информации об угле наклона щупа, имитирующего некоторые рабочие инструменты.

В другом устройстве для исследования координации движения имеется датчик тремора, изготовленный в виде токопроводящей дорожки. Внутри дорожки залит электролит, а передвижение щупа по направляющей контролируется блоком регистрации [6]. Недостатком данного устройства является то,

что он используется только в лабораториях и невозможно объективно провести регистрацию и оценку параметров качества безошибочной работы, например коэффициента управления, который является основным показателем качества управления, длительности исправления ошибок, способности к перестройке двигательной координации при плавной или резкой смене стереотипного движения (это определяется при переходе с полуавтоматического режима управления на ручной), из-за отсутствия регистрации времени нахождения шупа за пределами зазора, заполненного электролитом.

Недостатком подобных устройств является ограниченность применения (каждое средство измеряет только тот параметр, для которого оно предназначено). Также во многих перечисленных и разработанных на сегодняшний день аппаратах отсутствует возможность автоматизированной обработки, создания базы данных, проведения статистического анализа и сравнения данных по истечении заданного промежутка времени.

Таким образом, целью исследования является разработка технологии анализа соответствия информационных процессов [1] и работы зрительной системы специалистов с высокой профессиональной информативной нагрузкой.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задачей исследования является разработка методики анализа соответствия информационных процессов и работы зрительной системы специалистов с высокой профессиональной информативной нагрузкой. Первоначально требуется создание информационной модели анализа информационных процессов на пультах и экранах операторов, далее разрабатывается алгоритм программного обеспечения мониторинга зрительной системы диспетчеров и на его основе разрабатывается программное обеспечение, позволяющее оценить координационные и временные параметры операторов.

Для реализации поставленной цели и решения задач исследования были применены методы информационного моделирования, исследования информационных систем, теории оптимизации, математической статистики, методы объектно-ориентированного проектирования и программирования [1, 8–16].

Для определения информационных составляющих рабочего цикла оператора ситуационного центра либо диспетчера необходимо представить рабочее информационное поле в виде матрицы элементов [15]. В качестве матрицы воспользуемся прямоугольной матрицей  $A_{ij}$ :

$$\begin{array}{cccccc}
 a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1j} \\
 a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2j} \\
 A_{ij} = a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3j} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} & \dots & a_{ij}
 \end{array} \quad (1)$$

Конкретные информационные процессы на табло (мониторах) диспетчеров-операторов разбивают на отдельные ячейки, которые будут являться элементами матрицы (1). В зависимости от информационных процессов на табло

и их пространственном расположении количество элементов матрицы будет различным. Также каждому элементу присваивается свой вес, который будет определять важность информационного процесса, находящегося в данной точке информационного поля оператора:

$$a_{ij} = a\{0, \dots, n\},$$

где  $n$  – показатель важности элемента информационного табло. В зависимости от количества элементов в конкретном информационном поле данный показатель будет иметь различные максимальные значения [8, 9–12].

Для прецизионного определения остроты зрения были выбраны тест-объект (рис. 4) и соответствующая таблица для визометрии [16]. Данный тест-объект не содержит никаких лишних элементов и за счет подобия составляющих позволяет смоделировать ситуацию монотонности ежедневного просмотра однотипных элементов на пультах операторов. Тест-объект состоит из окружности 1 определенного диаметра, равномерно заполненной черным цветом, и другой окружности 2 белого цвета и в 5 раз меньшего диаметра, расположенной внутри окружности 1 и касательно к ней в одном из меридианов. Линейная величина опто типа рассчитывается по формуле

$$L = 2D \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2},$$

где  $L$  – искомая линейная величина (диаметр) опто типа;  $D$  – дистанция, для которой ведется расчет;  $\alpha$  – условленный зрительный угол (1 мин).

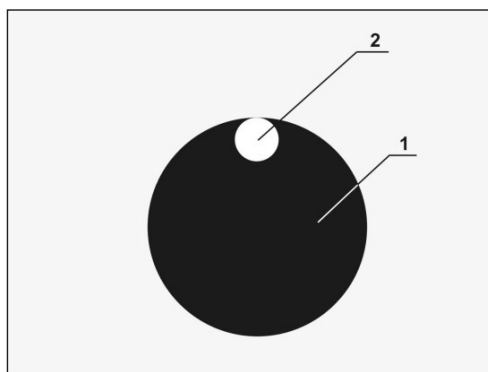


Рис. 4. Тест-объект для визометрических исследований

Fig. 4. Test object for visometric studies

При предъявлении тест-объекта испытуемому при визометрии требуется определение расположения белого круга в черном: сверху, внизу, слева или справа. Для визометрии на основе данного тест-объекта использован уменьшенный шаг перехода от одной строки к другой – 0,05 вместо 0,1 в таблицах Сивцева – Головина [16]. В экспертной практике исследование остроты зрения является одним из основных методов исследования функций зрительного анализатора, а определяемая при этом острота центрального зрения служит критерием для функциональной оценки тех или иных медико-социальных

категорий. Кроме того, острота зрения является также важнейшим критерием при проведении профотбора для прецизионных профессий.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование соответствия информационных процессов и зрения специалистов в системах с высокой профессиональной информативной нагрузкой было проведено с использованием разработанного специализированного программного обеспечения (ПО) на базе систем объектно-ориентированного программирования [13, 14]. Главное окно программы имеет вид, представленный на рис. 5.

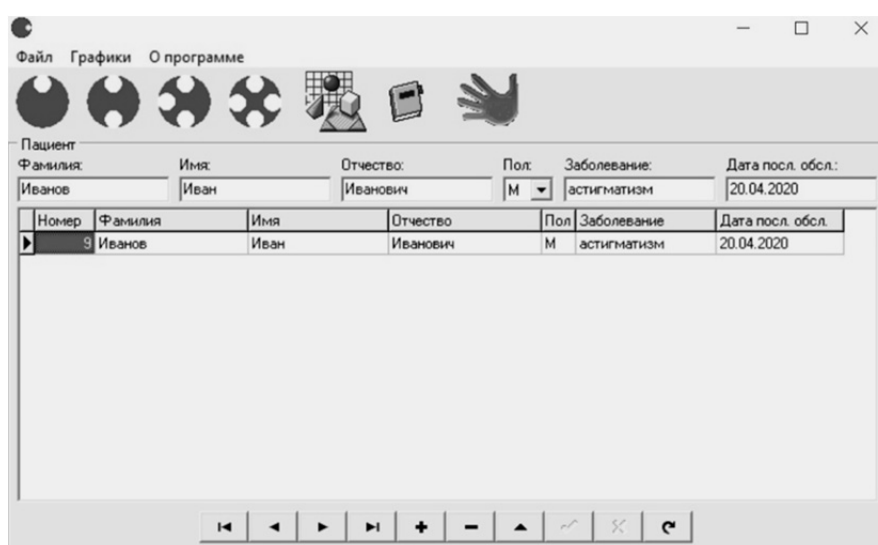


Рис. 5. Главное окно ПО

Fig. 5. The main software window

Для удобства дальнейшего анализа данных, а также большей наглядности при определении параметров в программном обеспечении предусмотрено также построение графических зависимостей времени реакции обследуемых от физических размеров и изменения положения составляющих опто типа. Алгоритм построения графиков представлен на рис. 6.

Разработанное ПО позволяет проводить статистическую оценку показаний по пациентам с течением времени, осуществлять хранение, вывод на печать отчетов по любому пациенту, построение графиков зависимости времени реакции от размеров и положения опто типов (рис. 7).

Понятно, что от адекватности исследования во многом будет зависеть объективность экспертизы. Однако в экспертной практике часто приходится сталкиваться с элементами аггравации либо симуляции зрительных функций. Обычно в таких случаях для исключения запоминания опто типов строки таблицы Сивцева – Головина располагают не в порядке возрастания остроты зрения, а в рандомизированном варианте. Этот же принцип был использован при выдаче программой элементов опто типа на экране монитора.

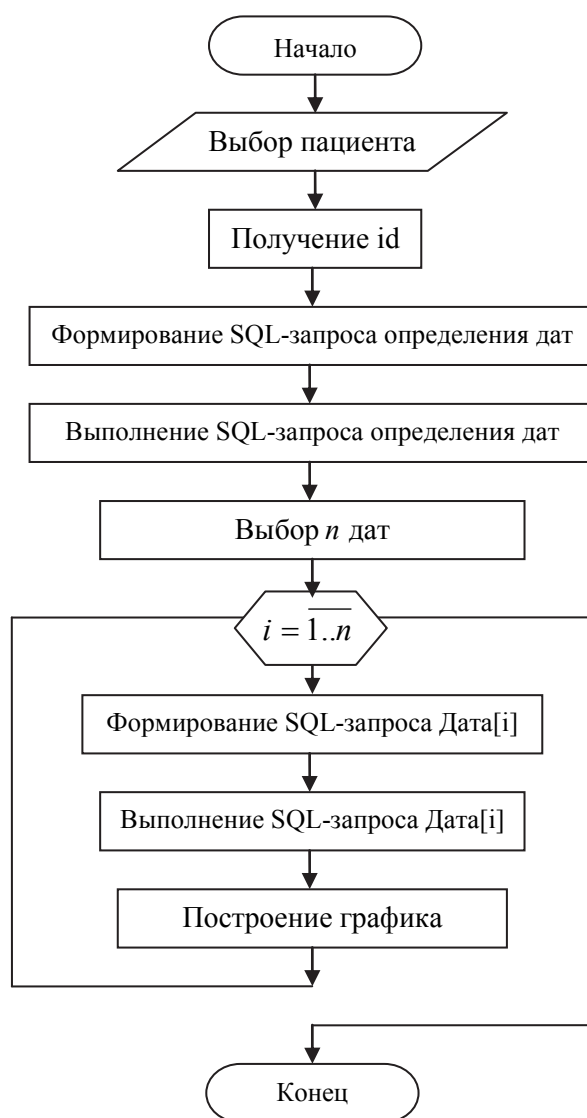


Рис. 6. Алгоритм построения графиков

Fig. 6. Algorithm for plotting

В программе имеется несколько режимов исследования: определение нахождения малой окружности опто типа и уменьшения ее, а также регистрация времени реакции обследуемого на изменение положения и размера опто типа [17, 18]. Тем самым мы получаем точную картину пространственно-временных способностей зрительной системы диспетчера в соответствии с информационными процессами в его профессиональной деятельности.

Разработанное специализированное ПО синхронизировано с матрицей важности информационных процессов (1), позволяет проводить мониторинг состояния зрительной системы специалистов с высокой профессиональной информативной нагрузкой и создавать информационное пространство, наиболее оптимальное и адаптированное для зрительных аппаратов конкретных диспетчеров-операторов.

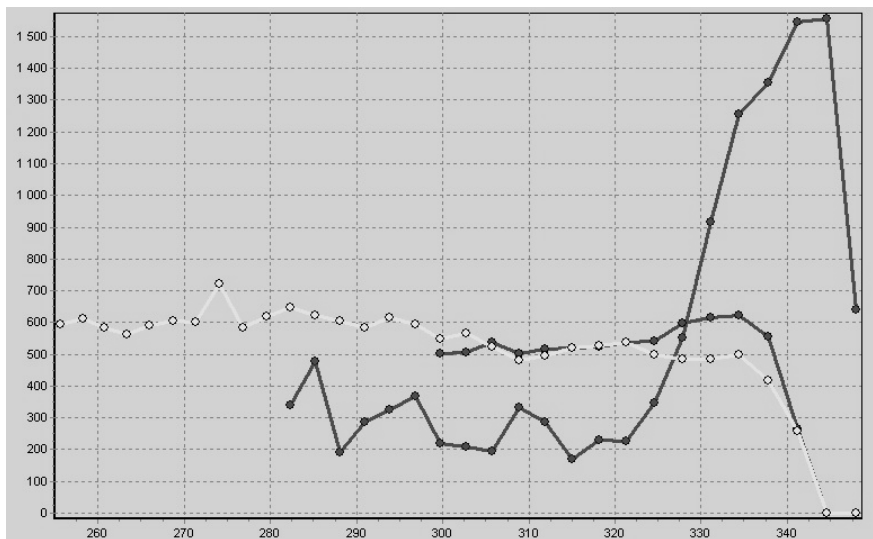


Рис. 7. Графики зависимости времени реакции от физических размеров опто типов

Fig. 7. Graphs of the dependence of the reaction time on the physical dimensions of optotypes

Проведены экспериментальные исследования разработанной методики. Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

**Результаты проведения тестов № 1–4**

**Results of tests No. 1–4**

№	Оператор пульта	Тест № 1	Тест № 2	Тест № 3	Тест № 4
1	Испытуемый № 1	8,13	25,12	88,45	10,56
2	Испытуемый № 2	6,2	20,48	74,15	47,45
3	Испытуемый № 3	5,4	21,45	72,11	17,15
4	Испытуемый № 4	8,45	60,12	78,45	33,12
5	Испытуемый № 5	7,4	23,14	56,1	24,5
6	Испытуемый № 6	6,12	15,1	78,45	42,1
7	Испытуемый № 7	6,2	14,8	34,1	7,5

Для проверки зависимости определения нахождения опто типа в пространстве от временной задержки оператора используем четырехвекторную систему (вверх, вниз, влево, вправо) как самую простую и позволяющую про-



вести предварительный анализ зрительной активности исследуемого. Данные экспериментальных исследований по зависимости определения нахождения опто типа в четырехвекторной системе от временной задержки оператора приведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

#### Пространственно-временные параметры при проведении теста № 4

##### Space-time parameters when carrying out test No. 4

№	Оператор пульты	Пространственная ориентация	Тест № 4 при 16–28	Временная задержка (мс)	Тест № 4 при 80–92	Временная задержка (мс)
1	Испытуемый № 3	$a_{11}$	16	580	80	520
		$a_{12}$	20	590	84	602
		$a_{21}$	24	650	88	630
		$a_{22}$	28	455	92	430
2	Испытуемый № 7	$a_{11}$	16	312	80	300
		$a_{12}$	20	287	84	250
		$a_{21}$	24	250	88	212
		$a_{22}$	28	302	92	340

Данные, приведенные в табл. 2, наглядно показывают, что у испытуемого № 3 фокусировка зрительного анализатора и реакция нажатия пульты хуже на  $\approx 35\%$ , также по испытуемому № 7 можно проанализировать и установить, что в области  $a_{21}$  он показывает наилучшие результаты.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный способ позволит значительно снизить риск осуществляемых ошибок и допущения неточностей в работе диспетчеров и операторов, что имеет весомое значение для экономики страны, так как от любой ошибки может пострадать огромное количество людей и производственных процессов. Кроме того, программное обеспечение позволяет вести статистику данных и показателей и вводить данные в единую информационную базу, что облегчит обследование в дальнейшем и предоставит возможность отслеживать динамику развития патологий.

Результаты, полученные в ходе выполнения исследований, могут широко использоваться в различных сферах производств с высокой информативной нагрузкой информационных процессов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкундин С.З., Берикашвили В.Ш. Теория информационных процессов и систем. – М.: Горная книга, 2012. – 474 с.
2. Сидоренко Е.И. Офтальмология. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2018. – 656 с.
3. Патент 2646395 Российская Федерация. Устройство для профессионального отбора и начального обучения операторов систем слежения / А.Г. Коротеев, В.Н. Овчаров. – № 2016141871; заявл. 25.10.2016; опубл. 02.03.2018.
4. Патент 1560098А1 Российская Федерация. Устройство для исследования динамического тремора / Н.А. Корневский. – № 4436298; заявл. 03.06.1988; опубл. 30.04.1990.
5. Патент 11607U1 Российская Федерация. Установка для определения степени моторной асимметрии человека (треморметр) / А.В. Косолапов, Е.М. Бердичевская, М.Ф. Игнатъев, А.В. Власюк. – № 99104204/20; заявл. 02.03.1999; опубл. 16.10.1999.
6. Патент 2008801 Российская Федерация, МПК А 61 В 5/16. Устройство для исследования координации движения / В.И. Матвеев. – № 4771781/14; заявл. 20.12.1989; опубл. 15.03.1994.
7. Патент 2146494 С1. Способ диагностики двигательных функций человека и устройство для его реализации / Б.Х. Базиян, И.Э. Дмитриев. – № 99105342/14; заявл. 24.03.1999; опубл. 20.03.2000.
8. Забуга А.А. Теоретические основы информатики. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 168 с.
9. Мирзоев М.С. Основы математической обработки информации. – М.: Прометей, 2016. – 316 с.
10. Информатика и медицинская статистика / под ред. Г.Н. Царик. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2017. – 304 с.
11. Конструирование канонических информационных моделей для интегрированных информационных систем / В.Н. Захаров, Л.А. Калининченко, И.А. Соколов, С.А. Ступников // Информатика и ее применения. – 2007. – Т. 1, вып. 2. – С. 15–38.
12. Веретельникова Е.Л. Теоретическая информатика. Доказательство правильности. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 51 с.
13. Волкова И.А., Иванов А.В., Карпов Л.Е. Основы объектно-ориентированного программирования. Язык программирования С++. – М.: МАКС Пресс, 2011. – 112 с.
14. Абрамян М.Э. Введение в стандартную библиотеку шаблонов С++. – Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2017. – 178 с.
15. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – 5-е изд. – М.: Физматлит, 2010. – 560 с.
16. Патент на полезную модель 18911 Российская Федерация. Тест-объект для визометрии / А-Г.Д. Алиев, М.И. Исмаилов, М.А. Алиева, А.Г. Алиев. – № 2001104237/20; заявл. 20.02.2001; опубл. 10.08.2001.
17. Гафуров К.А., Биячуева Л.А., Исмаилов М.И. Разработка аппаратно-программного комплекса для лиц с особенностями профессиональной деятельности // Материалы 65-й Всероссийской юбилейной научной конференции молодых ученых и студентов с международным участием. – Махачкала, 2017. – С. 77–78.
18. Гафуров К.А., Биячуева Л.А., Исмаилов М.И. Медицинская информационная система для офтальмологических исследований остроты зрения // Сборник материалов II Терапевтического форума «Мультидисциплинарный больной», II Всероссийской конференции молодых терапевтов. – М.: КСТ Интерфорум, 2018. – С. 43–44.

*Гафуров Керим Абсаламович*, кандидат технических наук, доцент кафедры физики, информатики и медаппаратуры Дагестанского государственного медицинского университета. Основное направление научных исследований: информатика, медицинские технологии, информационные технологии. Имеет более 150 публикаций, из них 10 патентов на изобретения.

*Gafurov Kerim A.*, PhD (Eng.), associate professor at the department of physics, informatics and medical equipment Dagestan State Medical University. The main area of his scientific research is informatics, medical technology, and information technology. He is the author of over 150 publications, including 10 patents for inventions.

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-95-108

***Study of conformity between information processes and vision of specialists in systems with a high professional information load\****

K.A. GAFUROV

*Daghestan State Medical University, 1 pl. Lenin, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russian Federation**gafurovkerim@mail.ru***Abstract**

In our age of high speeds, the human body receives a very heavy load on the organs of vision, thereby increasing the likelihood of deterioration in their work. As a result, people lose their vision, they distinguish simple and complex objects worse, spend more time recognizing signs, symbols, letters that they previously saw and distinguished much faster and easier. For most professions, this circumstance is not critical, but there are a number of areas of human activity where the visual factor is of paramount importance. First of all, this applies to the work on monitoring equipment that dispatchers, operators and controllers are associated with. Working under constant visual stress requires a high motor activity of the oculomotor system, visual acuity and high cognitive abilities.

Thus, an important task is to identify and constantly monitor visual reflexes of dispatchers operating in conditions of high visual and information load.

There are many different methods and means that are aimed at determining the acuity of a person's vision. But most of them are presented in the form of paper diagrams and pictures, which does not allow for a comprehensive assessment of the state of visual acuity.

Thus, the aim of the study is to develop a technology for analyzing the correspondence of information processes and the operation of the visual system among specialists with a high professional information load.

To determine information components of the operator's work cycle, the information field was represented in the form of a matrix of elements in which each element is assigned its own weight, which determines the importance of the information process located at a given point in the operator's information field. To accurately determine visual acuity, a test object and a corresponding table for visometry were selected.

A study of the conformity between information processes and vision of specialists in systems with a high professional information load was carried out using the developed specialized software.

The developed software is based on scaling and measuring the response time to changes in the position of the diagnostic test object. The software allows you to store and edit data, perform their statistical analysis and sorting. The program has several research modes, namely determining the location of a small circle of the optotype and reducing it, as well as recording the response time of the subject to changes in the position and size of the optotype. Thus, we get an accurate picture of the space-time abilities of the visual system of the dispatcher in accordance with information processes in his professional activity. The developed specialized software is synchronized with the matrix of importance of information processes, allows monitoring the state of the visual system of specialists with a high professional information load and creating an information space that is the most optimal and adapted to the visual apparatus of dispatchers and operators.

