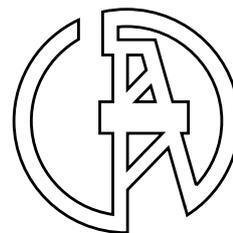


# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УГНТУ

№ 3, т. 15, 2019

Журнал основан в 2005 году. Выходит 4 раза в год.

## Учредитель

Федеральное бюджетное государственное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ)

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Международный стандартный серийный номер ISSN 1999-5458.

## Редакционная коллегия:

### И. о. главного редактора:

Ш.З. Валиев — канд. техн. наук, д-р экон. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)

### Члены редакционной коллегии:

В.М. Артюшенко — д-р техн. наук, проф. ГБОУ ВО МО «Технологический университет» (г. Москва, Российская Федерация)



Б.М. Горшков — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет сервиса» (г. Тольятти, Российская Федерация)



М.Ю. Долوماتов — д-р хим. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



В.Г. Крымский — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



В.Г. Кушнир — д-р техн. наук, проф. Костанайского государственного университета им. Ахмета Байтурсынова (г. Костанай, Казахстан)



С.В. Павлов — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Р.Р. Сафин — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Б. Брудник — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Тель-Авивского университета (г. Тель-Авив, Израиль)



А.Ф. Романченко — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



### Зам. главного редактора:

Ш.З. Валиев — канд. техн. наук, д-р экон. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)

П.С. Серенков — д-р техн. наук, проф. Белорусского национального технического университета (г. Минск, Белоруссия)



М.А. Ураксеев — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Н.А. Феоктистов — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Московский государственный университет дизайна и технологии» (г. Москва, Российская Федерация)



Ф.Ф. Хизбуллин — д-р хим. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



В.А. Шабанов — канд. техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Р.Б. Яруллин — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



И. Зицмане — д-р техн. наук, профессор Рижского технического университета, эксперт научного совета Латвийской академии наук (г. Рига, Латвия)



Г.Д. Георгиев — д-р техн. наук, преподаватель Технического университета (г. Варна, Болгария)



И.В. Пентегов — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины (г. Киев, Украина)



Ответственный секретарь: А. А. Мухамадиев

Технический редактор: С. В. Халитова

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Доступ и подписка на электронную версию журнала — на сайте [www.ugnet.ru](http://www.ugnet.ru)

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-67387 от 05.10.2016 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

© Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2019.

Адрес редакции и издательства: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

Тел.: (347) 243-16-19, [ies.rusoil.net](mailto:ies.rusoil.net)

Цена свободная. 12+

Подписано в печать 10.09.2019 г. Формат 60×84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16.28.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 176.

Адрес типографии: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

Перепечатка материалов, опубликованных в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы», допускается только с письменного разрешения редакции.

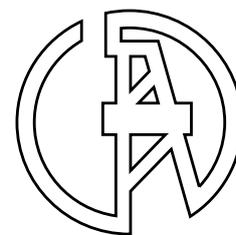
Материалы приводятся в авторской редакции.

Точка зрения редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов публикуемых статей.

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

# ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE PETROLEUM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY



USPTU

№ 3, v. 15, 2019

The journal was founded in 2005. Issued 4 times a year.

## Founder

Federal State-Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University» (USPTU)

The journal is included in the «List of peer-reviewed scientific publications, which should be published basic scientific results of theses on competition of a scientific degree of candidate of Sciences, on competition of a scientific degree of the doctor of Sciences».

International standard serial number ISSN 1999-5458.

## Editorial board:

### Editor-in-chief:

Sh.Z. Valiev — Cand. Sci.Tech., Dr. Sci. Econ., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)

### Deputy editor-in-chief:

Sh.Z. Valiev — Cand. Sci.Tech., Dr. Sci. Econ., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)

### Members of an editorial board:

V.M. Artyushenko — Dr. Sci.Tech., Prof. of SBEI HE MR «University of Technology» (Moscow, Russian Federation)



P.S. Serenkov — Dr. Sci.Tech., Prof. of Byelorussian National Technical University» (Minsk, Byelorussia)



B.M. Gorshkov — Dr. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Volga Region State University of Service» (Tolyatti, Russian Federation)



M.A. Urakseev — Dr. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Aviation Technical University» (Ufa, Russian Federation)



M.Yu. Dolomatov — Dr. Sci.Chem., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)



N.A. Feoktistov — Dr. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Moscow State University of Design and Technology» (Moscow, Russian Federation)



V.G. Krymsky — Dr. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)



F.F. Hizbullin — Dr. Sci.Chem., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)



V.G. Kushnir — Dr. Sci.Tech., Prof. of Kostanaysky State University of Ahmet Baytursynov (Kostanay, Kazakhstan)



V.A. Shabanov — Cand. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)



S.V. Pavlov — Dr. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Aviation Technical University» (Ufa, Russian Federation)



R.B. Yarullin — Dr. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Bashkir State Agrarian University» (Ufa, Russian Federation)



R.R. Safin — D. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)



I. Zicmane — Dr. Sci.Tech., Prof. of Riga Technical University, Expert the Latvian Council of Science (Riga, Latvia)



B. Brudnik — Dr. Sci.Tech., Leading Researcher of Tel Aviv University (Tel Aviv, Israel)



G.D. Georgiev — Dr. Sci.Tech., Lecturer Technical University (Varna, Bulgaria)



A.F. Romanchenko — Dr. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)



I.V. Pentegov — Dr. Sci.Tech., Prof., Leading Researcher the E.O.Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kiev, Ukraine)



Assistant editor: A. A. Mukhamadiev

Technical editor: S. V. Khalitova

The journal is included in the Russian Index of Scientific Citing (RISC).

Access and subscription to the electronic version of the journal is available on the website [www.ugues.ru](http://www.ugues.ru).

Mass media registration certificate ПИ № ФС 77-67387 dd. 05.10.2016 given by Federal service of supervision in the scope of communication, information technologies and mass media.

© Ufa State Petroleum Technological University, 2019.

Address of Editors office and Founder: 450062, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.

Tel. (347) 243-16-19, [ies.rusoil.net](mailto:ies.rusoil.net)

Price is free. 12+

Publishing authorized on 10.09.2019. Paper format 60×84/8. Offset printing. 16.28 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 176.

Address of Publishing Office: 450062, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced without prior written consent of the Editors office of the «Electrical and data processing facilities and systems».

The items of this publication preserve original edition by their authors.

The Editors office do not always share an opinion of authors of the articles published.

# СОДЕРЖАНИЕ

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Карагодин В.В., Горин В.А., Рыжий Н.В.</i> Повышение эффективности управления возбуждением бесщеточного синхронного генератора в автономных системах электроснабжения	5
<i>Ершов М.С., Латин Д.И.</i> Исследование системы повышенной надежности электропитания на базе четырехобмоточного трансформатора	15
<i>Саттаров Р.Р., Стыскин А.В., Уразбахтина Н.Г.</i> Исследование электромагнитных процессов рекуперации энергии в устройствах для форсировки переходных процессов в индуктивных многофазных нагрузках	23
<i>Еникеева А.Р., Шарипов Б.А., Федосеева Е.А.</i> Применение нетрадиционных источников энергии для покрытия нагрузки на подогрев резервуаров	30
<i>Кротенко Д.С., Тимощук В.Н., Белов О.А.</i> Моделирование оптимальных режимов работы электростанции с различными генераторами	36
<i>Хазиева Р.Т., Кутцов Д.В.</i> Анализ динамики патентования устройств заряда емкостных накопителей	41
<i>Латыпов И.С.</i> Моделирование и исследование неизолированных проводов для электротехнических комплексов потребителей нефтегазовой отрасли в программной системе конечно-элементного анализа	45
<i>Шафигов И.Н.</i> Регулируемый привод скважинного электроцентробежного насоса на основе высоковольтного многоуровневого преобразователя частоты	53

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Крымский В.Г.</i> Модели роста надежности программного обеспечения: новые подходы к построению и пути совершенствования	61
<i>Дмитриев А.А., Герасимов В.Е.</i> Анализ возможностей и перспектив применения системы технологического видеонаблюдения на объектах электросетевого комплекса	70
<i>Шарипов М.И.</i> Система управления для повышения показателей добычи нефти на нефтяном месторождении с помощью использования искусственного интеллекта	77
<i>Спиридонов О.Б., Кумова Д.М., Луночкина И.М., Сироткин С.Л.</i> Пульт управления со средствами визуализации и навигационным приемником	85
<i>Дашевский В.П., Будков В.Ю.</i> Спектроскопия задержек в системах реального времени	92

## МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

<i>Мисбахов Р.Ш., Васёв А.Н., Сахабутдинов А.Ж., Нуреев И.И., Морозов О.Г., Липатников К.А.</i> Адресный волоконно-оптический датчик акустического обнаружения частичного разряда в комплектных распределительных устройствах	101
<i>Варганова А.В., Панова Е.А., Кушмилё О.Е., Хатюшина Т.В., Анисимова Н.А.</i> Алгоритм автоматизированного выбора и расстановки контрольно-измерительных приборов в цепях оборудования распределительных устройств высокого напряжения в САПР «ОРУ САД»	111
<i>Абдрахманов В.Х., Важаев К.В., Салихов Р.Б.</i> Исследование возможности реализации технологии точного позиционирования	118
<b>Об авторах</b>	130