Experimental studies of the developed technique were carried out. The developed method will significantly reduce the risk of errors and inaccuracies in the work of dispatchers and operators, which is of significant importance for the country's economy, since any error can affect a huge number of people and production processes. In addition, the software allows you to keep statistics of data and indicators and enter them into a single information base, which will facilitate the examination in the future and provide an opportunity to track the dynamics of pathologies. The results obtained during the study can be widely used in various areas of production with a high information load.

**Keywords:** information processes, informative load, object-oriented programming, matrix, dispatcher, monitoring, visometry, optotype

**REFERENCES**

1. Shkundin S.Z., Berikashvili V.Sh. *Teoriya informatsionnykh protsessov i sistem* [Theory of information processes and systems]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2012. 474 p.

---

\* Received 27 January 2020.

2. Sidorenko E.I. *Oftal'mologiya* [Ophthalmology]. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2018. 656 p.
3. Koroteev A.G., Ovcharov V.N. *Ustroistvo dlya professional'nogo otbora i nachal'nogo obucheniya operatorov sistem slezheniya* [Device for professional selection and initial training of operators of tracking systems]. Patent RF, no. 2646395, 2018.
4. Korenevskii N.A. *Ustroistvo dlya issledovaniya dinamicheskogo tremora* [Device for examining kinetic tremor]. Patent RF, no. 1560098A1, 1990.
5. Kosolapov A.V., Berdichevskaya E.M., Ignat'ev M.F., Vlasyuk A.V. *Ustanovka dlya opredeleniya stepeni motornoj asimetrii cheloveka (tremorometr)* [Installation for determining the degree of human motor asymmetry (tremorometer)]. Patent RF, no. 11607U1, 1999.
6. Matveev V.I. *Ustroistvo dlya issledovaniya koordinatsii dvizheniya* [Device for testing coordination of movements]. Patent RF, no. 2008801, 1994.
7. Baziyan B.Kh., Dmitriev I.E. *Sposob diagnostiki dvigatel'nykh funktsii cheloveka i ustroistvo dlya ego realizatsii* [A method for diagnosing human motor functions and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2146494 C1, 2000.
8. Zabuga A.A. *Teoreticheskie osnovy informatiki* [Theoretical foundations of computer science]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2013. 168 p.
9. Mirzoev M.S. *Osnovy matematicheskoi obrabotki informatsii* [Fundamentals of mathematical information processing]. Moscow, Prometei Publ., 2016. 316 p.
10. Tsarik G.N., ed. *Informatika i meditsinskaya statistika* [Informatics and medical statistics]. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2017. 304 p.
11. Zakharov V.N., Kalinichenko L.A., Sokolov I.A., Stupnikov S.A. *Konstruirovaniye kanonicheskikh informatsionnykh modelei dlya integrirovannykh informatsionnykh sistem* [Development of canonical information models for integrated information systems]. *Informatika i ee primeneniya = Informatics and Applications*, 2007, vol. 1, iss. 2, pp. 15–38.
12. Veretel'nikova E.L. *Teoreticheskaya informatika. Dokazatel'stvo pravil'nosti* [Theoretical informatics. Proof of correctness]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016. 51 p.
13. Volkova I.A., Ivanov A.V., Karpov L.E. *Osnovy ob"ektno-orientirovannogo programmirovaniya. Yazyk programmirovaniya C++* [The basics of object-oriented programming. C++ programming language]. Moscow, MAKS Press Publ., 2011. 112 p.
14. Abramyan M.E. *Vvedenie v standartnyuyu biblioteku shablonov C++* [An introduction to the C++ standard template library]. Rostov-on-Don, Southern Federal University Publ., 2017. 178 p.
15. Gantmakher F.R. *Teoriya matrits* [Matrix theory]. 5<sup>th</sup> ed. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 560 p.
16. Aliev A.-G.D., Ismailov M.I., Alieva M.A., Aliev A.G. *Test-ob"ekt dlya vizometrii* [Test object for visometry]. Patent RF, no. 18911, 2001.
17. Gafurov K.A., Biyachueva L.A., Ismailov M.I. [Development of a hardware-software complex for persons with special features of professional activity]. *Materialy 65-i Vserossiiskoi yubileinoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh i studentov s mezhdunarodnym uchastiem* [Materials of the 65th All-Russian Anniversary Scientific Conference of Young Scientists and Students with International Participation]. Makhachkala, 2017, pp. 77–78. (In Russian).
18. Gafurov K.A., Biyachueva L.A., Ismailov M.I. [Medical information system for ophthalmological studies of visual acuity]. *Sbornik materialov II Terapevticheskogo foruma "Multidistsiplinarnyi bol'noi", II Vserossiiskoi konferentsii molodykh terapevtov* [Collection of materials of the II Therapeutic Forum "Multidisciplinary Patient", II All-Russian Conference of Young Therapists]. Moscow, KST Interforum Publ., 2018, pp. 43–44. (In Russian).

Для цитирования:

Гафуров К.А. Исследование соответствия информационных процессов и зрения специалистов в системах с высокой профессиональной информативной нагрузкой // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 2–3 (79). – С. 95–108. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-95-108.

For citation:

Gafurov K.A. Issledovanie sootvetstviya informatsionnykh protsessov i zreniya spetsialistov v sistemakh s vysokoi professional'noi informativnoi nagruzkoj [Study of conformity between information processes and vision of specialists in systems with a high professional information load]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 2–3 (79), pp. 95–108. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-95-108.

УДК 621.311

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-109-122

## Оценка составляющих перерасхода топлива теплоэнергетического оборудования\*

А.И. ДВОРЦЕВОЙ<sup>а</sup>, О.К. ГРИГОРЬЕВА<sup>б</sup>, И. А. ТИХОНОВ<sup>с</sup>

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

<sup>а</sup> [dvorcevoj@corp.nstu.ru](mailto:dvorcevoj@corp.nstu.ru) <sup>б</sup> [o.grigoreva@corp.nstu.ru](mailto:o.grigoreva@corp.nstu.ru) <sup>с</sup> [i.tixonov@corp.nstu.ru](mailto:i.tixonov@corp.nstu.ru)

Использование традиционных информационных систем с низким уровнем автоматизации на тепловых электрических станциях не позволяет организовать канал для удаленного сбора достоверной информации о текущем состоянии технологических процессов. Отсутствие возможности организовать передачу данных в центральный узел для последующего хранения и обработки не позволяет в полной мере отслеживать необходимость ремонта или модернизации оборудования. При таких условиях увеличение показателей эффективности электростанции либо невозможно, либо относительно мало. Значимого увеличения показателей эффективности можно добиться, определяя наименее экономичные элементы или участки технологического процесса, что становится возможным при использовании комплексного сбора данных с приборов учета и их анализа.

При наличии цифрового канала связи данные с первичных приборов учета технологических процессов предприятий (расход, давление, температура, уровень, напряжение и т. д.) могут передаваться в единый информационно-аналитический центр. На основе накопленных данных с помощью цифрового двойника предприятия рассчитываются реальные технико-экономические показатели и вредные выбросы, выполняются прогнозные расчеты по экономической эксплуатации оборудования и внедрению новых технологий. При достаточном количестве приборов учета хранение данных позволяет анализировать состояние как оборудования, так и технологического процесса в различные моменты времени без необходимости воздействовать на работающее оборудование.

Часть информационных функции АСУ ТП, которые сейчас выполняются локально на ТЭС, можно выполнять удаленно. К ним можно отнести такие функции, как регистрация событий, информационно-вычислительные и аналитические функции, архивирование информации, протоколирование информации (составление отчетов). Анализируя данные о ходе технологического процесса за определенный период (месяц, квартал, год и т. д.), можно судить об эффективности работы внедренного оборудования и говорить о целесообразности и направлениях дальнейшей модернизации тепловой электрической станции.

**Ключевые слова:** удаленный аудит, анализ данных, облачные вычисления, перерасход топлива, колебания параметров, режимы работы теплоэнергетического оборудования, методика декомпозиции, эффективность энергоблока, АСУ ТП

---

\* Статья получена 03 февраля 2020 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Рассматривается подход удаленного аудита теплоэнергетического оборудования на базе облачных вычислений. В качестве примера приводится анализ работы энергоблока при отклонении регулируемых параметров, что вызывает появление перерасхода топлива. Колебания параметров энергоблоков во всех случаях связаны с изменением их нагрузки. Возникающие при этом перерасходы топлива обусловлены двумя основными причинами: во-первых, изменением потребляемого количества энергии, во-вторых, особенностями оборудования, его состояния и режима работы. Колебания параметров за счет включения / выключения потребляющих энергию приборов, агрегатов и устройств вызывают появление той части перерасхода топлива, которая является «платой за качество» энергии и не может быть уменьшена. Доля перерасхода, связанного с режимом работы и состоянием оборудования, может быть сокращена, так как именно эта часть перерасхода характеризует возможное повышение эффективности энергоблоков при наличии колебаний его параметров.

Традиционно аудит оборудования на тепловых электрических станциях выполняется периодически либо штатными специалистами предприятия, либо внешними специалистами проектных организаций. Такой подход имеет ряд ограничений, связанных с анализом данных на выборке данных за определенный период времени, с ограничением вычислительных мощностей и используемым программным обеспечением на станции. Эти ограничения можно снять за счет передачи необходимых данных за периметр предприятия на более мощные вычислительные ресурсы, где можно применить последние достижения в области информационных технологий.

Развитие облачных вычислений (масштабируемых вычислительных ресурсов) в последние годы привело к тому, что издержки, связанные с их обслуживанием, стали меньше по сравнению с издержками на вычислительные ресурсы в периметре предприятия. Возможности облачных вычислений значительно превышают возможности, которыми обладает отдельное энергетическое предприятие.

При делегировании информационных функции АСУ ТП на облачные вычисления предприятие получает следующие преимущества:

- снижаются затраты на поддержку соответствующей инфраструктуры;
- снижаются риски потери данных;
- диагностика технологических процессов выполняется в автоматическом режиме;
- разрабатываются рекомендации по повышению эффективности предприятия квалифицированными специалистами. Применение современных подходов к съему, передаче и обработке данных на базе информационных технологий позволяет расширить спектр решаемых задач и снизить издержки на аудит оборудования. Это достигается за счет повышения качества и объема информации, методов обработки собранных данных, знаний эксплуатационно-обслуживающего персонала.

Облачные вычисления находят широкое применение в разных областях знаний. В настоящей статье рассматриваются варианты использования облачных вычислений применительно к удаленному аудиту теплоэнергетического оборудования, а именно к оценке величины перерасхода топлива на основе значений регулируемых параметров.

## 1. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПЕРЕРАСХОДА ТОПЛИВА

Одним из путей снижения величины расхода топлива является повышение коэффициента полезного действия станции по отпуску электроэнергии.

Используем положение о декомпозиции энергоблока и представлении его в виде элементов [1], каждый из которых является самостоятельно функционирующей частью. Связи между полученными элементами определяются перетоками сред и энергии (к ним относятся топливо, воздух, пар, вода, электроэнергия, механическое движение и прочее). При таком разбиении и с использованием методики для определения коэффициента полезного действия по отпуску электроэнергии [2–10] можно получить выражение вида

$$\eta_N = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \varepsilon_S \varepsilon_N, \quad (1)$$

где  $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$  – коэффициенты полезного действия котельной части, части высокого давления турбины, частей среднего и низкого давления турбины, электрической части соответственно;  $\varepsilon_S$  – структурный коэффициент эксергетических связей ( $0 \leq \varepsilon_S \leq 1$ ), учитывающий взаимосвязи между функционирующими частями энерготехнологического блока;  $\varepsilon_N$  – эксергетический коэффициент внутрициклового возврата потерь теплоты в турбоагрегате ( $\varepsilon_N \geq 1$ ) [2–5].

КПД по отпуску электроэнергии и теплоты (как общий случай для энергоблока) определяют с использованием коэффициента структуры и коэффициента возврата теплоты. Для перерасхода топлива при отклонении значения регулируемого параметра [11–17] выражение выглядит следующим образом:

$$\Delta b_N \approx -b_N \left( \sum_{i=1}^4 \frac{1}{\eta_i} \frac{\partial \eta_i}{\partial x} + \frac{1}{\varepsilon_S} \frac{\partial \varepsilon_S}{\partial x} + \frac{1}{\varepsilon_N} \frac{\partial \varepsilon_N}{\partial x} \right) \Delta x, \quad (2)$$

где  $\Delta x$  – отклонение регулируемого параметра;  $\frac{\partial \eta_i}{\partial x}, \frac{\partial \varepsilon_S}{\partial x}, \frac{\partial \varepsilon_N}{\partial x}$  – частные производные каждого влияющего фактора, а 1–4 – функциональные элементы энергоблока, определяющие его КПД.

Суммарный удельный перерасход топлива при отклонении  $n$ -го количества параметров

$$\sum \Delta b_N = \sum_n \left( \frac{\partial b_N}{\partial x_n} \right) \Delta x_n. \quad (3)$$

Общий перерасход топлива при отпуске электроэнергии учитывает факторы, связанные с отклонением нагрузки энергоблока и его регулируемых параметров:

$$\Delta B_N = \Delta B_{\Delta x}^N + \Delta B_{\Delta N}^N. \quad (4)$$

Таким образом, величина  $\Delta B_{\Delta N}^N$  характеризует неснижаемую часть перерасхода топлива, возникающего при отклонении нагрузки, а величина  $\Delta B_{\Delta x}^N$  зависит от колебаний параметров, и ее значение можно снизить.

## 2. ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Реализация описанной выше методики расчета перерасхода топлива может быть реализована с использованием облачных вычислений.

Согласно определению Национального института стандартов и технологии США (NIST) «облачное вычисление» – это модель обеспечения повсеместного сетевого доступа по требованию к совместно используемому пулу конфигурируемых вычислительных ресурсов, которые можно быстро предоставить и внедрить с минимумом административных усилий или взаимодействия с сервис-провайдером [18].

Для использования облачных вычислений необходимо организовать канал передачи значений регулируемых параметров технологических процессов предприятия на вычислительные ресурсы. Для этого необходимо данные с первичных (полевых) приборов учета в виде физических единиц измерений (например, м<sup>3</sup>/ч, °С, МПа) преобразовать в электрические унифицированные сигналы (например, 4...20 мА) и затем оцифровать с помощью АЦП (аналого-цифрового преобразователя). Оцифрованная физическая величина может быть передана по любому открытому протоколу передачи данных. Для задач телеметрии наиболее широкое распространение получил протокол GPRS (General Packet Radio Service) на базе сотовых сетей GSM (Global System for Mobile Communications). Это позволяет мобильным сетям быть совместимыми с Internet. Однако у стандарта GPRS на базе GSM есть ряд ограничений по энергопотреблению конечных устройств и дальности передачи сигнала. В этой связи был разработан новый стандарт LPWAN (Low-power Wide-area Network), который имеет дальность передачи данных более 10 км при низком энергопотреблении, при этом данные передаются с низкой скоростью (~10 кбит/с), но для задач телеметрии такая скорость приемлема. Передача данных для удаленного аудита также может осуществляться по традиционным проводным каналам связи.

Таким образом, значения измеряемых параметров в цифровом виде передаются в облачные вычислительные ресурсы, которые находятся за периметром предприятия.

Рассмотрим основные типы облачных вычислительных ресурсов, которые предоставляются ведущими провайдерами в этой области и могут быть использованы для решения задач удаленного аудита: а) хранение данных; б) расчет математических моделей; в) предоставления результатов вычислений.

Рассмотрим варианты использования облачных вычислительных ресурсов более подробно.

1. Для хранения непрерывно поступающих данных с нормализатора от первичных приборов учета можно использовать как классические реляционные базы данных, так и специально адаптированные базы данных для хранения временных рядов (данных с меткой времени). На базе облачных ресурсов могут быть запущены сервисы для сбора данных с различных информационных систем как в периметре предприятия (SAP, 1С и т. д.), так и с различных внешних источников данных, которые находятся в открытом доступе для последующей обработки. При этом надежность хранения данных на облачных ресурсах выше, чем на серверах, расположенных в периметре предприятия, также снижаются издержки на обслуживание.



2. Для непрерывного расчета математических моделей на базе облачных вычислений предоставляются масштабируемые ресурсы, которые зависят от объема вычисления. Математические модели могут быть описаны на любом доступном языке программирования (Matlab, Python, C#, C++ и т. д.), а также могут использоваться различные вычислительные платформы – от Excel до узкоспециализированных расчетных комплексов. На вход математической модели или комплекса подается информация из базы данных, затем выполняется расчет (могут быть подключены другие математические модели для последовательного или параллельного вычисления), результаты расчета записываются в базу данных. Помимо использования математических моделей и расчетных комплексов можно использовать сервисы по машинному обучению, которые позволяют делать логические выводы на базе глубокого обучения, разрабатывать сервисы рекомендаций в режиме реального времени, применять предоставляемые библиотеки по искусственному интеллекту. Для хранения результатов расчета возможно использование документной базы данных.

По результатам расчетов могут быть сформированы отчеты о состоянии оборудования и технологических процессов, отправлены уведомления на телефон или электронную почту, для этого также предоставляются соответствующие сервисы.

3. Результаты вычислений могут быть представлены как в виде интерактивного пользовательского интерфейса (графики, таблицы и т. д.), так и в виде открытых форматов для межмашинного взаимодействия (XML (eXtensible Markup Language), JSON (Java Script Object Notation) и т. д.) через API (application programming interface), который располагается на облачных ресурсах.

Сервисы, предоставляемые на облачных ресурсах, постоянно расширяются. Например, уже сейчас доступны сервисы для работы с устройствами в концепции IoT, а именно: операционные системы, средства сбора и интерпретации данных, аналитические инструменты, дистанционное управление.

За счет масштабируемых облачных ресурсов практически снимаются ограничения на вычислительные ресурсы, объемы хранения информации. На базе облачных вычислений и накопленных данных появляется возможность выполнять аналитические, статистические, прогнозные и оптимизационные вычисления.

За счет высококонкурентной среды провайдеры облачных технологий снижают барьер внедрения передовых сквозных технологий. Это позволяет не только снизить издержки на решение стандартных вычислительных задач, но и разрабатывать новые подходы взаимодействия для заинтересованных сторон, представителей власти, науки и бизнеса.

### **3. ВАРИАНТ РЕАЛИЗАЦИИ УДАЛЕННОГО АУДИТА**

Описанная методика оценки перерасхода топлива реализована в качестве расчетного блока на языке программирования C#. Данный блок располагается на удаленном вычислительном ресурсе. Реализация удаленного аудита представлена на рис. 1.

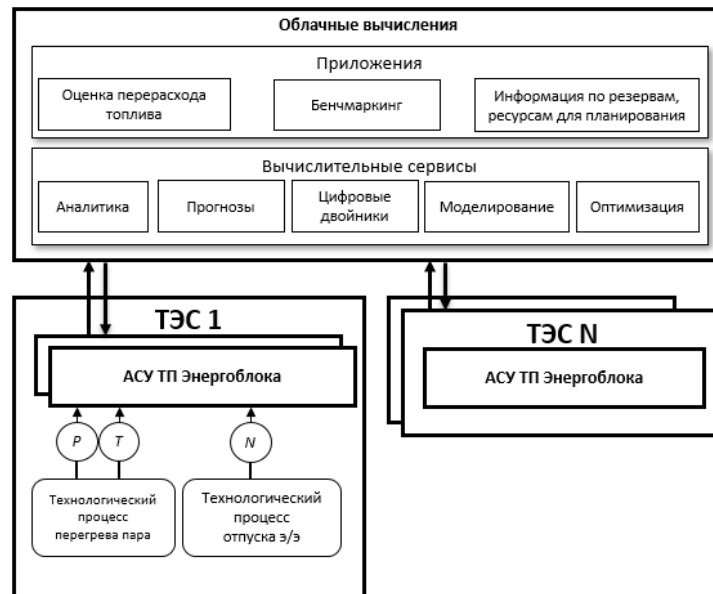


Рис. 1. Схема реализации удаленного аудита

Fig. 1. A scheme for implementing remote audit

На рис. 1 представлена обобщенная схема использования облачных вычислений. Объем передаваемых данных может быть любой, ограничением является только канал передачи данных.

На облачных вычислительных ресурсах располагаются сервисы, которые выполняют работу над поступающими данными, а также приложения, которые представляют собой математические модели и пользовательский интерфейс.

В рассматриваемом примере для оценки перерасхода топлива необходимо передать на удаленные вычислительные ресурсы три основных параметра: температуру и давление перегретого пара (параметры  $T$  и  $P$  на рис. 1), текущую мощность энергоблока (параметр  $N$  на рис. 1). Информационные системы тепловой электрической станции на периодической основе передают данные для удаленного аудита.

Ниже представлены результаты вычислений на основе собранных данных с энергоблока на базе паровой турбины К-215-130.

За основу взяты данные ночного провала, набора и сброса нагрузки. Рассматривалось отклонение от номинальных значений температуры и давления свежего пара при заданной электрической мощности. Для параметров определялись относительные значения:

$$x_i = \frac{x_{\text{тек}}}{x_{\text{ном}}}, \quad (5)$$

где  $x_{\text{тек}}$ ,  $x_{\text{ном}}$  – текущие и номинальные значения параметра;  $i$  – вид параметра (давление, температура и т. п.).

Номинальный расход топлива определяют по функциональной зависимости

$$B_{\text{НОМ}} = f(x_{\text{НОМ}}; N_{\text{ТЕК}}), \quad (6)$$

где  $N_{\text{ТЕК}}$  – текущее значение электрической мощности.

Отклонение  $x_i$  больше единицы свидетельствует о превышении параметров номинального значения. В случае относительного расхода топлива больше единицы энергоблок будет работать с перерасходом топлива, а отклонение меньше единицы – с экономией. На рис. 2–4 показано влияние отклонения каждого параметра на изменение расхода топлива при нагрузках 125, 185 и 210 МВт.

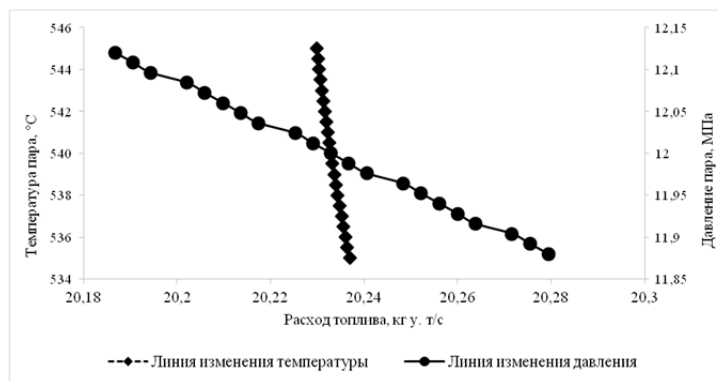


Рис. 2. Изменение расхода топлива при отклонении параметра от номинального значения для энергоблока на базе турбины К-215 при нагрузке 125 МВт

Fig. 2. Change in fuel consumption when the parameter deviates from the nominal value for a power unit based on the K-215 turbine at a load of 125 MW

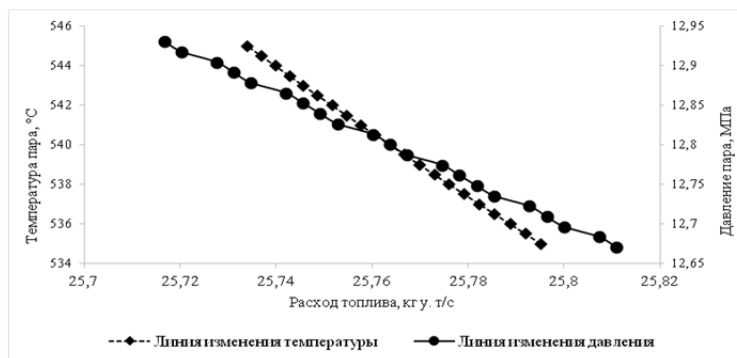


Рис. 3. Изменение расхода топлива при отклонении параметра от номинального значения для энергоблока на базе турбины К-215 при нагрузке 185 МВт

Fig. 3. Change in fuel consumption when the parameter deviates from the nominal value for a power unit based on the K-215 turbine at a load of 185 MW

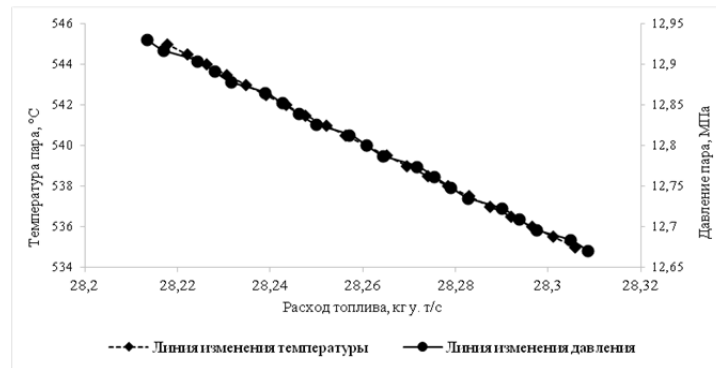


Рис. 4. Изменение расхода топлива при отклонении параметра от номинального значения для энергоблока на базе турбины К-215 при нагрузке 210 МВт

Fig. 4. Change in fuel consumption when the parameter deviates from the nominal value for a power unit based on the K-215 turbine at a load of 210 MW

Нагрузка исследуемого энергоблока мощностью 125 МВт соответствует прохождению «ночного провала», рис. 5. При этом наблюдаются одновременные отклонения давления и температуры перегретого пара от номинальных значений, что вызывает перерасход топлива в 1,7 %.

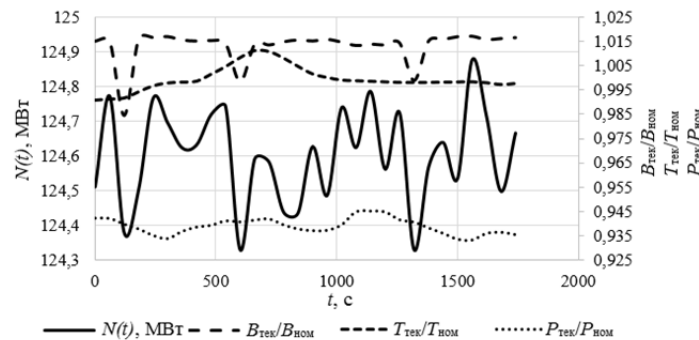


Рис. 5. Параметры работы энергоблока К-215 при «ночном провале» электрической нагрузки

Fig. 5. Operating parameters of the K-215 power unit during the night off-peak load

Для режима набора нагрузки (рис. 6) характерны как положительные (соответствует избыточному расходу топлива), так и отрицательные значения перерасхода топлива (что соответствует экономии топлива). На рисунке представлены фактические данные работы энергоблока, и в соответствии с ними отклонения давления составляют от  $-2$  до  $+0,5$  %, отклонения температуры от  $-1,2$  до  $+2,2$  %, что вызывает экономию/перерасход топлива от  $-0,5$  до  $+0,6$  %. В среднем по режиму величина  $\frac{B_{\text{тек}}}{B_{\text{ном}}}$  принимает значения на уровне единицы и не зависит от давления и температуры.

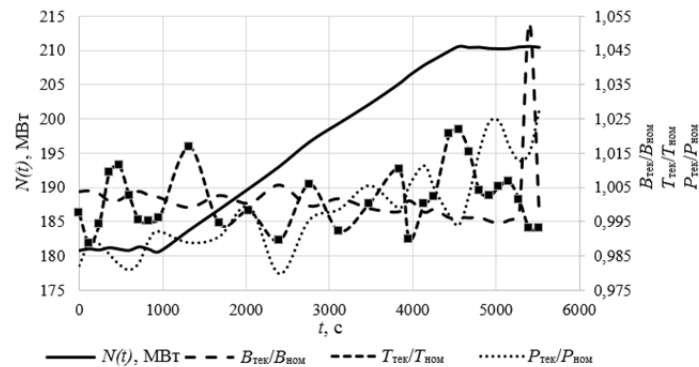


Рис. 6. Параметры работы энергоблока К-215 при наборе нагрузки

Fig. 6. Operating parameters of the K-215 power unit when the load is increased

Таким образом, при неизменной нагрузке в случае «ночного провала» наблюдается составляющая перерасхода  $\Delta B_{\Delta x}^N$ , зависящая от внутренних возмущений параметров, а при сбросе и наборе нагрузки появляется составляющая перерасхода  $\Delta B_{\Delta N}^N$ , на которую влияют изменения нагрузки.

Для рассмотренных трех режимов работы энергоблока (210, 185 и 125 МВт) были проведены расчеты по определению влияния отклонения температуры питательной воды на перерасход топлива (рис. 7).

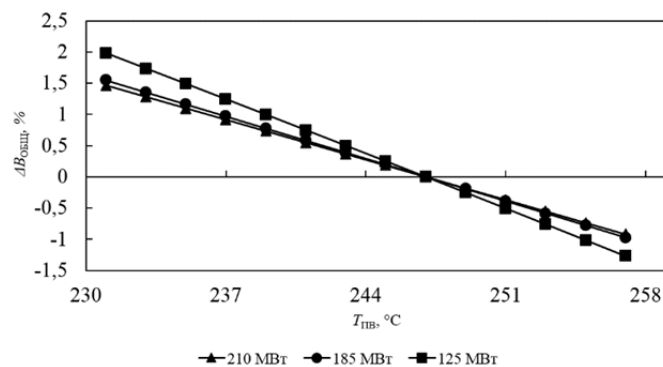


Рис. 7. Зависимость перерасхода топлива от температуры питательной воды при работе энергоблока на различных нагрузках

Fig. 7. Dependence of an excess fuel flow on the feed water temperature when the power unit is operating under different loads

По рис. 7 можно сделать вывод, что с увеличением температуры питательной воды перерасход уменьшается. При различных нагрузках энергоблока крутизна линии изменяется, и чем меньше нагрузка, тем более существенно отклонение температуры питательной воды влияет на перерасход топлива и, как следствие, общий расход топлива.

Влияние температуры перегретого пара и температуры питательной воды на перерасход топлива различается при разных нагрузках. Так, при нагрузке в 215 МВт доля перерасхода, вызванная отклонением температуры перегретого пара, составляет 0,23 % от расхода топлива, при этом аналогичное отклонение температуры питательной воды (отклонение на 1 % от номинального значения) приводит к появлению перерасхода на уровне 0,18 %. Для нагрузки в 185 МВт увеличение расхода топлива составляет 0,21 % и 0,19 % соответственно для отклонения температуры перегретого пара и температуры питательной воды. При работе энергоблока с низкой нагрузкой (125 МВт) влияние отклонения параметров уменьшается и начинает преобладать часть перерасхода, вызванная колебаниями температуры питательной воды (0,25 % от общего расхода топлива) над составляющей перерасхода, зависящей от температуры перегретого пара (0,06 %).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представлена методика, которая при отклонении параметров от номинальных значений учитывает факторы сброса и наборы нагрузки, а также работу при неизменной нагрузке.

2. Выполнен обзор вариантов использования облачных технологий для удаленного аудита.

3. Представлен результат удаленного аудита перерасхода топлива энергоблока на базе турбины К-215-130. В анализе указано, что существует обратная зависимость величины расхода топлива и отклонения давления или температуры острого пара, а также выявлена зависимость перерасхода топлива от мощности энергоблока при отклонении регулируемых параметров.

4. При анализе режимов работы энергоблока было выявлено, что в режиме «ночного провала» отклонение давления и температуры острого пара обуславливают перерасход топлива на уровне 1,7 %.

5. При различных нагрузках энергоблока одно и то же отклонение температуры питательной воды приводит к различному отклонению перерасхода топлива от 1,46 % при номинальной нагрузке до 1,98 % при нагрузке в 125 МВт.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ноздренко Г.В. Эффективность применения в энергетике КАТЕКа экологически перспективных энерготехнологических блоков электростанций с новыми технологиями использования угля: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НЭТИ, 1992. – 249 с.

2. Дворцовой А.И. Эксергетический анализ влияния параметров регулирования пылеугольных теплофикационных энергоблоков на перерасход топлива: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2010. – 144 с.

3. Техничко-экономическая эффективность энергоблоков ТЭС / В.С. Ларионов, Г.В. Ноздренко, П.А. Щинников, В.В. Зыков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – 31 с.

4. Андрущенко А.И. Показатели эффективности сложных систем энергоснабжения и взаимосвязь между ними // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: материалы Четвертой российской научно-технической конференции. – Ульяновск, 2003. – С. 12–14.

5. Nolan K.E., Guibene W., Kelly M.Y. An evaluation of low power wide area network technologies for the internet of things // International Wireless Communications and Mobile

Computing Conference (IWCMC). – Paphos, Cyprus, 2016. – P. 439–444. – DOI: 10.1109/IWCMC.2016.7577098.

6. Внедрение элементов цифровой экономики в электроэнергетике / А.Г. Филимонов, Н.Д. Чичирова, А.А. Чичиров, А.А. Филимонова // Надежность и безопасность энергетики. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 94–102.

7. *Грбчак Е.П.* Оценка технического состояния энергетического оборудования в условиях цифровой экономики // Надежность и безопасность энергетики. – 2017. – Т. 10, № 4. – С. 268–274.

8. *Мищеряков С.В.* Цифровая оценка надежности производственной системы субъектов энергетики // Надежность и безопасность энергетики. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 109–116.

9. *Андрющенко А.И.* Методика расчета эксергетической эффективности технологических процессов и производств. – Саратов: СрПИ, 1989. – 151 с.

10. *Горшков А. С.* Техничко-экономические показатели тепловых электрических станций / А. С. Горшков. – Москва: Энергия, 1974. – 240 с.

11. *Dvortsevov A., Tikhonov I.* Factors affecting the excess fuel flow at thermal power plants // 2016 11th International forum on strategic technology, June 1–3, 2016, Novosibirsk, Russia: proceedings of IFOST-2016. – Novosibirsk, 2016. – Pt. 3. – P. 131–135.

12. The advanced steam and gas technology / P.A. Shchinnikov, G.V. Nozdrenko, O.K. Grigoryeva, A.A. Kuryanov // Journal of Engineering Thermophysics. – 2014. – Vol. 23, iss. 3. – P. 229–235. – DOI: 10.1134/S1810232814030060.

13. *Щинников П.А., Дворцовой А.И.* Анализ влияния параметров регулирования теплофикационных энергоблоков на перерасход топлива // Теплоэнергетика. – 2011. – № 10. – С. 41–44.

14. *Тихонов И.А., Дворцовой А.И.* Анализ влияния перерасхода топлива на технико-экономические показатели пылеугольных теплофикационных энергоблоков // Электротехника. Электротехнология. Энергетика, ЭЭЭ-2015: сборник научных трудов VII Международной научной конференции молодых ученых. – Новосибирск, 2015. – Ч. 3. – С. 412–415.

15. *Щинников П.А., Дворцовой А.И.* Анализ влияния параметров регулирования теплофикационных энергоблоков на расход топлива // Проблемы региональной энергетики. – 2011. – № 1 (15). – С. 49–55.

16. *Тихонов И.А., Щинников П.А., Дворцовой А.И.* Модель расчета перерасхода топлива при различных типах нагрузки // Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: сборник научных трудов. – Саратов, 2016. – Вып. 8: Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов: материалы 13 междунар. науч.-техн. конф., Саратов, 1–3 ноября 2016 г. – С. 150–154.

17. *Щинников П.А., Ноздренко Г.В.* Использование вычислительного комплекса ОРТЭС для технико-экономических исследований ТЭС // Научный вестник НГТУ. – 2005. – № 1 (19). – С. 51–62.

18. NIST Cloud Computing Standards Roadmap / National Institute of Standards and Technology. – URL: <https://www.nist.gov/publications/nist-cloud-computing-standards-roadmap> (accessed: 16.10.2020).

*Дворцовой Александр Игоревич*, кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – влияние отклонения параметров на технико-экономические показатели энергоблоков. Имеет более 40 публикаций. E-mail: [dvorcevoj@corp.nstu.ru](mailto:dvorcevoj@corp.nstu.ru)

*Григорьева Оксана Константиновна*, кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций Новосибирского государственного технического университета. Основные области научных интересов: теория надежности тепловых электрических станций и нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Имеет более 80 публикаций. E-mail: [o.grigoreva@corp.nstu.ru](mailto:o.grigoreva@corp.nstu.ru)

*Тихонов Илья Андреевич*, аспирант, ассистент кафедры тепловых электрических станций Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – влияние отклонения параметров и изменение нагрузки энергоблоков на расход топлива. Имеет 8 публикаций. E-mail: [i.tikhonov@corp.nstu.ru](mailto:i.tikhonov@corp.nstu.ru)

*Dvortsevoy Alexander I.*, Ph.D. (Eng), associate professor of the Department of Thermal Power Plants, Novosibirsk State Technical University. The main research area is the influence of parameter deviations on the technical and economic indicators of power units. He has more than 40 publications. E-mail: [dvorcevoj@corp.nstu.ru](mailto:dvorcevoj@corp.nstu.ru)

*Grigorieva Oksana K.*, Ph.D. (Eng), associate professor of the Department of Thermal Power Plants, Novosibirsk State Technical University. Her main research interests include the reliability theory of thermal power plants and non-traditional and renewable energy sources. She has more than 80 publications. E-mail: [o.grigoreva@corp.nstu.ru](mailto:o.grigoreva@corp.nstu.ru)

*Tikhonov Ilya A.*, assistant lecturer at the Department of Thermal Power Plants, Novosibirsk State Technical University. The main field of his research is the influence of parameter deviations and load change on fuel consumption of power units. He has 8 publications. E-mail: [i.tixonov@corp.nstu.ru](mailto:i.tixonov@corp.nstu.ru)

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-109-122

### ***Evaluation of components of an excess fuel flow in the heat power equipment\****

*A.I. DVORTSEVOY<sup>a</sup>, O.K. GRIGORIEVA<sup>b</sup>, I.A. TIKHONOV<sup>c</sup>*

*Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation*

*<sup>a</sup> [dvorcevoj@corp.nstu.ru](mailto:dvorcevoj@corp.nstu.ru)   <sup>b</sup> [o.grigoreva@corp.nstu.ru](mailto:o.grigoreva@corp.nstu.ru)   <sup>c</sup> [i.tixonov@corp.nstu.ru](mailto:i.tixonov@corp.nstu.ru)*

#### **Abstract**

The use of traditional information systems with a low level of automation at thermal power plants does not allow organizing a channel for remote collection of reliable information about the current state of technological processes. The inability to organize data transfer to the central node for subsequent storage and processing does not allow tracking in full measure the need to repair or upgrade the equipment. In these conditions, an increase in the efficiency of the power plant is either impossible or relatively small. A significant increase in efficiency indicators can be reached by determining the least cost-effective elements or areas of the technological process, which becomes possible when using a complex collection of data from metering devices and their analysis.

In the presence of a digital communication channel, data from the primary measuring device of technological processes (flow rate, pressure, temperature, voltage, etc.) can be transferred to a single information and analytical center. Based on the accumulated data, using a digital twin of the enterprise, real technical and economic indicators, as well as harmful emissions are calculated. Predictive calculations are performed for the cost effective operation of equipment and the introduction of new technologies. With a sufficient number of measurement devices, data storage makes it possible to analyze both the condition of the equipment and the state of the process at various points of time without having to affect the operating equipment.

Part of informational functions of industrial control systems performed locally at TPPs can be executed remotely. These include such functions as recording events, information-computational and analytical functions, archiving information, and logging information (reporting). Analyzing the data on the technological process for a certain period (month, quarter, year, etc.), we can evaluate the efficiency of the implemented equipment and speak about the feasibility and ways of further modernization of the thermal power plant.

**Keywords:** remote audit, data analysis, cloud computing, excess fuel flow, parameter fluctuations, operating modes of heat and power equipment, decomposition methods, power unit efficiency, automated and control systems

---

\* Received 03 February 2020.



## REFERENCES

1. Nozdrenko G.V. *Effektivnost' primeneniya v energetike KATEKa ekologicheskii perspektivnykh energotekhnologicheskikh blokov elektrostantsii s novymi tekhnologiyami ispol'zovaniya uglia* [Efficiency of application in the power engineering of KAFEC of ecologically perspective energy-technological blocks of power stations with new technologies of coal use]. Novosibirsk, NETI Publ., 1992. 249 p.
2. Dvortsevov A.I. *Eksergeticheskii analiz vliyaniya parametrov regulirovaniya pyleugol'nykh teplofikatsionnykh energoblokov na pereraskhod topliva*. Diss. kand. tekhn. nauk [Exergetic analysis of the effect of the parameters of regulation of pulverized coal-fired power units on fuel overruns. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2010. 144 p.
3. Larionov V.S., Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A., Zykov V.V. *Tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost' energoblokov TES* [Technical and economic efficiency of TPP power units]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1998. 31 p.
4. Andryushchenko A.I. [Performance indicators of complex power systems and the relationship between them]. *Energoberezhenie v gorodskom khozyaistve, energetike, promyshlennosti: materialy Chetvertoi rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Proceedings of the Fourth Russian Scientific and Technical Conference "Energy savings in municipal services, energy, industry"]. Ulyanovsk, 2003, pp. 12–14. (In Russian).
5. Nolan K.E., Guibene W., Kelly M.Y. An evaluation of low power wide area network technologies for the internet of things. *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Paphos, Cyprus, 2016, pp. 439–444. DOI: 10.1109/IWCMC.2016.7577098.
6. Filimonov A.G., Chichirova N.D., Chichirov A.A., Filimonova A.A. Vnedrenie elementov tsifrovoy ekonomiki v elektroenergetike [Implementaon of digital economy elements in electric power industry]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*, 2018, vol. 11, no. 2, pp. 94–102. – DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-2-94-102.
7. Grabchak E.P. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya energeticheskogo oborudovaniya v usloviyakh tsifrovoy ekonomiki [Assessment of technical condition of power equipment in conditions of digital economy]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*, 2017, vol. 10, no. 4, pp. 268–274.
8. Mishcheryakov S.V. Tsifrovaya otsenka nadezhnosti proizvodstvennoi sistemy sub"ektov energetiki [Digital assessment of reliability of production system of power subjects]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*, 2018, vol. 11, no. 2, pp. 109–116.
9. Andryushchenko A.I. *Metodika rascheta eksergeticheskoi effektivnosti tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv* [Method of calculating the exergy efficiency of technological processes and production]. Saratov, Saratov Polytechnic Institute Publ., 1989. 151 p.
10. Gorshkov A. S. *Tekhniko-ekonomicheskii pokazateli teplovykh jelektricheskikh stantsij* [Technical and economic indicators of thermal power plants]. – Moscow : Energy, 1974. – 240 p.
11. Dvortsevov A., Tikhonov I. Factors affecting the excess fuel flow at thermal power plants. *2016 11th International forum on strategic technology*, June 1–3, 2016, Novosibirsk, Russia: proceedings of IFOST-2016, pt. 3, pp. 131–135.
12. Shchinnikov P.A., Nozdrenko G.V., Grigoryeva O.K., Kuryanov A.A. The advanced steam and gas technology. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, vol. 23, iss. 3, pp. 229–235. DOI: 10.1134/S1810232814030060.
13. Shchinnikov P.A., Dvortsevoi A.I. Analiz vliyaniya parametrov regulirovaniya teplofikatsionnykh energoblokov na pereraskhod topliva [The analysis of the influence of the parameters of the regulation of the heating power units on the fuel overruns]. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, 2011, no. 10, pp. 41–44. (In Russian).
14. Tikhonov I.A., Dvortsevov A.I. [Analysis of the effect of fuel overruns on the technical and economic performance of coal-fired power plant units]. *Elektrotehnika. Elektrotekhnologiya. Energetika, EEE-2015: sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchennykh*. V 3 ch. [Electrical engineering. Electrotechnology. Energy. EEE-2015. In 3 pt.]. Novosibirsk, 2015, pt. 3, pp. 412–415. (In Russian).
15. Shchinnikov P.A., Dvortsevov A.I. Analiz vliyaniya parametrov regulirovaniya teplofikatsionnykh energoblokov na raskhod topliva [Analysis of the influence of the parameters of the regulation of the heat-generating power units on fuel consumption]. *Problemy regional'noi energetiki = Problems of the Regional Energetics*, 2011, no. 1 (15), pp. 49–55.
16. Tikhonov I.A., Shchinnikov P.A., Dvortsevov A.I. Model' rascheta pereraskhoda topliva pri razlichnykh tipakh nagruzki [Model for calculating fuel overruns for various types of load]. *Problemy*

*sovershenstvovaniya toplivno-energeticheskogo kompleksa: sbornik nauchnykh trudov* [Problems of improving the fuel and energy complex]. Saratov, 2016, iss. 8, pp. 150–154.

17. Shchinnikov P.A., Nozdrenko G.V. Ispol'zovanie vychislitel'nogo kompleksa ORTES dlya tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniy TES [Using computing complex ORTES for feasibility studies TPP]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2005, no. 1 (19), pp. 51–62.

18. *NIST Cloud Computing Standards Roadmap*. National Institute of Standards and Technology. Available at: <https://www.nist.gov/publications/nist-cloud-computing-standards-roadmap> (accessed 16.10.2020).

Для цитирования:

Дворцовой А.И., Григорьева О.К., Тихонов И.А. Оценка составляющих перерасхода топлива теплоэнергетического оборудования // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 2–3 (79). – С. 109–122. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-109-122.

For citation:

Dvortsevov A.I., Grigorieva O.K., Tikhonov I.A. Otsenka sostavlyayushchikh pereraskhoda topliva teploenergeticheskogo oborudovaniya [Evaluation of components of an excess fuel flow in the heat power equipment]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 2–3 (79), pp. 109–122. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-109-122.

УДК 621.311

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-123-138

## Поагрегатная оценка капиталовложений в энергоблоки электростанций с использованием параметрической степенной функции<sup>\*</sup>

П.А. ЩИННИКОВ<sup>a</sup>, А.А. ФРАНЦЕВА<sup>b</sup>, И.С. САДКИН<sup>c</sup>

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

<sup>a</sup> [shchinnikov@corp.nstu.ru](mailto:shchinnikov@corp.nstu.ru) <sup>b</sup> [frantsevaalina@gmail.ru](mailto:frantsevaalina@gmail.ru) <sup>c</sup> [sadkinvanya@mail.ru](mailto:sadkinvanya@mail.ru)

При проектировании нового генерирующего оборудования энергоблоков электростанций и их тепловых схем в условиях отсутствия информации о их стоимости в практике проектирования используют показатели аналогов и/или экспертные оценки. Такой подход позволяет вести сравнение при возможности приведения вариантов к сопоставимому виду и при использовании однотипного оборудования. В том случае, когда необходимо сравнить варианты, отличающиеся не только установленными мощностями, но и составом оборудования, требуется более точная оценка капиталовложений.

В статье предлагается подход для оценки капиталовложений в энергоблоки электростанций при использовании степенной параметрической функции. Оценку капиталовложений ведут по каждому агрегату энергоблока и его технической системе. Особенностью подхода является положение о том, что стоимость агрегата тем выше, чем выше его параметры в виде мощности, термодинамических характеристик, времени использования на нагрузке и других. Эти факторы учитываются показателем степени в уравнении приведения. Кроме того, поправочными коэффициентами учитывают состав оборудования, его климатическое исполнение, особенности монтажа. Совокупность учитываемых факторов позволяет получать оценку стоимости оборудования в разных вариантах исполнения. Единообразие постановки задачи позволяет применять подход как в задачах проектирования, так и в научно-прикладных задачах сравнения действующих и вновь разрабатываемых и перспективных технологий.

В настоящей работе предлагается актуализация и развитие способа, разработанного в прежние годы на кафедре ТЭС НГТУ НЭТИ. Здесь представлены уравнения для определения капиталовложений в основные агрегаты и технические системы энергоблоков электростанций. Проведены оценки капиталовложений в энергоблоки, строящиеся в России в настоящее время. Показано, что капиталовложения в энергоблоки в России на 20...50 % ниже, чем в США и Европе, и на 20...30 % выше, чем в Китае.

**Ключевые слова:** капиталовложения в энергоблок, капиталовложения в ТЭС, способ оценки капиталовложений, метод оценки капиталовложений, параметрическая степенная функция, степенной метод оценки, стоимость электростанции

---

<sup>\*</sup> Статья получена 27 марта 2020 г.

## ВВЕДЕНИЕ

При модернизации действующего и создании нового энергетического оборудования необходимо решать задачи технико-экономического сравнения различных вариантов [1–10]. Во всех случаях необходимо вести оценку капиталовложений в оборудование. В том случае, если новое оборудование коммерциализовано, то информацию о его стоимости можно получить у производителя и/или продавца. Задача осложняется существенным различием стоимости однотипных элементов у разных производителей, конъюнктурой фактических рынков энергетического машиностроения, политическими санкциями, пошлинами или субсидированием. Часто встречается задача, когда такой информации нет вовсе (например, при проектных оценках, при разработке новых технических решений или при известных, но ранее неприменяемых сочетаниях вариантов компоновок). Такая задача встает при проектировании нового генерирующего оборудования электростанций или самих ТЭС [11–19]. Приемы, применяемые в прежние годы (по укрупненным показателям удельных капиталовложений в основное оборудование и распределенным затратам в здания, сооружения и строительную часть) не могут применяться сегодня, так как современные пропорции между удельными затратами в основное оборудование, вспомогательные системы и инфраструктуру электростанций изменились по сравнению с прежними условиями хозяйствования. Это можно наблюдать на примере сравнения данных [20–23] и [24–27], и связано это с либерализацией рынков энергетического машиностроения, доступом к оборудованию любого мирового производителя [28] при формировании современных и перспективных энергоблоков ТЭС.

В этой связи разработка методов оценки капиталовложений в основное оборудование электростанций, а также в их строительство является актуальной задачей. В статье предлагается способ такой оценки на основе параметрической степенной функции. Способ разрабатывался в прежние годы на кафедре тепловых электрических станций НГТУ, и в его основе лежит представление о том, что с ростом термодинамических параметров растет стоимость оборудования [29]. В настоящей работе предлагается актуализация и развитие способа применительно к сложившейся сегодня практике проектирования энергоблоков электростанций.

## 1. МЕТОД ОЦЕНКИ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЙ

Общий вид предлагаемого подхода представлен выражением

$$K_k = K_0 \prod_{i=1}^p c_i \prod_{j=1}^m \left( \frac{x_j}{x_j^0} \right)^{n_j}, \quad (1)$$

где  $K_k$  – капиталовложения в ту или иную техническую систему;  $K_0$  – базовое значение капиталовложений;  $c_i$  – коэффициенты приведения, зависящие от технологической схемы, типа оборудования и региона строительства;  $x_j$  – определяющие параметры;  $x_j^0$  – базовые значения определяющих параметров.

ров;  $n_j$  – показатель степени, отражающий увеличение стоимости в зависимости от роста значений определяющих параметров

Полные капиталовложения в энергоблок определяются как сумма капиталовложений в его основные элементы и технические схемы:

$$K = \sum_k K_k, \quad (2)$$

где  $K_k$  характеризует основные элементы и технические системы энергоблока.

Главным достоинством метода является возможность расчета стоимости различных типов энергоблоков, основанного не на конкретных образцах оборудования с привязкой к изготовителю, а на общих технологических схемах и компоновочных решениях, термодинамических параметрах, на основе которых проектируется энергоблок. Подобный подход применяется для научно-прикладных задач сравнения различных компоновочных вариантов энергоблока [30, 31], оценки стоимости как на этапе проектирования новых мощностей, так и при модернизации существующих [32].

В настоящем подходе затраты (в виде капиталовложений), связанные с инжинирингом, строительной частью электростанции и ее сопутствующей инфраструктурой, пропорционально разнесены между основными агрегатами и вспомогательными системами через базовые значения капиталовложений. Выделение агрегатов и систем энергоблоков осуществляют при помощи выражений, в которых используются индивидуальные поправочные коэффициенты и показатели степени.

Для котлоагрегата (включая фундаменты, несущие конструкции, необходимые паропроводы, дымососы рециркуляции газов при их наличии, системы очистки дымовых газов и др.) уравнение имеет вид

$$K_{KA} = K_0^{KA} \prod_{i=1}^{11} c_i \prod_{j=1}^8 \left( \frac{x_j}{x_j^0} \right)^{n_j}, \quad (3)$$

Здесь  $K_{KA}$  – капиталовложения в котлоагрегат;  $K_0^{KA} = 7 \cdot 10^6$  долл. – базовое значение капиталовложений в котлоагрегат;  $x_j, x_j^0$  – текущие и базовые значения определяющих параметров;  $c_i, n_j$  – коэффициенты приведения и показатели степени (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Table 1

### Коэффициенты приведения для котлоагрегата

#### Correction coefficients for a boiler

Влияющий фактор	Характеристика фактора		Обозначение	Значение
Топливо	Камерная топка	Каменный уголь	$C_1$	1,10
		Бурый уголь		1,15
		Мазут, ВУТ		1,05
		Газ		1,0
	Слоевая топка	Каменный уголь		1,05
		Бурый уголь		1,08

Окончание табл. 1

End of Tab. 1

Влияющий фактор	Характеристика фактора	Обозначение	Значение
Тип котла	Прямоточный	$C_2$	1,0
	Барабанный		1,05
Перегрев пара	Без промперегрева	$C_3$	1,0
	С промперегревом		1,16
Профиль котла	Г- и П-образный	$C_4$	1,0
	Т-образный		1,10
Компоновка	Однокорпусная	$C_5$	1,0
	Двухкорпусная		1,12
Регион строительства	Европейская часть	$C_6$	1,0
	Сибирь		1,05
	Дальний Восток		1,1
Вид очистных систем	Золоочистка (з/о)	$C_7$	1,23
	З/о + реагент в топку		1,33
	З/о + серо- или азотоочистка		1,57
	З/о + серо- и азотоочистка		1,92
Демонтаж	Выработка срока эксплуатации	$C_8$	1,5
Тип топки	Камерная	$C_9$	1,0
	Кипящий слой		1,45
	Циркулирующий кипящий слой		1,72
Технологические способы повышения эффективности сжигания	Ступенчатое сжигание и (или) рециркуляция дымовых газов	$C_{10}$	1,07 (1,03)
	Термоподготовка топлива		1,06
	Вихревые предтопки		1,10
Вид шлакоудаления	Твердое	$C_{11}$	1,0
	Жидкое		1,1

Таблица 2

Table 2

## Базовые параметры и показатели степени для котлоагрегата

## Basic parameters and exponent indexes for a boiler

Наименование	Параметры		Показатель степени	
	Обозначение	Значение	Обозначение	Значение
Производительность котла, т/ч	$x_1^0$	100	$n_1$	< 900 т/ч : 0,8 > 900 т/ч : 0,77
Давление перегретого пара, МПа	$x_2^0$	17	$n_2$	0,4
Температура перегретого пара, °С	$x_3^0$	545	$n_3$	0,9
Температура пара промперегрева, °С	$x_4^0$	545	$n_4$	1,3

Окончание табл. 2

End of Tab. 2

Наименование	Параметры		Показатель степени	
	Обозначение	Значение	Обозначение	Значение
Температура уходящих газов, °С	$x_5^0$	130	$n_5$	-0,13
Температура питательной воды, °С	$x_6^0$	230	$n_6$	0,6
Теплота сгорания топлива, ккал/кг	$x_7^0$	7000	$n_7$	-0,2
Число часов использования установленной паропроизводительности, ч/год	$x_8^0$	6000	$n_8$	0,2

Для парового турбоагрегата (с конденсатором и необходимыми паропроводами, без генератора и системы регенерации) уравнение имеет вид:

$$K_{ТА} = K_0^{ТА} \prod_{i=1}^3 c_i \prod_{j=1}^7 \left( \frac{x_j}{x_j^0} \right)^{n_j} . \quad (4)$$

Здесь  $K_{ТА}$  – капиталовложения в паровой турбоагрегат;  $K_0^{ТА} = 5,3 \cdot 10^6$  долл. – базовое значение капиталовложений в паровой турбоагрегат;  $x_j, x_j^0$  – текущие и базовые значения определяющих параметров;  $c_i, n_j$  – коэффициенты приведения и показатели степени (табл. 3 и 4).

Таблица 3

Table 3

**Коэффициенты приведения для парового турбоагрегата****Correction coefficients for a steam turbine**

Влияющий фактор	Характеристика фактора	Обозначение	Значение
Тип турбоагрегата	К-турбина	$C_1$	1,0
	Т-турбина		1,3
	ПТ-турбина		1,4
	Р-турбина		0,6
Регион строительства	Европейская часть	$C_2$	1,0
	Сибирь		1,03
	Дальний Восток		1,06
Демонтаж и компенсация аварий	Демонтаж после выработки срока эксплуатации и компенсация аварий	$C_3$	1,2

Таблица 4

Table 4

## Базовые параметры и показатели степени для парового турбоагрегата

## Basic parameters and exponent indexes for a steam turbine

Наименование	Параметры		Показатель степени	
	Обозначение	Значение	Обозначение	Значение
Установленная мощность парового турбоагрегата, МВт ( $N$ – мощность, МВт)	$x_1^0$	30	$n_1$	< 330 МВт: 0,8 > 330 МВт: $0,94 \dots 4,24 \cdot 10^{-4} \cdot N$
Давление перегретого пара, МПа	$x_2^0$	14	$n_2$	0,22
Температура перегретого пара, °С	$x_3^0$	545	$n_3$	1,0
Температура пара промпрегрева, °С	$x_4^0$	545	$n_4$	1,3
Количество ЦНД	$x_5^0$	1	$n_5$	0,2
Количество ЦСД + ЦВД	$x_6^0$	1	$n_6$	0,3
Число часов использования установленной мощности, ч/год	$x_7^0$	6000	$n_7$	0,2

Выражение для определения капиталовложений в электрооборудование, включая электрогенератор, трансформатор, возбудитель генератора, автоматику и КИП, распредустройство, связь с энергосистемой, имеет вид

$$K_{\text{эл}} = K_0^{\text{эл}} C_1 \prod_{j=3}^7 \left( \frac{x_j}{x_j^0} \right)^{n_j} \quad (5)$$

Здесь  $K_{\text{эл}}$  – капиталовложения в электрооборудование;  $K_0^{\text{эл}} = 11,6 \cdot 10^6$  долл. – базовое значение капиталовложений в электрооборудование;  $c_1$  – коэффициент приведения, учитывающий регион строительства (табл. 5);  $x_j, x_j^0, n_j$  – текущие и базовые значения определяющих параметров, показатели степени (табл. 6).

Таблица 5

Table 5

## Коэффициент приведения для электрооборудования

## Correction coefficients for electrical equipment

Влияющий фактор	Характеристика фактора	Обозначение	Значение
Регион строительства	Европейская часть	$C_1$	1,0
	Сибирь		1,03
	Дальний Восток		1,06



Таблица 6

Table 6

## Базовые параметры и показатели степени для электрооборудования

## Basic parameters and exponent indexes for electrical equipment

Наименование	Параметры		Показатель степени	
	Обозначение	Значение	Обозначение	Значение
Установленная мощность электрогенератора, МВт	$x_1^0$	100	$n_1$	0,9
Собственные нужды энергоблока, %	$x_2^0$	5	$n_2$	0,2
Число часов использования установленной мощности, ч/год	$x_3^0$	6000	$n_3$	0,2

Капиталовложения во вспомогательное оборудование определяются как

$$K_{\text{всп}} = K_{\text{НПГ}} + K_{\text{ТД}} + K_{\text{топл}} + K_{\text{ДТ}} + K_{\text{ЗШ}}, \quad (6)$$

где  $K_{\text{НПГ}}$ ,  $K_{\text{ТД}}$ ,  $K_{\text{топл}}$ ,  $K_{\text{ДТ}}$ ,  $K_{\text{ЗШ}}$  – соответственно капиталовложения в низкопотенциальную группу (подогреватели системы регенерации, трубопроводы, деаэратор, насосы, система технического водоснабжения и охлаждения, включая градирни), тягодутьевое оборудование, систему топливоподдачи и топливоподготовки, систему газоотвода и дымовую трубу, систему золошлакоудаления.

Для каждого слагаемого уравнение капиталовложений имеет вид (1) с индивидуальными значениями базовых капиталовложений, коэффициентов приведения и показателей степеней.

Для теплофикационных энергоблоков необходимо учитывать капиталовложения в сетевую установку ( $K_{\text{СУ}}$ ), отвечающую за отпуск теплоты от энергоблока и включающую сетевые подогреватели, трубопроводы, арматуру и насосы:

$$K_{\text{СУ}} = K_0^{\text{СУ}} \prod_{i=1}^4 c_i \prod_{j=1}^6 \left( \frac{x_j}{x_j^0} \right)^{n_j}. \quad (7)$$

Здесь  $K_{\text{СУ}}$  – капиталовложения в сетевую установку;  $K_0^{\text{СУ}} = 1,4 \cdot 10^6$  долл. – базовое значение капиталовложений в сетевую установку;  $x_j$ ,  $x_j^0$  – текущие и базовые значения определяющих параметров;  $c_i$ ,  $n_j$  – коэффициенты приведения и показатели степени (табл. 7 и 8).

Таблица 7

Table 7

**Коэффициенты приведения для сетевой установки**  
**Correction coefficients for the heating system equipment**

Влияющий фактор	Характеристика фактора	Обозначение	Значение
Регион строительства	Европейская часть	$C_1$	1,0
	Сибирь		1,05
	Дальний Восток		1,1
Демонтаж, компенсация аварий	После выработки ресурса	$C_2$	1,3
Вид сетевой установки	С одним подогревателем	$C_3$	1
	С несколькими подогревателями		1,2
	С подключением РОУ		1,1
Схема сетевой установки	Блочная (на каждый турбоагрегат)	$C_4$	1,0
	Неблочная (с параллельными связями)		1,2

Таблица 8

Table 8

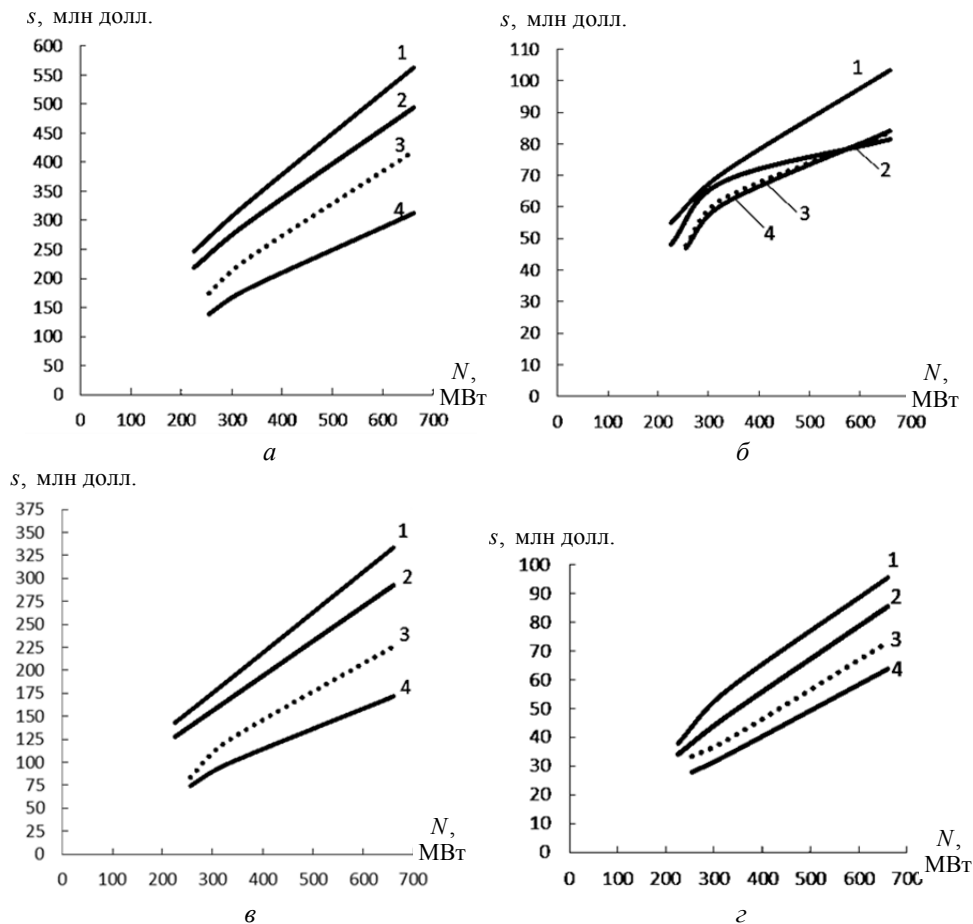
**Базовые параметры и показатели степени для сетевой установки**  
**Basic parameters and exponent indexes for the heating system equipment**

Наименование	Параметры		Показатель степени	
	Обозначение	Значение	Обозначение	Значение
Температурный напор, °С	$x_1^0$	50	$n_1$	0,35
Температура греющей среды, °С	$x_2^0$	100	$n_2$	0,15
Теплофикационная нагрузка, МВт	$x_3^0$	50	$n_3$	0,45
Мощность сетевых насосов, кВт	$x_4^0$	500	$n_4$	0,2
Расход сетевой воды, т/ч	$x_5^0$	1000	$n_5$	0,3
Продолжительность отопительного периода, ч/год	$x_6^0$	5000	$n_6$	0,5

## 2. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Все значения базовых капиталовложений, поправочных коэффициентов и показателей степеней определены по известным соотношениям материалоемкости, затратности, технологической сложности различных технических систем [33–36] с использованием открытых заводских и проектных данных, аналитических материалов [27, 37], прайс-листов дилеров и поставщиков машин и механизмов с учетом их корректировки на современный уровень и прогнозной оценки [38–40].

С использованием настоящего подхода проведены оценки капиталовложений в энергоблоки электростанций, строящиеся в России в настоящее время. Результаты расчетов показывают хорошие совпадения с известными данными о капиталовложениях в новые электростанции [27] в разных регионах мира (рисунок).



Капиталовложения в агрегаты и системы паросилового энергоблока [27]:

$a$  – котлоагрегат;  $б$  – паровая турбина;  $в$  – вспомогательное оборудование;  
 $г$  – электрооборудование; 1 – Германия; 2 – США; 3 – расчет по степенной функции (РФ);  
 4 – Китай

Investments in steam-power plant aggregates and systems [27]:

$a$  is a boiler;  $б$  is a steam turbine;  $в$  is auxiliary equipment;  $г$  is electrical equipment;  
 1 is Germany; 2 is the USA; 3 is parametric power function calculation (Russia); 4 is China

Можно видеть, что капиталовложения в энергоагрегаты и системы электростанций в РФ на 20...50 % ниже, чем в США и Европе, и на 20...30 % выше, чем в Китае в зависимости от единичной мощности и вида оборудования. Расчетный показатель капиталовложений в турбоагрегаты для РФ совпадает со значением, характерным для Китая, в связи с тем, что в [27] в оценке для КНР приняты турбины Ленинградского металлического завода (ЛМЗ, Санкт-Петербург).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан способ оценки капиталовложений в основное оборудование энергоблоков электростанций и их вспомогательные системы на основе степенной параметрической функции. Способ может применяться в широком классе задач сравнения разных вариантов и тепловых схем энергоблоков: от научно-исследовательских до проектных. Показано, что капиталовложения в энергоблоки в России на 20...50 % ниже, чем в США и Европе, и на 20...30 % выше, чем в Китае.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аминов Р.З., Шкрет А.Ф., Гариевский М.В. Тепловые и атомные электростанции: конкурентоспособность в новых экономических условиях // Теплоэнергетика. – 2017. – № 5. – С. 5–15.
2. Хлебалин Ю.М. Модернизация промышленно-отопительных ТЭЦ со струйными компрессорами // Промышленная энергетика. – 2011. – № 2. – С. 2–5.
3. Клер Ф.М., Потанина Ю.М. Сопоставление эффективности перспективных теплоэнергетических установок на органическом топливе // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2004. – № 1. – С. 72.
4. Учет экономических показателей при переходе на высокое давление / Е.А. Кирсанова, В.А. Жила, А.К. Клочко, А.А. Малышева // Научное обозрение. – 2017. – № 5. – С. 38–41.
5. Щинников П.А. Мультиэнергоблок с комплексной переработкой твердого топлива // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2001. – № 3. – С. 83–89.
6. Щинников П.А. Многоцелевой энергоблок на твердом топливе // Российский национальный симпозиум по энергетике, 10–14 ноября 2001: материалы докладов. – Казань, 2001. – Т. 1. – С. 154–157.
7. Григорьева О.К., Францева А.А., Боруш О.В. Исследование технико-экономических показателей системы комбинированного теплоснабжения с фреоновыми термотрансформаторами // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 145–156. – DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-145-156.
8. Морев В.Г. Влияние усреднения нагрузок на расчетный срок окупаемости капиталовложений при выборе мощности промышленной ТЭЦ 6 // Промышленная энергетика. – 2015. – № 12. – С. 6–12.
9. Юрин В.Е. Методология комплексной оценки путем совершенствования АЭС // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2019. – № 12. – С. 11–16. – DOI: 10.18635/2071-2219-2019-2-11-16.
10. Техничко-экономическая оценка получения водорода методом подземной газификации угля / Ю.В. Стефаник, В.Я. Шпет, Ю.В. Хоха, М.И. Дубына, В.М. Храмов, А.В. Волочий // Альтернативная энергетика и экология. – 2008. – № 4 (60). – С. 55–89.
11. Росляков П.В., Баранов В.В. Техничко-экономическая оценка перевода угольного блока мощностью 750 МВт на сухое золошлакоудаление // Энергетика и теплотехника: сборник научных трудов / под ред. П.А. Щинникова. – Новосибирск, 2019. – Вып. 22. – С. 20–32.
12. Повышение технико-экономической эффективности ТЭЦ путем перехода на новые режимы работы с внутриквартальными теплонасосными установками / В.Г. Томилов, П.А. Щинников, Г.В. Ноздренко, Ю.Л. Пугач // Теплофизика и аэромеханика. – 2000. – Т. 7, № 4. – С. 581–590.
13. Ноздренко Г.В., Русских Е.Е., Шепель В.С. Обоснование рационального профиля энергоблока с суперсверхкритическими параметрами пара и установками серо- и азотоочистки // Научный вестник НГТУ. – 2011. – № 1 (42). – С. 131–138.

14. Голубева Л.Ф., Григорьева О.К., Францева А.А. Применение фреоновых технологий на тепловых электрических станциях // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 4 (65). – С. 164–174. – DOI: 10.17212/1814-1196-2016-4-164-174.
15. Тугов А.Н., Родионов В.И. Возобновляемый источник энергии на основе экологически безопасного сжигания коммунальных отходов // Энергетика и теплотехника: сборник научных трудов / под ред. В.Е. Накорякова. – Новосибирск, 2017. – Вып. 21. – С. 105–112.
16. Оценка эффективности использования возобновляемых источников энергии и торфа в сельской коммунальной энергетике / Е.А. Медведева, И.Ю. Ряпин, И.В. Урванцев, В.Е. Цыба // Теплоэнергетика. – 2016. – № 9. – С. 9–19.
17. Илюшин П.В. Анализ опыта эксплуатации и причин возникновения аварий с повреждениями оборудования парогазовых установок // Энергоэксперт. – 2018. – № 3 (67). – С. 64–68.
18. Милев Р.Г., Серебрянский С.С. Техническое перевооружение энергоблока № 3 на Каширской ГРЭС – филиале ОАО «ОГК-1» // Электрические станции. – 2009. – № 6. – С. 33–37.
19. Жуков В.В., Михеев Д.В., Третьяков П.М. Оценка интегральной конкурентоспособности автономных систем энергоснабжения малой мощности по техническим, сервисным и экономическим показателям // Вестник МЭИ. – 2017. – № 3. – С. 20–27. – DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-20-27.
20. Тепловые и атомные электрические станции: справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
21. Теплоэнергетика и теплотехника. Общие вопросы: справочник / под общ. ред. А.В. Клименко и В.М. Зорина. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 528 с.
22. Комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями: монография / П.А. Щинников, Г.В. Ноздренко, В.Г. Томилов, Ю.В. Овчинников, А.А. Ловцов, П.Ю. Коваленко, Н.Г. Зыкова, О.А. Вихман, И.В. Бородихин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 528 с.
23. Комплексный энергетический анализ энергоблоков ТЭС с новыми технологиями: монография / Г.В. Ноздренко, П.А. Щинников. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 190 с.
24. Ольховский Г.Г. Газификация твердых топлив в мировой энергетике (обзор) // Теплоэнергетика. – 2015. – № 7. – С. 3–7.
25. Баторшин В.А. Пылеугольные энергоблоки Manjung 4 и RBK 8 // Энергетика за рубежом. – 2018. – № 2. – С. 30–39.
26. Газогенераторные технологии в энергетике: монография / А.В. Зайцев, А.Ф. Рыжков, В.Е. Силин, Р.Ш. Загруднинов, А.В. Попов, Т.Ф. Богатова. – Екатеринбург: Сократ, 2010. – 611 с.
27. Оценка стоимости строительства и эксплуатации электростанций: отчет LI 260610 / ООО «Ламайер Интернациональ Руссланд». – М.; Бад Фильбель, 2009. – URL: [https://www.pr-sr.ru/ru/SR\\_0V001432](https://www.pr-sr.ru/ru/SR_0V001432) (дата обращения: 10.01.2020).
28. Щинников П.А., Боруш О.В. Современные и перспективные черты российского рынка энергетического машиностроения // Энергетика и теплотехника: сборник научных трудов / под ред. П.А. Щинникова. – Новосибирск, 2019. – Вып. 22. – С. 7–20.
29. Техничко-экономическая эффективность энергоблоков ТЭС / В.С. Ларионов, Г.В. Ноздренко, П.А. Щинников, В.В. Зыков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – 30 с.
30. Схемно-параметрическая оптимизация котлов ТЭС с кольцевой топкой / Н.Г. Зыкова, Ф.А. Серант, Г.В. Ноздренко, П.А. Щинников // Теплофизика и аэромеханика. – 2003. – Т. 10, № 3. – С. 477–483.
31. Kumar R., Sharma A.Kr., Tewari P.C. Cost analysis of a coal-fired power plant using the NPV method // Journal of Industrial Engineering International. – 2015. – Vol. 11 (4). – P. 495–504. – DOI: 10.1007/s40092-015-0116-8.
32. Садкин И.С., Щинников П.А. Способ оценки капиталовложений в генерирующее оборудование при использовании газа подземной газификации угля // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов, Новосибирск, 2–6 дек. 2019 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – Ч. 4. – С. 262–264.

33. Перспективы использования технологии ЦКС при техническом перевооружении ТЭС России / Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев, Д.С. Литун, Д.А. Санкин, И.Г. Дмитрюкова // Теплоэнергетика. – 2009. – № 1. – С. 28–36.
34. Шмиголь И.Н. Проблемы и перспективы сероочистки дымовых газов ТЭС в России // Экология в энергетике: труды II международной научно-практической конференции, 19–21 октября 2005 г. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – С. 107–114.
35. Зайченко В.М., Штильрайн Э.Э., Штеренберг В.Я. Экономические аспекты снижения потребления природного газа на тепловых электростанциях // Теплоэнергетика. – 2001. – № 7. – С. 15–18.
36. Тумановский А.Г., Котлер В.Р. Перспективы решения экологических проблем тепловых электростанций // Теплоэнергетика. – 2007. – № 6. – С. 5–11.
37. Black J. Cost and performance baseline for fossil energy plants. Vol. 1. Bituminous coal and natural gas to electricity: Final Report DOE/2010/1397 / National Energy Technology Laboratory. – Rev. 2. – Pittsburgh, PA, USA, 2010. – 626 p.
38. Комплексная оценка эффективных масштабов обновления тепловых электростанций при обосновании рациональной структуры генерирующих мощностей на перспективу до 2035 г. / Ф.В. Веселов, И.В. Ерохина, А.С. Макарова, А.А. Хоршев // Теплоэнергетика. – 2017. – № 3. – С. 5–14.
39. Тумановский А.Г. Перспективы развития угольных ТЭС России // Теплоэнергетика. – 2017. – № 6. – С. 3–13.
40. Прогноз научно-технологического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России на период до 2035 года: утв. Министром энергетики Российской Федерации 14 октября 2016 года. – М.: Минэнерго России, 2016. – 106 с.

*Щинников Павел Александрович*, доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – теплоэнергетика и теплотехника. Имеет более 260 публикаций. E-mail: shchinnikov@corp.nstu.ru

*Францева Алина Алексеевна*, кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – теплоэнергетика и теплотехника. Имеет более 30 публикаций. E-mail: frantsevaalina@gmail.com

*Садкин Иван Сергеевич*, студент кафедры тепловых электрических станций факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – теплоэнергетика и теплотехника. Имеет 5 публикаций. E-mail: sadkinvanya@mail.ru

*Shchinnikov Pavel A.*, D.Sc. (Eng.), professor of the department of thermal power plants at the Faculty of Power Engineering of Novosibirsk State Technical University. The main area of his research is heat power engineering. He is the author of more than 260 publications. E-mail: shchinnikov@corp.nstu.ru

*Frantseva Alina A.*, PhD (Eng.), associate professor at the department of thermal power plants at the Faculty of Power Engineering of Novosibirsk State Technical University. The main area of her research is heat power engineering. She is the author of more than 30 publications. E-mail: frantsevaalina@gmail.com

*Sadkin Ivan S.*, student at the department of thermal power plants at the Faculty of Power Engineering of Novosibirsk State Technical University. The main field of his research is heat power engineering. He has 5 publications. E-mail: sadkinvanya@mail.ru

### ***Aggregate estimation of investments in power plant units using a parametric power function***\*

P.A. SHCHINNIKOV<sup>a</sup>, A.A. FRANTSEVA<sup>b</sup>, I.S. SADKIN<sup>c</sup>

Novosibirsk State Technical University, 20 K Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>a</sup> shchinnikov@corp.nstu.ru   <sup>b</sup> frantsevaalina@gmail.ru   <sup>c</sup> sadkinvanya@mail.ru

#### **Abstract**

In the course of designing new generating equipment for power plants and their thermal circuits, in the absence of information about their cost, analog indicators and/or expert assessments are used in the design practice. This approach allows us to compare various options if they can be brought to a comparable form and when the same type of equipment is used. When it is necessary to compare options that differ not only in the specified capacity, but also in the equipment configuration, a more accurate assessment of investment is required.

The article proposes a method for estimating capital investment in power plants using a power parametric function. Capital investment is assessed for each unit of the power plant and its engineering system. A special feature of the approach is that the higher the cost of the unit is, the higher its thermodynamic characteristics, power, time of load use, etc. These factors are taken into account by the exponent in the power function. In addition, the correction coefficients take into account the configuration of the equipment, its climatic design, and configuration features. The combination of factors that are taken into account in the power function makes it possible to obtain an estimate of the cost of equipment in different versions. The uniformity of the problem statement makes it possible to apply the approach both to design tasks and to scientific and applied tasks of comparing the existing, newly developed and promising technologies.

This paper presents the updating and development of the method developed in previous years at the department of thermal power plants of NSTU. Equations for determining investment in the main units and technical systems of power plants are presented. Estimates of investment in power plants currently under construction in Russia are made. It is shown that investment in power plants in Russia is 20-50% lower than in the USA and Europe, and 20-30% higher than in China.

**Keywords:** investments in a power unit; method of evaluating investments; parametric power function; power estimation method; cost of a power plant; capital investments in power engineering

#### **REFERENCES**

1. Aminov R.Z., Shkret A.F., Garievskii M.V. Thermal and nuclear power plants: Competitive-ness in the new economic conditions. *Thermal Engineering*, 2017. vol. 64, no. 5, pp. 319–328. DOI: 10.1134/S0040601517050019. Translated from *Teploenergetika*, 2017, no. 5, pp. 5–15.
2. Khlebalin Yu.M. Modernizatsiya promyshlennno-otopitel'nykh TETs so struinymi kompres-sorami [Modernization of industrial heating power plants with jet compressors]. *Promyshlennaya energetika = Industrial power engineering*, 2011, no. 2, pp. 2–5.
3. Kler F.M., Potanina Yu.M. Sopostavlenie effektivnosti perspektivnykh teploenergetich-eskikh ustanovok na organicheskom toplive [Comparison of efficiency of perspective fossil thermal power plants]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2004, no. 1, p. 72.

---

\* Received 27 March 2020.

4. Kirsanova E.A., Zhila V.A., Klochko A.K., Malysheva A.A. Uchet ekonomicheskikh pokazatelei pri perekhode na vysokoe davlenie [Consideration of economic indicators when switching to high pressure]. *Nauchnoe obozrenie = Scientific review*, 2017, no. 5, pp. 38–41.
5. Shchinnikov P.A. Mul'tienergoblok s kompleksnoi pererabotkoi tverdogo topliva [Multi-power unit with integrated solid fuel processing]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2001, no. 5, pp. 83–89.
6. Shchinnikov P.A. [Multi-purpose solid fuel power unit]. *Rossiiskii natsional'nyi simpozium po energetike* [Russian national Symposium on energy], November 10–14, 2001: Materials of reports. Kazan, 2001, vol. 1, pp. 154–157. (In Russian).
7. Grigorieva O.K., Frantseva A.A., Borush O.V. Issledovanie tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelei sistemy kombinirovannogo teplosnabzheniya s freonovymi termotransformatorami [Study of technical and economic performance of the combined heat supply system with freon thermal transformers]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 145–156. DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-145-156.
8. Morev V.G. Vliyaniye usredneniya nagruzok na raschetnyi srok okupaemosti kapitalovlozhenii pri vybore moshchnosti promyshlennoi TETs 6 [Influence of load averaging on the estimated payback period of investments when choosing the capacity of an industrial CHPP 6]. *Promyshlennaya energetika = Industrial power engineering*, 2015, no. 12, pp. 6–12.
9. Yurin V.E. Metodologiya kompleksnoi otsenki putem sovershenstvovaniya AES [A comprehensive assessment methodology of nuclear power plant improvements]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie = Energy Safety and Energy Economy*, 2019, no. 12, pp. 6–12. DOI: 10.18635/2071-2219-2019-2-11-16.
10. Stefanik Yu.V., Shpet V.Ya., Hoha Yu.V., Dubyna M.I., Hramov V.M., Volochij A.V. Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka polucheniya vodoroda metodom podzemnoi gazifikatsii uglia [Technical and economic assessment of hydrogen production by underground coal gasification]. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya = International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 2008, no. 4 (60), pp. 55–89. (In Russian).
11. Roslyakov P.V., Baranov V.V. Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka perevoda ugol'nogo bloka moshchnost'yu 750 MVt na sukhoe zoloshlakoudalenie [Technical and economic assessment of the transfer of a coal block with a capacity of 750 MW to dry ash and slag removal]. *Energetika i teplotekhnika* [Power engineering and heat engineering]. Ed. by P.A. Shchinnikov. Novosibirsk, 2019, vol. 22, pp. 20–32.
12. Shchinnikov P.A., Nozdrenko G.V., Tomilov V.G., Pugach Yu.L. Povyshenie tekhniko-ekonomicheskoi effektivnosti TETs putem perekhoda na novye rezhimy raboty s vnutrikvartal'nymi teplonasosnymi ustanovkami [Improving the technical and economic efficiency of thermal power plants by switching to new modes of operation with intra-block heat pump installations]. *Teplofizika i aeromekhanika = Thermophysics and Aeromechanics*, 2000, vol. 7, no. 4, pp. 581–590. (In Russian).
13. Nozdrenko G.V., Russkikh E.E., Shepel' V.S. Obosnovanie ratsional'nogo profilya energobloka s supersverkhkriticheskimi parametrami para i ustanovkami sero- i azotoochistki [Rational profile substantiation for an ultra-supercritical power unit with desulphurization and denitrification systems]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 1 (42), pp. 131–138.
14. Golubeva L.F., Grigoryeva O.K., Frantseva A.A. Primeneniye freonovykh tekhnologii na teplovykh elektricheskikh stantsiyakh [The application of Freon technologies at heat power stations]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 4 (65), pp. 164–174. DOI: 10.17212/1814-1196-2016-4-164-174.
15. Tugov A.N., Rodionov V.I. Vozobnovlyaemyi istochnik energii na osnove ekologicheskoi bezopasnoy szhiganiya kommunal'nykh otkhodov [Renewable energy source based on environmentally safe combustion of municipal waste]. *Energetika i teplotekhnika* [Power engineering and heat engineering]. Ed. by V.E. Nakoryakov. Novosibirsk, 2017, vol. 21, pp. 105–112.
16. Medvedeva E.A., Ryapin I.Y., Urvatsev I.V., Tsyba V.Y. Evaluation of the use of renewable energy sources and peat in rural municipal economy. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63, no. 9, pp. 611–620. DOI: 10.1134/S0040601516090056. Translated from *Teploenergetika*, 2016, no. 9, pp. 9–19.
17. Ilyushin P.V. Analiz opyta ekspluatatsii i prichin vozniknoveniya avarii s povrezhdeniyami oborudovaniya parogazovykh ustanovok [Analysis of operational experience and causes of accidents



with damage to the equipment of steam and gas installations]. *Energoekspert = Energoexpert*, 2018, no. 3 (67), pp. 64–68.

18. Milyaev R.G., Serebryanskii S.S. Tekhnicheskoe perevooruzhenie energobloka № 3 na Kashirskoi GRES – filiale OAO "OGK-1" [Technical re-equipment of power unit №3 at Kashirskaya GRES- a branch of JSC 'OGK-1']. *Elektricheskie stantsii = Power Plants*, 2009, no. 6, pp. 33–37.

19. Zhukov V.V., Mikheev D.V., Tret'yakov P.M. Otsenka integral'noi konkurentosposobnosti avtonomnykh sistem energosnabzheniya maloi moshchnosti po tekhnicheskim, servisnym i ekonomicheskim pokazatelyam [Evaluating the integral competitiveness of small-capacity autonomous power supply systems in terms of technical, service and economic indicators]. *Vestnik MEI = MPEI Vestnik*, 2017, no. 3, pp. 20–27. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-20-27.

20. Grigoriev V.A., Zorin V.M., eds. *Teplovye i atomnye elektricheskie stantsii: spravochnik* [Thermal and nuclear power stations: the reference book]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 608 p.

21. Klimenko A.V., Zorin V.M., eds. *Teploenergetika i teplotekhnika. Obshchie voprosy: spravochnik* [Heat power engineering and heat engineering. General questions: the reference book]. Moscow, MEI Publ., 1999. 528 p.

22. Shchinnikov P.A., Nozdrenko G.V., Tomilov V.G., Ovchinnikov Yu.V., Lovtsov A.A., Kovalenko P.Yu., Zykova N.G., Vikhman O.A., Borodikhin I.V. *Kompleksnye issledovaniya TES s novymi tekhnologiyami* [Complex research of TPP with new technologies]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2005. 528 p.

23. Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A., eds. *Kompleksnyi eksergeticheskii analiz energoblokov TES s novymi tekhnologiyami* [Complex exergetic analysis of TPP power units with new technologies]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2009. 190 p.

24. Ol'khovskii G.G. Solid fuel gasification in the global energy sector (A review). *Thermal Engineering*, 2015, vol. 62, no. 7, pp. 465–472. DOI: 10.1134/S0040601515070071. Translated from *Teploenergetika*, 2015, no. 7, pp. 3–7.

25. Batorshin V.A. Pyleugol'nye energobloki Manjung 4 i RBK 8 [Pulverized coal power units Manjung 4 and RBK 8]. *Energetika za rubezhom = Power engineering abroad*, 2018, no. 2, pp. 30–39.

26. Zaitsev A.V., Ryzhkov A.F., Silin V.E., Zagrutdinov R.Sh., Popov A.V., Bogatova T.F. *Gazogeneratornye tekhnologii v energetike* [Gas-generating technologies in power engineering]. Ekaterinburg, Sokrat Publ., 2010. 611 p.

27. *Otsenka stoimosti stroitel'stva i ekspluatatsii elektrostantsii* [Estimation of the cost of construction and operation of power plants]. Report LI 260610. Lahmeyer International Russland. Moscow, Bad Vilbel, 2009. (In Russian). Available at: [https://www.np-sr.ru/ru/SR\\_0V001432](https://www.np-sr.ru/ru/SR_0V001432) (accessed 17.10.2020).

28. Shchinnikov P.A., Borush O.V. Sovremennye i perspektivnye cherty rossiiskogo rynka energeticheskogo mashinostroeniya [Modern and promising features of the Russian power engineering market]. *Energetika i teplotekhnika* [Power engineering and heat engineering]. Ed. by P.A. Shchinnikov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2019, vol. 22, pp. 7–20.

29. Larionov V.S., Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A., Zikov V.V. *Tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost' energoblokov TES* [Technical and economic efficiency of TPP power units]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1998. 31 p.

30. Zykova N.G., Serant F.A., Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A. Skhemno-parametricheskaya optimizatsiya kotlov TES s kol'tsevoi topkoi [Scheme and parameter optimization of TEP boilers with an annular furnace]. *Teplofizika i aeromehanika = Thermophysics and Aeromechanics*, 2003, no. 3, pp. 477–483. (In Russian).

31. Kumar R., Sharma A.Kr., Tewari P.C. Cost analysis of a coal-fired power plant using the NPV method. *Journal of Industrial Engineering International*, 2015, vol. 11 (4), pp. 495–504. DOI: 10.1007/s40092-015-0116-8.

32. Sadkin I.S., Shchinnikov P.A. [Method for evaluating capital investment in generating equipment for using underground coal gasification gas]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [Science. Technologies. Innovation], Novosibirsk, December 2–6, 2019, pt. 4, pp. 262–264. (In Russian).

33. Ryabov G.A., Folomeev O.M., Litun D.S., Sankin D.A., Dmitryukova I.G. Prospects for using the technology of circulating fluidized bed for technically refitting. *Thermal Engineering*, 2009, vol. 56, no. 1, pp. 31–40. DOI: 10.1134/S0040601509010066. Translated from *Teploenergetika*, 2009, no. 1, pp. 28–36.

34. Shmigol' I.N. [Problems and prospects of flue gas desulphurization at TPP in Russia]. *Ekologiya v energetike: trudy II mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Ecology in

energy: Proceedings of the II International scientific and practical conference], 19–21 October 2005, Moscow, pp. 107–114. (In Russian).

35. Zaichenko V.M., Shpil'rain E.E., Shterenberg V.Ya. Ekonomicheskie aspekty snizheniya potrebleniya prirodnogo gaza na teplovykh elektrostantsiyakh [Economic aspects of reducing natural gas consumption at thermal power plants]. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, 2001, no. 7, pp. 15–18. (In Russian).

36. Tumanovskii A.G., Kotler V.R. Prospects for solving environmental problems pertinent to thermal power stations. *Thermal Engineering*, 2007, vol. 54, no. 6, pp. 424–431. DOI: 10.1134/S004060150706002X. Translated from *Teploenergetika*, 2007, no. 6, pp. 5–11.

37. Black J. *Cost and performance baseline for fossil energy plants. Vol. 1. Bituminous coal and natural gas to electricity*. Final Report DOE/2010/1397. National Energy Technology Laboratory. Rev. 2. Pittsburgh, PA, USA, 2010. 626 p.

38. Veselov F.V., Erokhina I.V., Makarova A.S., Khorshev A.A. Comprehensive assessment of the effective scope of modernization of thermal power plants to substantiate the rational structure of the generating capacities for the future until 2035. *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, no. 3, pp. 161–169. DOI: 10.1134/S0040601517030107. Translated from *Teploenergetika*, 2017, no. 3, pp. 5–14.

39. Tumanovskii A.G. Prospects for the development of coal-steam plants in Russia. *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, no. 6, pp. 399–407. DOI: 10.1134/S0040601517060088. Translated from *Teploenergetika*, 2017, no. 6, pp. 3–13.

40. *Prognoz nauchno-tehnologicheskogo razvitiya otraslei toplivno-energeticheskogo kompleksa Rossii na period do 2035 goda* [Forecast of scientific and technological development of the fuel and energy complex of Russia for the period up to 2035]. Approved on October 14, 2016. Moscow, Ministry of Energy of Russia Publ., 2016. 106 p.

Для цитирования:

Щинников П.А., Францева А.А., Садкин И.С. Поагрегатная оценка капиталовложений в энергоблоки электростанций с использованием параметрической степенной функции // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 2–3 (79). – С. 123–138. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-123-138.

For citation:

Shchinnikov P.A., Frantseva A.A., Sadkin I.S. Poagregatnaya otsenka kapitalovlozhenii v energobloki elektrostantsii s ispol'zovaniem parametricheskoi stepennoi funktsii [Aggregate estimation of investments in power plant units using a parametric power function]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 2–3 (79), pp. 123–138. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-123-138.

УДК 621.311

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-139-155

## Методология управления ремонтами оборудования в электрических сетях нефтепромыслов\*

В.М. ЛЕВИН<sup>a</sup>, Н.П. ГУЖОВ<sup>b</sup>, Н.А. ЧЕРНЕНКО<sup>c</sup>, А.А. ЯХЬЯ<sup>d</sup>

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

<sup>a</sup> [levin@corp.nstu.ru](mailto:levin@corp.nstu.ru) <sup>b</sup> [guzov@ngs.ru](mailto:guzov@ngs.ru) <sup>c</sup> [N.Chernenko@corp.nstu.ru](mailto:N.Chernenko@corp.nstu.ru)

<sup>d</sup> [ammarazez384@gmail.com](mailto:ammarazez384@gmail.com)

Предложена инновационная методология управления ремонтами в распределительных электрических сетях и системах электроснабжения объектов нефтепромыслов. Методология позволяет обеспечить выбор оптимальных решений в соответствии с приоритетной целью управления за счет формализации риск-ориентированной модели планирования технического обслуживания и ремонтов (ТОиР) электрооборудования со стратегией «по техническому состоянию». Одной из главных опций в составе комплекса задач управления ТОиР является адаптивная модель технологической карты ремонта энергообъектов, сформированная с соблюдением ряда ключевых принципов. Разработанная модель позволяет оптимизировать объем и трудоемкость ремонтов электрооборудования определенного типа исходя из минимального состава технологических операций, необходимых для устранения выявленных дефектов. Выявление дефектов в электрооборудовании достигается применением методов технической диагностики и неразрушающего контроля. При этом каждый из дефектов фиксируется в дефектной ведомости на объект с определением степени критичности и закреплением конкретного вида корректирующего воздействия. Оптимальная приоритизация ремонтов электрооборудования выполняется в соответствии с функцией минимального риска в условиях действующих ограничений по надежности (индексу технического состояния оборудования) и располагаемым ресурсам (суммарным затратам на ТОиР). Оригинальность реализации ключевого рискованного события – нарушения электроснабжения объекта нефтепромысла – обеспечивает расчет вероятности и тяжести последствий отказа электрооборудования с учетом его технического состояния и особенностей схемы электроснабжения. Приведенный пример иллюстрирует эффективность предложенного подхода и подчеркивает обоснованность принимаемых оптимальных решений. Ключевые компоненты разработанной методологии нашли практическое применение в условиях реальной эксплуатации оборудования объектов нефтепромыслов.

---

\* Статья получена 16 марта 2020 г.

Статья подготовлена по результатам научно-исследовательской работы в рамках договора № 5450/02 от 10.07.2018 «Разработка стандарта и методических документов для оптимизации системы технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования ДО ПАО «Газпромнефть» по техническому состоянию и наработке».

**Ключевые слова:** система электроснабжения нефтепромыслов, электрооборудование, стратегия обслуживания, ремонт, техническое состояние, корректирующее воздействие, цели управления, эффективность эксплуатации, вероятность отказа, риск нарушения электроснабжения

## ВВЕДЕНИЕ

Длительная надежная и безопасная эксплуатация оборудования электрических сетей обеспечивается соблюдением комплекса нормативно-технических требований, согласно которым основными корректирующими воздействиями являются техническое обслуживание и ремонт (ТОиР). Плановый характер ТОиР электрооборудования (ЭО) предусматривает составление перспективных графиков введения корректирующих воздействий с фиксацией их вида, объема и стоимости на интервале планирования  $\Delta T$  (год). В зависимости от типа ЭО за ним закрепляется стратегия ТОиР, которая определяет подходы к планированию<sup>1</sup>.

До недавнего времени практически безальтернативной признавалась стратегия «по периодичности, наработке», регламентирующая планирование и реализацию корректирующих воздействий по ТОиР ЭО через определенные строго фиксированные промежутки времени [1]. Указанная стратегия наряду с достоинствами имеет существенный недостаток: она закрепляет за каждой единицей ЭО прохождение полного комплекса операций в рамках  $i$ -го корректирующего воздействия по мере наступления его планового срока независимо от наличия в том фактической потребности. Это определяет необоснованную избыточность стратегии «по периодичности, наработке» в отношении суммарных затрат времени, труда и материальных ресурсов, привлекаемых на ТОиР ЭО. Кроме того, увеличение частоты и продолжительности плановых отключений ЭО снижает надежность электроснабжения потребителей, а значит, и эффективность эксплуатации электрических сетей [2, 3].

С введением в практику эксплуатации электрических сетей методики расчета индекса состояния (ИС) единиц и/или групп однотипного ЭО<sup>2</sup> [4] расширились рамки применения ТОиР со стратегией «по техническому состоянию». Указанная стратегия предписывает выполнение корректирующих воздействий с произвольной периодичностью строго по необходимости, которая определяется в результате мониторинга и диагностирования параметров состояния ЭО с количественной оценкой ИС.

Массовый перевод ЭО на стратегию «по техническому состоянию» открывает перспективные возможности в направлении повышения эффективности эксплуатации распределительных электрических сетей разного назна-

---

<sup>1</sup> Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики. Утверждены Приказом Минэнерго России от 25.10.2017 № 1013. Доступен по: <https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minenergo-Rossii-ot-25.10.2017-N-1013>. Ссылка активна на 12 октября 2020 г.

<sup>2</sup> Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей. Утверждена Приказом Минэнерго России от 26.07.2017 № 676. Доступен по: <http://docs.cntd.ru/document/456088008>. Ссылка активна на 12 октября 2020 г.

чения. Для этого потребуется формализация описания и решения комплекса задач по обоснованию критериев эффективности в соответствии с приоритетными целями управления ТОиР, по разработке моделей, методик и алгоритмов планирования, корректировке параметров технических воздействий на основное ЭО с учетом влияния ключевых факторов риска и пр. Многие из указанных задач доведены до приемлемых практических результатов [5–8], обсуждаются перспективные методы и подходы к решению, однако процесс поиска наилучшего научно обоснованного решения по-прежнему далек от своего завершения.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Электрические сети нефтедобывающих производств в отличие, например, от объектов ПАО «Россети» осуществляют функцию электроснабжения исключительно технологических потребителей нефтепромысловых объектов (НПО). Это определяет различие в целевых приоритетах и критериях эффективности эксплуатации таких объектов. Так, для электрических сетей общего назначения долгосрочным стратегическим приоритетом служит обеспечение максимального уровня надежности электроснабжения потребителей, что регламентируется индексами надежности типа SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) – индекс средней частоты прерываний в работе системы, SAIDI (System Average Interruption Duration Index) – индекс средней длительности прерываний в работе системы и др. [9]. Для электрических сетей нефтепромыслов стратегическим целевым приоритетом является бесперебойность технологических процессов и минимум суммарного ущерба от недовыработки продукции (потерь добычи нефти). Таким образом, очевидны различия в оптимизационных подходах к планированию ТОиР и выбору параметров корректирующих воздействий на ЭО по периодичности и объему. Следует отметить, что решение оптимизационной задачи, как правило, выполняется в условиях всевозможных ограничений, например, по доступным материальным, трудовым и финансовым ресурсам (затратам на ТОиР ЭО), а также с учетом влияния многочисленных факторов риска.

Для электрических сетей нефтепромыслов ключевым рисковым событием служит отказ ЭО, питающего НПО. Отказ ЭО как случайное событие характеризуется такими параметрами, как вероятность ( $Q$ ) и частота ( $\omega$ ), которые зависят от ряда факторов. Различают постепенные и внезапные отказы ЭО [10]. Постепенные отказы, как правило, можно прогнозировать. Они обусловлены старением (ухудшением свойств материалов и элементов конструкций) ЭО. Внезапные отказы прогнозировать нельзя. Они возникают под воздействием внутренних и внешних по отношению к ЭО случайных факторов, таких как воздействие окружающей среды, ошибки эксплуатационного персонала и пр. Таким образом, вероятность (частота) отказа ЭО напрямую связана с его техническим состоянием, интегральной характеристикой которого является ИС, определяемый на основе данных технической документации и результатов диагностирования. Учет этой взаимосвязи для  $i$ -й единицы ЭО выполняется по следующей зависимости:

$$Q_i = 1 - \exp(-\omega_i)J_i, \quad (1)$$

где  $\omega_i$  (год<sup>-1</sup>) и  $J_i$  (о.е.) – значения средней частоты отказа и ИС  $i$ -й единицы ЭО. Кроме вероятности рисковое событие характеризуется тяжестью последствий (ущербы от нарушения технологии, поломки оборудования, угрозы экологии и безопасности персонала, недовыработки продукции). Составляющие суммарного ущерба ( $Y$ ) могут быть проранжированы [11] и количественно оценены для каждого типового НПО. Для этих целей в [12] использован термин «критичность», который служит интегральной оценкой вероятности и тяжести последствий ключевого рискового события для каждого типа НПО. Таким образом, критичность или функция риска отказа ЭО может быть записана в виде

$$R = Q \cdot M[Y], \quad (2)$$

где  $M[Y] = P_{\text{нагр}} \cdot \Delta t \cdot D \cdot c$  – математическое ожидание ущерба;  $P_{\text{нагр}}$  (кВт) – мощность нагрузки;  $\Delta t$  (ч) – время перерыва электроснабжения;  $D$  (т/кВт · ч) – удельная производительность потребителя НПО;  $c$  (руб/т) – удельная стоимость потерь. Суммарное количество и объем корректирующих воздействий по ТОиР ЭО служат параметрами оптимизации на интервале планирования ( $\Delta T$ ), так как в конечном итоге определяют одну из главных составляющих интегральных производственных ресурсов сетевого предприятия ( $C_{\text{ТОиР}}$ ), которые всегда ограничены [13]. Исходя из этого в качестве целевой функции оптимизации следует принять минимум функции риска  $\text{Mim}(R)$ , а в качестве ограничений – следующие соотношения:

$$C_{\text{ТОиР}} \leq C_{\text{пред}}, \quad \text{ИС}_i \geq \text{ИС}_{\text{пр}} \quad \text{при } i = \overline{1, N}. \quad (3)$$

Здесь  $C_{\text{пред}}$  – располагаемый интегральный ресурс сетевого предприятия на ТОиР ЭО на год планирования (например, в человеко-часах или рублях);  $\text{ИС}_{\text{пр}}$  – предельно допустимое значение ИС для каждой единицы ЭО определенного типа;  $N$  – количество единиц ЭО, подлежащих ТОиР на год планирования (штук). Параметрами оптимизации корректирующих воздействий при этом будут являться периодичность воздействия по ТОиР каждой единицы ЭО ( $T_{\text{ТОиР}}$ ) на интервале планирования и суммарная трудоемкость совокупности операций по устранению дефектов ( $\sum \text{Tr}_i^j$ ) в составе каждого  $i$ -го корректирующего воздействия определенного вида по каждой  $j$ -й единице из  $N$  единиц ЭО, подлежащих плановому ТОиР.

На основании изложенного очевидна необходимость формирования методологии принятия решений, которая бы учитывала и сочетала в себе сценарный подход, многообразие влияющих факторов и вариативность целей управления. Ключевые компоненты разрабатываемой методологии представляет и обсуждает данная статья.

## 2. МЕТОДОЛОГИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ. МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ

### Модель планирования работ по ТОиР электрооборудования

Эксплуатация ЭО со стратегией «по техническому состоянию» предусматривает первоначальное формирование плана-графика ППР на календарный год. Принципы его формирования основаны на понятии ремонтного цикла – интервала времени между двумя последовательными капитальными ремонтами (КР), которые предназначены для восстановления частично утраченной работоспособности ЭО. На интервале ремонтного цикла ( $T_{р.ц}$ ) ЭО с фиксированной нормативной периодичностью размещаются остальные виды корректирующих воздействий, к которым относят: осмотр (О) – визуальный контроль ЭО; углубленный осмотр (УО) – инструментальный контроль с применением средств технической диагностики и неразрушающего контроля (ТД и НК); техническое обслуживание (ТО) – комплекс операций по поддержанию работоспособности ЭО в процессе эксплуатации без его отключения; текущий ремонт (ТР) – комплекс операций для гарантированного обеспечения работоспособности ЭО с выводом его из работы;

При составлении плана-графика ППР на текущий календарный год учитывается дата предыдущего КР и/или ТР ( $T_{р.ППР}$ ). Составленный подобным образом план фиксируется и представляет собой «базовую сетку» для получения плана-графика ТОиР ЭО «по техническому состоянию». План-график ТОиР «по техническому состоянию» не является статичным. Он периодически корректируется за счет смещения сроков выполнения ремонтных воздействий в соответствии с фактической необходимостью, которая определяется техническим состоянием ЭО. В свою очередь, интегральной характеристикой технического состояния служит ИС.

Таким образом, получение информации о значении ИС единицы ЭО является необходимым и достаточным условием для принятия решения о корректировке межремонтного периода на интервале планирования. Практика эксплуатации ЭО в распределительных сетях нефтепромыслов доказала оправданность следующих правил корректировки:

1) если для  $i$ -й единицы ЭО  $25 \% \leq ИС_i < 50 \%$ , то выполнение ремонта планируется непосредственно на следующий календарный месяц с фиксацией даты в графике ТОиР. Это позволяет исключить вероятные отказы ЭО, в том числе с тяжелыми последствиями;

2) если значение  $ИС_i \geq 50 \%$ , то корректировка межремонтного периода ТР производится согласно выражению

$$T_{мр} = kT_{норм},$$

где  $T_{мр}$  – расчетная продолжительность межремонтного периода;  $T_{норм}$  – нормативная продолжительность межремонтного периода для стратегии ППР;  $k$  – поправочный коэффициент, принимающий значение из диапазона [1...1,5]. Указанный диапазон устанавливается экспертным путем на основе анализа функционирования ЭО со стратегией «по техническому состоя-

нию». После получения скорректированного значения межремонтного периода производится определение даты проведения ремонта:

$$T_p = T_{p\text{ППР}} + T_{\text{мр}},$$

где  $T_{p\text{ППР}}$  – дата проведения предыдущего ремонта из плана-графика ППР. В табл. 1 приводятся значения нормативных межремонтных периодов ( $T_{\text{норм}}$ ) для некоторых типов ЭО 6(10) кВ по видам основных корректирующих воздействий.

Таблица 1

Table 1

### Значения нормативных межремонтных периодов оборудования 6(10) кВ

#### Values for the periods between repairs of the 6 (10) kV equipment

№ п/п	Наименование оборудования	Периодичность, мес.		
		ТО	ТР	КР
1	ВЛ 6 (10) кВ на металлических и железобетонных опорах	6	24	120
2	КЛ 6 (10) кВ	6 (3)	36	60
3	Трансформатор силовой 6 (10) кВ	3	12	144
4	Выключатель масляный 6 (10) кВ	1	12	96
5	Выключатель вакуумный 6 (10) кВ	6	24	120
6	Разъединитель 6 (10) кВ	1	12	96

Значение поправочного коэффициента  $k$  определяется по табл. 2 в соответствии со значениями ИС ЭО, рассчитанными по данным, полученным в результате осмотра, углубленного осмотра и диагностических обследований.

Таблица 2

Table 2

### Поправочный коэффициент для корректировки межремонтного периода

#### Correction factor for the inter-repair period adjustment

ИС, %	50...70	70...85	85...100
$k$ , о.е	1,0	1,25	1,5

### Адаптивная модель технологической карты ремонта электрооборудования

Технологическая карта (ТК) служит основным организационно-технологическим документом в управлении ТОиР ЭО. Она содержит комплекс мероприятий по организации труда с использованием наиболее эффективных современных средств механизации, технологической оснастки, инструмента и



приспособлений. Как правило, в ТК включают наиболее прогрессивные и рациональные методы и технологии ТОиР, способствующие повышению производительности труда, улучшению качества работ, снижению их себестоимости. Типовая модель и методика формирования ТК ППР объектов электроэнергетики утверждены нормативным документом<sup>3</sup>. В соответствии с требованиями ТК подразделяются по видам воздействий на объект (О, УО, ТО, ТР, КР) и содержат следующую информацию: характеристика объекта обслуживания; типовой перечень необходимых операций; трудоемкость каждой операции в человеко-часах; количество задействованного персонала по функциям (состав бригады); расходные материалы, оснастка, инструмент, спецмеханизмы, включая транспортные средства.

Управление ТОиР ЭО со стратегией «по техническому состоянию» на основе критерия минимального риска основано на принятии решений в условиях случайности факторов, таких как повреждаемость ЭО, отказ электрооборудования НПО, тяжесть последствий отказа, наличие необходимого ресурса и др. В этих условиях типовая модель ТК оказывается непригодной для планирования ТОиР ЭО в силу своей избыточности и детерминированности. Необходима адаптивная модель ТК, позволяющая корректировать суммарную трудоемкость работ по ремонту ЭО исходя из минимального набора операций, необходимых и достаточных для качественного восстановления и проверки работоспособности объекта обслуживания (ОО) с соблюдением стандартных мер и правил безопасности.

Адаптивная модель ТК ремонта ОО основана на типовом разделении полного перечня операций на два блока – организационный и технологический. Организационный блок включает операции, связанные с логистикой, подготовкой рабочего места, выполнением санитарно-гигиенических норм, допуском к ОО, отчетностью и является некорректируемым. Технологический блок включает операции, направленные на устранение неисправностей, а также регулировку и проверку работоспособности ОО. Именно он допускает необходимую корректировку. Формирование адаптивной модели ТК должно выполняться по следующим ключевым принципам:

1) полная идентификация возможных неисправностей (дефектов) функциональных узлов единицы ЭО и соответствующих им исправляющих операций;

2) объективная оценка трудоемкости каждой исправляющей операции в условиях выполнения на ОО;

3) ранжирование дефектов по степени критичности (с точки зрения продления эксплуатации ОО), определяемой средствами технической диагностики и неразрушающего контроля, например: некритический дефект (НКД), критический дефект (КД).

Соблюдение указанных принципов обеспечивает определение результирующей трудоемкости  $\left(\sum Tr_i^j\right)$  не как суммы трудозатрат по полному перечню операций, содержащихся в типовой ТК на ремонт ОО, а по сокращенному перечню исправляющих операций, требующих фактического выполне-

<sup>3</sup> СТО 56947007-29.240.55.168-2014 Методические указания по разработке технологических карт и проектов производства работ по техническому обслуживанию и ремонту ВЛ. Утверждено Приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 02.04.2014 № 165. Доступно по: [https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO\\_56947007-29.240.55.168-2014.pdf](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.240.55.168-2014.pdf). Ссылка активна на 12 октября 2020.

ния в конкретных условиях. Методология определяет однозначное формирование ТК на ремонт любого из ОО в соответствии с выявленными и классифицированными дефектами электрооборудования, которым с применением адаптивной модели поставлен в соответствие минимальный перечень исправляющих технологических операций. На рис. 1 показана структура альбома ТК на ремонты электрооборудования со стратегией «по техническому состоянию», генерируемого на основе адаптивной модели.

ТК 01		Тип объекта обслуживания – ВЛ 6(10) кВ Вид воздействия - ремонт	
Организационный раздел / начало работ		Перечень операций Трудоёмкость, чел.час	
Технологический раздел		Трудоёмкость, чел.час	
Перечень операций: 1 --- X 2 --- X 3 --- X ... n-1 --- X n --- X	} $\Sigma X$	---	} $\Sigma Y$
		---	
Организационный раздел / окончание работ		Перечень операций Трудоёмкость, чел.час	

Рис. 1. Альбом технологических карт на ремонты электрооборудования со стратегией «по техническому состоянию» на основе адаптивной модели

Fig. 1. Album of technological maps for electrical equipment repairs with the “condition based maintenance” strategy based on the adaptive model

### Алгоритм формирования дефектной ведомости для объекта обслуживания

Одним из обязательных инструментов для планирования ремонтов ЭО со стратегией «по техническому состоянию» является дефектная ведомость. Дефектная ведомость формируется для каждого ОО и содержит информацию из листов осмотра. Фактически это перечень дефектов, выявленных на ОО при проведении О или УО, но не устраненных на текущий момент времени, с указанием степени критичности каждого дефекта и закреплением за ним определенного вида корректирующего воздействия. В качестве корректирующих воздействий ТОиР, как правило, назначаются такие виды воздействий, как ТО и ТР. В случае необходимости мониторинга степени неисправности ЭО и уточнения объема ремонта назначается проведение УО с закреплением конкретного метода ТД и НК. На рис. 2 представлен алгоритм формирования дефектной ведомости обобщенного ОО. В зависимости от типа ЭО каждому дефекту присваивается индивидуальный идентификационный код, по которому производится закрепление за дефектом конкретного метода ТД и НК.

Код дефекта используется также при формировании адаптивной ТК ремонта ОО для идентификации обнаруженного дефекта и связанного с ним перечня исправляющих операций.

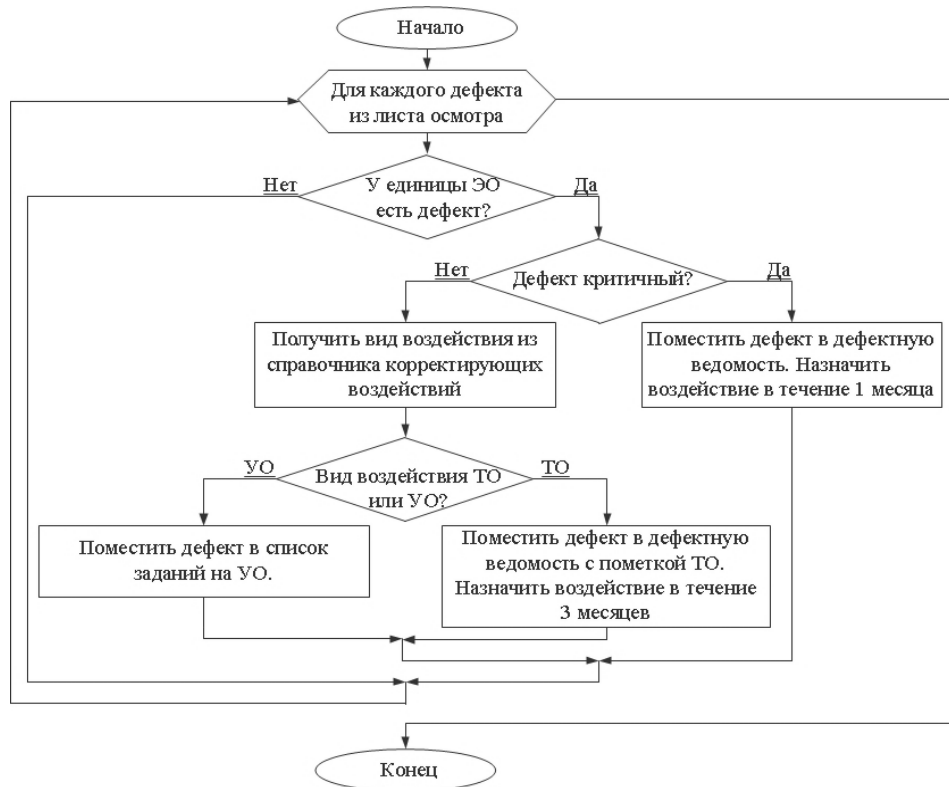


Рис.2. Алгоритм формирования дефектной ведомости единицы электрооборудования

Fig. 2. Algorithm for forming a defective statement of an electrical equipment unit

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ. АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера, иллюстрирующего разработанную методологию управления ремонтами ЭО в распределительных сетях нефтепромыслов, рассмотрим два однотипных объекта, работающих в схожих условиях. Оба сетевых объекта имеют в своем составе одноцепные ВЛ 6 кВ длиной 2 и 3 км, выполненные на металлических опорах проводом АС-95.

Первый объект (ВЛ-1) обеспечивает электроснабжение технологических потребителей дожимной насосной станции с устройством предварительного сброса пластовой воды (ДНС с УПСВ) мощностью  $P_{\text{нагр}} = 1000$  кВт, временем перерыва электроснабжения  $\Delta t = 1$  ч и удельной производительностью  $D = 0,01$  т/кВт · ч.

Второй объект (ВЛ-2) питает потребителей кустовой площадки нефтяных скважин суммарной мощностью  $P_{\text{нагр}} = 1000$  кВт,  $\Delta t = 0,015$  ч,  $D$  т/кВт · ч. Пусть состояние ВЛ-1 и ВЛ-2 характеризуется наличием в дефектных ведомостях (табл. 3) различных по характеру дефектов.

Таблица 3

Table 3

**Состав дефектов ВЛ-1 и ВЛ-2**  
**The composition of the defects of OL-1 and OL-2**

Функциональный узел	Код дефекта	Наименование (характеристика) дефекта	Контролируемый параметр	Уровень критичности		Корректирующие воздействия	
				КД	НКД	КД	НКД
ВЛ-1							
Трасса	Т09	Наличие вблизи ВЛ не предусмотренных проектом объектов	$L < 10$ м	+	-	ТО	-
Опора	Металлическая опора						
	С02	Отрывы элементов конструкции опор		+	+	ТР	ТО
Пролет	П07	Изменение стрел провеса и расстояний от проводов ВЛ до земли, до пересекаемых объектов, между фазами до значений, отличных от допустимых		+	-	ТР	-
ВЛ-2							
Опора	С08	Отклонение от вертикали		+	-	ТР	ТО
Пролет	П01	Ремонт провода, наложение бандажа с опусканием провода		+	-	ТР	-

В табл. 4 приводится перечень технологических операций адаптивной ТК на ремонт каждого из ОО (ВЛ-1 и ВЛ-2). Показаны отличия в суммарных трудозатратах на их выполнение ( $\sum Tr_i^j$ ) с использованием поправочных коэффициентов, учитывающих, в частности, такие факторы, как природно-климатические условия и транспортную доступность.

Расчеты ИС ВЛ по методике [4] приведены в табл. 5. В расчетах приняты балльные оценки групп параметров состояния отдельных функциональных узлов ВЛ 6 кВ в диапазоне от 10 (наилучшее) до 1 (наихудшее).

По результатам расчетов ИС функциональных узлов вычисляется оценка ИС каждого из объектов в целом:

$$J_{ВЛ-1} = (0,91 \cdot 0,334 + 0,1 \cdot 0,666) 100 \% = 37 \%,$$

$$J_{ВЛ-2} = (1 \cdot 0,334 + 0,37 \cdot 0,666) 100 \% = 58 \%.$$

Как следует из расчетов, состояние ВЛ-1 по значению ИС попадает в категорию  $\geq 25 \%$  и  $< 50 \%$  (неудовлетворительное). При этом выполнение ре-

монта необходимо планировать непосредственно на следующий за расчетным календарный месяц с фиксацией даты в графике ТОиР. Для ВЛ-2 коэффициент  $k$  корректировки периодичности ремонта принимает значение 1,0 (см. табл. 2), т. е. межремонтный период в графике ТОиР не корректируется. Таким образом, исходя из оценки технического состояния ремонт ВЛ-1 более приоритетен, чем ремонт ВЛ-2, и должен быть запланирован по графику ТОиР в более ранние сроки.

При расчете вероятностей отказа ОО с учетом их фактического технического состояния по формуле (1) используется значение средней частоты отказа для ВЛ-6 кВ длиной 2-3 км, равное  $\omega = 0,202 \text{ год}^{-1}$  [14, 15]:

$$Q_{\text{ВЛ-1}} = 1 - \exp(-0,202) \cdot 0,37 = 0,698,$$

$$Q_{\text{ВЛ-2}} = 1 - \exp(-0,202) \cdot 0,58 = 0,526.$$

Таблица 4

Table 4

**Перечень технологических операций адаптивной технологической карты на ремонт ВЛ-1 и ВЛ-2**

**List of technological operations of the adaptive technological map for the repair of OL-1 and OL-2**

ВЛ-1			ВЛ-2		
Код дефекта	Исправляющие операции	$\Sigma \text{Tr}_i^j$ чел.-ч	Код дефекта	Исправляющие операции	$\Sigma \text{Tr}_i^j$ чел.-ч
Т09	Расчистка трассы от поросли, ликвидация посторонних предметов, рубка угрожающих падением деревьев	10	С08	Проверка состояния опор и их установки (отклонение от вертикали, перекосы элементов), при необходимости выравнивание опор	9,3
С02	Протяжка анкерных болтов, восстановление уголков крестовых связей				
П07	Перетягивание отдельных участков проводов, подтяжка и регулировка провеса проводов		П01	Ремонт провода, наложение бандажа с опусканием провода	

Расчеты функции риска (целевой функции оптимизации) для каждой из ВЛ выполняются по формуле (2) при значении удельной стоимости потерь добычи нефти  $c = 15\,000$  рублей за тонну. Полученные результаты:

$$R_{\text{ВЛ-1}} = 1000 \cdot 1 \cdot 0,01 \cdot 0,698 \cdot 15 \cdot 10^3 = 104,7 \text{ тыс. рублей};$$

$$R_{\text{ВЛ-2}} = 1000 \cdot 0,015 \cdot 10 \cdot 0,526 \cdot 15 \cdot 10^3 = 1183,5 \text{ тыс. рублей}$$

свидетельствуют о том, что риск нарушения электроснабжения потребителей НПО при отказе ВЛ-2 более чем на порядок превышает аналогичный риск при отказе ВЛ-1.

Таким образом, по критерию минимального риска наивысший приоритет при планировании получает ремонт ВЛ-2, отказ которой, как показали расчеты, менее вероятен, чем отказ ВЛ-1, однако вызывает более тяжелые последствия. С точки зрения проверки выполнения условий (3) ограничимся общими рассуждениями. В качестве наиболее вероятного примем сценарий, согласно которому требуемые на ТОиР ЭО затраты не превысят располагаемой величины ( $C_{\text{пред}}$ ), а  $ИС_{\text{ОО}} > ИС_{\text{пр}} = 25\%$ .

Согласно принятому сценарию оптимальным решением задачи является приоритетное выполнение ремонта ВЛ-2 в течение календарного месяца от расчетной даты. В этом случае выполнение ремонта ВЛ-1 следует планировать через месяц после ремонта ВЛ-2. Такое решение, в свою очередь, позволит повысить индекс технического состояния ВЛ-1, уменьшить вероятность ее отказа, а следовательно, величину суммарного риска на рассматриваемом горизонте планирования.

Таблица 5

Table 5

**Результаты расчета индекса состояния ВЛ-1 и ВЛ-2**

**The results of the calculation of condition index OL-1 and OL-2**

Функциональный узел	Группа параметров	Балльная оценка группы параметров ВЛ-1 / ВЛ-2	«Вес» группы параметров в оценке узла	Расчеты ИС объектов по ИС функциональных узлов
Опора	Крепления опоры, стойки, траверсы, крюка, изолятора на стойке опоры, провода	10	0,3	<p><b>ВЛ-1</b>  <math>(0,3 \cdot 10 + 0,1 \cdot 1 + 0,2 \cdot 10 + 0,1 \cdot 10 + 0,3 \cdot 10) / 10 = \mathbf{0,91}</math></p> <p><b>ВЛ-2</b>  <math>(0,3 \cdot 10 + 0,1 \cdot 10 + 0,2 \cdot 10 + 0,1 \cdot 10 + 0,3 \cdot 10) / 10 = \mathbf{1,0}</math></p>
	Приставка, стойка, подкос	1 / 10	0,1	
	Траверса, крюк, изолятор на траверсе	10	0,2	
	Заземляющее устройство	10	0,1	
	Коммутационные аппараты, разрядники	10	0,3	
Пролет	Трасса ВЛ	1 / 10	0,3	<p><b>ВЛ-1</b>  <math>(0,3 \cdot 1 + 0,7 \cdot 1) / 10 = \mathbf{0,1}</math></p> <p><b>ВЛ-2</b>  <math>(0,3 \cdot 10 + 0,7 \cdot 1) / 10 = \mathbf{0,37}</math></p>
	Провод, кабельная вставка	1 / 1	0,7	

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совершенствование методологии управления ТОиР ЭО со стратегией «по техническому состоянию» на основе риск-ориентированных моделей и алгоритмов принятия решений способствует повышению эффективности функционирования электрических сетей и промышленных технологических комплексов.

Предложенная авторами инновационная методология ориентирована на применение в распределительных электрических сетях и системах электропитания нефтепромысловых объектов. Методология обеспечивает формализованное описание и решение комплекса задач планирования ТОиР, выбора и корректировки вида, объемов и периодичности технических воздействий на ЭО со стратегией «по техническому состоянию». Целевой функцией оптимизации параметров технических воздействий является минимум суммарного риска от нарушений электроснабжения потребителей НПО. В качестве главных ограничений на область допустимых решений используются располагаемые ресурсы предприятия (суммарные затраты на ТОиР) и надежность (предельно допустимое значение ИС ЭО). Расчет суммарного риска предусматривает определение потерь добычи нефти от каждого технологического потребителя с учетом индивидуальных особенностей его электроснабжения, а также определение вероятностей отказа ЭО с учетом его фактического технического состояния. Одной из главных опций в составе методологии служит адаптивная модель технологической карты на ремонт ЭО со стратегией «по техническому состоянию». В основу ее построения положен ряд ключевых принципов, таких как полная идентификация возможных дефектов функциональных узлов единицы ЭО и соответствующих им исправляющих операций, объективная оценка трудоемкости каждой исправляющей операции в условиях ее выполнения на ОО, ранжирование дефектов по степени критичности, определяемой средствами ТД и НК. Это обеспечивает определение объема корректирующего воздействия на ЭО лишь по сокращенному перечню исправляющих операций, требующих фактического выполнения в конкретных условиях. Логические и расчетно-аналитические достоинства разработанной методологии иллюстрирует конкретный пример. К сожалению, рамки статьи ограничивают возможность демонстрации предложенного комплекса решений в полной мере, однако приведенный пример убедительно показывает четкую последовательность расчетов, достоверность результатов, логику разрешения противоречий при выборе приоритетов и оценке эффективности получаемых результатов.

Закономерной потребностью в развитии и более эффективном использовании разработанной методологии управления ТОиР ЭО нефтепромысловых объектов, связанной с большой размерностью решаемого комплекса задач, является ее реализация на платформе специализированного программного обеспечения. Следует отметить, что представленные компоненты разработанной методологии нашли практическое применение в условиях реальной эксплуатации ЭО НПО.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Синягин Н.Н.* Система планово-предупредительного ремонта электрооборудования промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1984. – 446 с.
2. *Короткевич М.А.* Основные направления совершенствования эксплуатации электрических сетей. – Минск: Техноперспектива, 2003. – 373 с.
3. *Назарычев А.Н.* Модели и методы оптимизации ремонта электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния. – Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2002. – 172 с.
4. *Грабчак Е.П.* Оценка технического состояния энергетического оборудования в условиях цифровой экономики // Надежность и безопасность энергетики. – 2017. – № 10 (4). – С. 268–274.
5. *Петросенко А.В., Тульский В.Н.* Применение многокритериального подхода и комбинированного анализа при формировании производственной программы электросетевых организаций // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – № 5 (56). – С. 38–49.
6. О методологии расчета технического риска на основе вероятности и последствий отказа функционального узла и единицы основного технологического оборудования / Е.П. Грабчак, Е.А. Медведева, А.О. Петренко, Т.В. Щинова // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – № 1 (52). – С. 22–29.
7. *Busson M.* RCM3: risk-based reliability centered maintenance. – 3rd ed. – New York: Industrial Press, 2018. – 500 p.
8. *Антоненко И.Н.* Методология RCM: ретроспектива и перспектива надежность-ориентированного технического обслуживания // Энергия единой сети. – 2019. – № 1 (43). – С. 34–46.
9. *Сахарова И.В.* Об учете качества услуг в тарифном регулировании распределительных электросетевых компаний в российской и зарубежной практике // Современная экономика: проблемы и решения. – 2013. – № 5 (41). – С. 43–51.
10. *Левин В.М., Секретарев Ю.А.* Оценка влияния на надежность системы электроснабжения различного рода дефектов ее основных элементов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Т. 11, № 4 (44). – С. 55–63.
11. *Лесных В.В., Тимофеева Т.Б., Петров В.С.* Проблемы оценки экономического ущерба, вызванного перерывами в электроснабжении // Экономика региона. – 2017. – Т. 13, вып. 3. – С. 847–858.
12. ГОСТ 27.310–95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 18 с.
13. *Антоненко И.Н.* Риск-ориентированный подход к управлению производственными активами энергетики // Энергоэксперт. – 2020. – № 1 (23). – С. 26–33.
14. *Левин В.М.* Инновационные решения в управлении ремонтами энергетического оборудования нефтедобывающего комплекса // Главный энергетик. – 2020. – № 1. – С. 30–39.
15. *Napoleone L, Roda I, Macchi M.* The implications of condition monitoring on asset-related decision-making in the Italian power distribution sector // IFAC PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49 (28). – P. 108–113.

*Левин Владимир Михайлович*, доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – диагностика и эксплуатационная надежность электрооборудования. Имеет более 80 публикаций, в том числе монографию. E-mail: levin@corp.nstu.ru

*Гужов Николай Петрович*, кандидат технических наук, доцент кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – оптимизация систем электроснабжения потребителей с учетом состояния оборудования. Имеет более 45 публикаций. E-mail: guzov@ngs.ru

*Черненко Наталья Александровна*, старший преподаватель кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – организация надежной эксплуатации оборудования и его изоляционных систем. Имеет около 20 публикаций. E-mail: N.Chernenko@corp.nstu.ru



*Яхья Аммар Абдулазиз*, аспирант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – диагностика и оценка технического состояния силового маслонаполненного оборудования. Имеет 9 публикаций. E-mail: ammarazez384@gmail.com

*Levin Vladimir M.*, D.Sc. (Eng.), head of the department of Automated Electric Power Systems, Novosibirsk State Technical University. The main field of his scientific research is diagnostics and operational reliability of electrical equipment. He has over 80 publication, including a monograph. E-mail: levin@corp.nstu.ru

*Guzhov Nikolay P.*, PhD (Eng.), associate professor of the department of Power Supply Systems for Enterprises, Novosibirsk State Technical University. The main field of his scientific research is the optimization of consumer power supply systems taking into account the state of the equipment. He has over 45 publications. E-mail: guzov@ngs.ru

*Chernenko Natalya A.*, senior lecturer, Department of Engineering and High Voltage Electrophysics, Novosibirsk State Technical University. The main field of her scientific research is the organization of reliable operation of equipment and its insulation systems. She has about 20 publications. E-mail: N.Chernenko@corp.nstu.ru

*Yahya Ammar A.*, postgraduate student of the department of Automated Electric Power Systems, Novosibirsk State Technical University. The main field of his scientific research is diagnostics and assessment of the technical condition of power oil-filled equipment. He has 9 publications. E-mail: ammarazez384@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-139-155

### ***Methodology for managing equipment repairs in oilfield electrical networks\****

*V.M. LEVIN<sup>a</sup>, N.P. GUZHOV<sup>b</sup>, N.A. CHERNENKO<sup>c</sup>, A.A. YAHYA<sup>d</sup>*

*Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation*

<sup>a</sup> levin@corp.nstu.ru   <sup>b</sup> guzov@ngs.ru   <sup>c</sup> N.Chernenko@corp.nstu.ru

<sup>d</sup> ammarazez384@gmail.com

#### **Abstract**

An innovative methodology for managing repairs in distribution networks and power supply systems for oilfield facilities is proposed in this paper. The methodology makes it possible to select optimal solutions in accordance with the priority management goal by formalizing a risk-based model for planning maintenance and repair (M&R) of electrical equipment with a "condition-based maintenance" strategy. One of the main options in the complex of M&R management tasks is an adaptive model of the technological map for the repairs of power facilities, formed in compliance with a number of key principles. The developed model allows you to optimize the volume and complexity of repairs of electrical equipment of a certain type based on the minimum composition of technological operations necessary to eliminate the identified defects. Detection of defects in electrical equipment is achieved by using methods of technical diagnostics and non-destructive testing. In this case, each of the defects is recorded in the defect statement for the object, with the determination of the degree of criticality and fixing a specific type of corrective action. Optimal prioritization of electrical equipment repairs is performed in

---

\* Received 16 March 2020.

*The article is based on the results of research work under the agreement No. 5450/02 dated 10.07.2018 "Development of standards and methodological documents for optimizing the system of maintenance and repair of power equipment TO PJSC Gazprom Neft in terms of technical condition and operating time".*

accordance with the minimum risk function under current restrictions on reliability (an equipment technical condition index) and available resources (total maintenance costs). The originality of the implementation of a key risk event – a power supply failure of an oilfield facility provides calculating the probability and severity of the consequences of an electrical equipment failure taking into account its technical condition and features of the power supply scheme. The given example illustrates the effectiveness of the proposed approach and emphasizes the validity of optimal decisions. The key components of the developed methodology have found practical application in the conditions of real operation of the equipment of oilfield facilities.

**Keywords:** oilfield power supply system, electrical equipment, maintenance strategy, repair, technical condition, corrective action, management goals, operational efficiency, probability of failure, risk of power failure

## REFERENCES

1. Sinyagin H.H. *Sistema planovo-predupreditel'nogo remonta elektrooborudovaniya promyshlennykh predpriyatiy* [System of scheduled preventive maintenance of electrical equipment of industrial enterprises]. Moscow, Energiya Publ., 1984. 446 p.
2. Korotkevich M.A. *Osnovnye napravleniya sovershenstvovaniya ekspluatatsii elektricheskikh setei* [Main directions for improving the operation of electric networks]. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ., 2003. 373 p.
3. Nazarychev A.N. *Modeli i metody optimizatsii remonta elektrooborudovaniya ob"ektov energetiki s uchetom tekhnicheskogo sostoyaniya* [Models and methods for optimizing the repair of electrical equipment of power facilities, taking into account the technical condition]. Ivanovo, IGEU Publ., 2002. 172 p.
4. Grabchak E.P. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya energeticheskogo oborudovaniya v usloviyakh tsifrovoi ekonomiki [Assessment of technical condition of power equipment in conditions of digital economy]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*, 2017, no. 10 (4), pp. 268–274.
5. Petrosenko A.V., Tul'skii V.N. Primenenie mnogokriterial'nogo podkhoda i kombinirovannogo analiza pri formirovanii proizvodstvennoi programmy elektrosetevykh organizatsii [Application of a multi-criteria approach and combined analysis in the formation of the production program of electric grid organizations]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric power. Transmission and distribution*, 2019, no. 5 (56), pp. 38–49.
6. Grabchak E.P., Medvedeva E.A., Petrenko A.O., Shchinova T.V. O metodologii rascheta tekhnicheskogo riska na osnove veroyatnosti i posledstviy otkaza funktsional'nogo uzla i edinitsy osnovnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya [On the methodology for calculating technical risk based on the probability and consequences of failure of a functional unit and a unit of main technological equipment]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric power. Transmission and distribution*, 2019, no. 1 (52), pp. 22–29.
7. Busson M. RCM3: risk-based reliability centered maintenance. 3rd ed. New York, Industrial Press, 2018. 500 p.
8. Antonenko I.N. Metodologiya RCM: retrospektiva i perspektiva nadezhnostno-orientirovannogo tekhnicheskogo obsluzhivaniya [RCM methodology: a retrospective and perspective of reliability-oriented maintenance]. *Energiya edinoi seti = Energy of Unified Grid*, 2019, no. 1 (43), pp. 34–46.
9. Sakharova I.V. Ob uchete kachestva uslug v tarifnom regulirovanii raspredelitel'nykh elektrosetevykh kompanii v rossiiskoi i zarubezhnoi praktike [On the accounting of quality of services in tariff regulation of distributive electro-network companies in Russian and foreign practice]. *Sovremennaya ekonomika: problemy i resheniya = Modern Economics: problems and solutions*, 2013, no. 5 (41), pp. 43–51.
10. Levin V.M., Sekretarev Yu.A. Otsenka vliyaniya na nadezhnost' sistemy elektrosnabzheniya razlichnogo roda defektov ee osnovnykh elementov [Evaluation of the effect on the reliability of the electrical supply system of a different kind of defects of its basic elements]. *Vestnik Kazanskogo*

gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Kazan state power engineering university bulletin, 2019, vol. 11, no. 4 (44), pp. 55–63.

11. Lesnykh V.V., Timofeyeva T.B., Petrov V.S. Problemy otsenki ekonomicheskogo ushcherba, vyzvannogo pereryvami v elektrosnabzhenii [Problems of the assessment of economic damage caused by power supply interruption]. *Ekonomika regiona = Economy of Region*, 2017, vol. 13, iss. 3, pp. 847–858.

12. GOST 27.310–95. *Nadezhnost' v tekhnike. Analiz vidov, posledstviy i kritichnosti otkazov. Osnovnyye polozeniya* [State standard 27.310–95. Dependability in technics. Failure mode, effects and criticality analysis. Basic principles]. Moscow, Standards Publ., 2002. 18 p.

13. Antonenko I.N. Risk-orientirovannyi podkhod k upravleniyu proizvodstvennymi aktivami energetiki [Risk-based approach to managing energy production assets]. *Energoekspert = Energoexpert*, 2020, no. 1 (23), pp. 26–33.

14. Levin V.M. Innovatsionnye resheniya v upravlenii remontami energeticheskogo oborudovaniya nefte dobyvayushchego kompleksa [Innovative solutions in power equipment repairs management of the oil-producing complex]. *Glavnyi energetik = Chief power*, 2020, no. 1, pp. 30–39.

15. Napoleone L., Roda I., Macchi M. The implications of condition monitoring on asset-related decision-making in the Italian power distribution sector. *IFAC PapersOnLine*, 2016, vol. 49 (28), pp. 108–113.

Для цитирования:

Методология управления ремонтами оборудования в электрических сетях нефтепромыслов / В.М. Левин, Н.П. Гужов, Н.А. Черненко, А.А. Яхья // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 3–4 (79). – С. 139–155. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-139-155.

For citation:

Levin V.M., Guzhov N.P., Chernenko N.A., Yahya A.A. Metodologiya upravleniya remontami oborudovaniya v elektricheskikh setyakh neftepromyslov [Methodology for managing equipment repairs in oilfield electrical networks]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 2–3 (79), pp. 139–155. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-139-155.

## Правила для авторов

Журнал «Научный вестник НГТУ» основан в 1995 году на базе Новосибирского государственного технического университета. Печатная версия журнала зарегистрирована в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций в 2000 году. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1599 от 10.02.2000 года. Периодичность выхода издания – один раз в три месяца (четыре номера в год). Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование.

В журнале «Научный вестник НГТУ» публикуются оригинальные статьи по следующим группам специальностей:

05.11.00 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы;

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы;

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям);

05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения;

05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление;

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям);

05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей;

05.13.17 – Теоретические основы информатики;

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ;

05.14.00 – Энергетика;

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы;

05.14.12 – Техника высоких напряжений;

05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты.

Разделы журнала: приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; информатика, вычислительная техника и управление; энергетика.

Рекомендуемый объем статьи 10–16 страниц. Статьи объемом, не превышающим 8 страниц, могут быть размещены в разделе «Краткие сообщения». Возможна публикация дискуссионного материала в разделе «Дискуссии». В информационном разделе возможно размещение сообщений о состоявшихся и планируемых конференциях, семинарах и симпозиумах, сведений о факультетах и специальностях, научных разработках и научных школах. Статьи обзорного характера, как правило, не публикуются.

Website: <http://journals.nstu.ru/vestnik>

### Условия приема статей

В редакцию **Научного вестника НГТУ** представляются следующие материалы.

1. Статья, подготовленная в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, два экземпляра, подписанных авторами.

2. Контактная информация (телефоны рабочий и сотовый, адреса электронной почты, место работы, адрес места работы, должность, ученая степень, ученое звание автора, ORCID) – печатная версия, два экземпляра.

3. Описание статьи для базы данных «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)», подготовленное в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, один экземпляр.

4. Лицензионный договор, заполненный и подписанный, отправляется со всем пакетом документов; сканированный заполненный договор записывается на диск.

5. Электронная версия статьи, контактной информации, описания статьи для базы данных РИНЦ и сканированный лицензионный договор – в отдельных файлах на CD.

6. Экспертное заключение о возможности опубликования.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

### Требования к оформлению статьи

Формат оригинала – А4. Шрифт – **Times New Roman**. Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word**. Параметры страницы (см):

левое поле – 3,3	верхнее поле – 4,0
правое поле – 3,3	нижнее поле – 3,9
текстовое поле 22 × 14,4	

Межстрочные интервалы одинарные. Перед УДК оставляется четыре пустые строки размером 12. УДК набирается прописными буквами кеглем 8. После УДК перед заголовком оставляется пустая строка размером 8. Название статьи набирается кеглем 14 полужирным строчным шрифтом с отступом слева 1,8 см, без переносов слов, с выравниванием влево. После заголовка оставляется пустая строка размером 12. Фамилии автора – прописным шрифтом кеглем 8. После фамилий оставляется пустая строка размером 7. Указатель сноски \* после названия статьи устанавливается в верхнем индексе. В сноске дата поступления статьи указывается курсивным шрифтом кеглем 8. После ФИО авторов статьи набирается аннотация кеглем 8 с отступом первой строки на 0,8 см, межстрочный интервал с множителем 1,1. После аннотации оставляется пустая строка размером 4. **Ключевые слова** – кеглем 8.

Заголовки разделов обязательны (например, **Введение, Постановка задачи, Методы анализа, Основной результат, Выводы** или **Заключение**), набираются прописным полужирным прямым шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними оставляется пустая строка размером 20, после них – пустая строка размером 10. Основной текст – кеглем 10.

Подзаголовки – прописным полужирным шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними и после них – пустая строка размером 10.

Рисунки представляются в **Corel Draw 11** или **Microsoft Word (RUS)**. Рисунки в других редакторах не принимаются. Слово *Рис.* и его номер выделяются курсивом. Рисунки должны быть черно-белыми, в описании не должно быть ссылок на цвет.

Рисунки и таблицы нумеруются арабскими цифрами по порядку упоминания их в тексте. После номера должно следовать название **на русском и английском языках**. Подрисуночные подписи и названия таблиц – кеглем 9.

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблиц по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения.

Переменные в тексте набираются курсивным шрифтом кеглем 10. При написании формул использовать MathType версии не выше 6.0С. Формулы набирать по центру кеглем 11, надстрочные и подстрочные индексы – кеглем 9, знаки – кеглем 14 (латинские буквы – курсивным шрифтом, русские и греческие – прямым, цифры – прямым).

Например:

$$A(s) = \sum_{i=0}^{n^2+3} A_i s \lambda^{(i+1)^2} + \alpha.$$

Между текстом и формулами, а также между формулами оставляются пустые строки размером 4. Формулы не сжимать. Нумерацию формул помещать справа кеглем 10. Например:

$$D_f = D_c D + N_c N. \quad (1)$$

Нумерация страниц осуществляется следующим образом: Вставка / Номера страниц...; установить **положение** «вверху страницы», **выравнивание** – «снаружи», без нумерации первой страницы.

Колонтитулы устанавливаются сверху (с отступом от верхнего края страницы 3 см). Чтобы колонтитулы на четной, нечетной и первой страницах отличались, нужно установить: **Файл / Параметры страницы / Разметка; установить разные четные и нечетные и первая отличается.**

Колонтитулы на четных страницах. Вид / Колонтитулы; набираются курсивным прописным шрифтом кеглем 8. Фамилия автора с инициалами впереди у правого края без отступа. Если авторов несколько, то указываются только два первых, далее «и др.».

Колонтитулы на нечетных страницах. Названия статьи – с прописной буквы курсивным шрифтом кеглем 8. Номера страниц – кеглем 10.

Перед списком литературы пустая строка размером 20. Заголовок «Список литературы» – кеглем 8 прописным полужирным шрифтом с отступом 1,8 см. После списка литературы пустая строка размером 10. Порядковый номер – с красной строки кеглем 8 с интервалом 1,1. Фамилии и инициалы – кеглем 8 полужирным строчным шрифтом, название статьи (книги) – светлым тем же шрифтом. Оформление библиографического списка по ГОСТ Р.7.0.5–2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.

После списка литературы идет пустая строка размером 24. Далее приводятся краткие сведения об авторах кеглем 8 с интервалом 1,1 и отступом от левого края 1 см. Фамилия, имя, отчество – с красной строки курсивом. Последующий текст (ученая степень, ученое звание, членство в академиях и т. д.; основное направление научных исследований; количество имеющихся публикаций, в том числе монографий, учебных пособий; e-mail, рабочий телефон) – прямым шрифтом. **Информация предоставляется на русском и английском языках.**

Далее дается перевод на английский язык фамилии, имени, отчества автора и названия статьи, а также реферата и ключевых слов (обязательно).

Исправления, вносимые автором, при доработке статьи **выделять** желтым цветом.

### Требования к оформлению РИНЦ

В описании статьи должна быть указана следующая информация.

1. Номера страниц, на которых размещена статья в сборнике.
2. Коды: УДК, и / или ББК, и / или DOI, и / или других классификационных индексов или систем регистрации.
3. Название статьи.
4. Фамилия, имя, отчество авторов.
5. Место работы каждого автора в именительном падеже. Указать должность автора по основному месту работы.
6. Контактная информация (почтовый адрес места работы, номер телефона, адрес электронной почты – обязательно).
7. Аннотация (не менее 320 и не более 640 знаков).
8. Ключевые слова: каждое слово или словосочетание отделяется от другого запятой (10–20 слов).
9. Пункты 3–8 на английском языке.
10. Список литературы.

Образец оформления приведен на сайте <http://journal.nstu.ru/vestnik>.