# CONTENT

## ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Karagodin V.V., Gorin V.A., Ryzhiy N.V.</i> Increasing efficiency of control of excitation of brushless synchronous generator in autonomous power supply systems	5
<i>Ershov M.S., Lapin D.I.</i> Research of power system of higher reliability based on the four-winding transformer	15
<i>Sattarov R.R., Styskin A.V., Urazbakhtina N.G.</i> , Study of electromagnetic processes of energy recovery in devices for forming transient processes in inducted multi-phase loads	23
<i>Enikeeva A.R., Sharipov B.A., Fedoseeva E.A.</i> Non-traditional renewable energy sources use for tank heating	30
<i>Krotenko D.S., Tymoschuk V.N., Belov O.A.</i> Modeling optimal operation modes of the electric power station with different generators	36
<i>Khazieva R.T., Kupcov D.V.</i> Analysis of patenting of inductive-capacitive transducers for current stabilization systems	41
<i>Latypov I.S.</i> Modeling and research of uninsulated wire for electrical complexes of consumers in the oil and gas industry in a finite element analysis software system	45
<i>Shafikov I. N.</i> Electric submersible pump adjustable drive based on high-voltage multilevel frequency converter	53

## DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Krymsky V.G.</i> Software reliability growth models: new approaches to creation and ways of enhancement	61
<i>Dmitriev A.A., Gerasimov V.E.</i> Analysis of opportunities and prospects for application of the system of technological video surveillance at the objects of the power grid complex	70
<i>Sharipov M.I.</i> Control system for increasing oil production rate at an oil field with the use of artificial intelligence	77
<i>Spiridonov O.B., Kumova D.M., Lunochkina I.M., Sirotkin S.L.</i> Control panel with visualization devices and navigation receiver	85
<i>Dashevsky V.P., Budkov V.Yu.</i> Delay spectroscopy in real-time systems	92

## METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES

<i>Misbakhov R.Sh., Vasev A.N., Sakhabutdinov A.Zh., Nureev I.I., Morozov O.G., Lipatnikov K.A.</i> Address fiber optical sensor for acoustic detection of a partial discharge in a switchgear	101
<i>Varganova A.V., Panova E.A., Kushmil O.E., Hatyushina T.V., Anisimova N.A.</i> Algorithm for automated selection and installation of control and measuring instruments in chains of high voltage distribution devices in ORU CAD	111
<i>Abdrakhmanov V.K., Vazhdaev K.V., Salikhov R.B.</i> Research of possibility of precision positioning technology implementation	118
<b>About the authors</b>	130



**Карагодин В. В.**  
**Karagodin V. V.**

доктор технических наук, профессор кафедры «Энергоснабжение (наземной космической инфраструктуры)», ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация



**Горин В. А.**  
**Gorin V. A.**

кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Энергоснабжение (наземной космической инфраструктуры)» ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация



**Рыжий Н. В.**  
**Ryzhiy N. V.**

адъюнкт кафедры «Энергоснабжение (наземной космической инфраструктуры)» ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

УДК 621.313.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-5-14

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ БЕСЩЕТОЧНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Современные тенденции развития современной российской энергетики способствуют существенному возрастанию роли систем автономного электроснабжения, в которых в качестве источников электроэнергии применяются в большинстве случаев дизель-генераторные агрегаты. Возрастающие требования ответственных потребителей к надежности электроснабжения и качеству электроэнергии во всех режимах работы источников электроэнергии приводят к необходимости совершенствования их систем регулирования и управления, необходимости изучения, исследования возможности применения более совершенных законов управления (регулирования).

В связи с развитием вычислительной и микропроцессорной техники значительный интерес представляют оптимальные законы управления, позволяющие обеспечить наибольшую эффективность процессов регулирования. Исключительное место в теории оптимального управления занимает проблема предельного быстродействия. Системы оптимальные по быстродействию, кроме обеспечения минимума времени переходного процесса, в ряде случаев обеспечивают высокую динамическую точность.

Исследование возможности применения оптимального по быстродействию управления весьма актуально, в частности, для синхронных генераторов с диодным бесщеточным возбудителем, у которых наличие в цепи управления диодной бесщеточной системы инерционного возбудителя снижает быстродействие системы и приводит к ухудшению качества напряжения в дизель-генераторном агрегате.

Однако исследования в области оптимального по быстродействию управления возбуждением бесщеточного синхронного генератора показали, что применение оптимального по быстродействию управления возбуждением не рационально при малых отклонениях напряжения генератора. В связи с этим в статье предлагается подход к построению регулятора возбуждения

бесщеточного синхронного генератора в виде комбинированного регулятора. Отработку возмущающих воздействий, приводящих к значительным отклонениям напряжения синхронного генератора от номинального значения (более 10%), такой регулятор осуществляет в соответствии с оптимальным по быстродействию законом регулирования. Демпфирование электромагнитных колебаний в системе при малых отклонениях напряжения (менее 10%) — пропорционально-интегральным регулированием напряжения генератора с применением местной жесткой обратной связи по напряжению возбуждения синхронного генератора.

**Ключевые слова:** оптимальное управление, быстродействие, синхронный генератор, эффективность, качество электроэнергии, бесщеточный возбудитель, интервалы управления, жесткая обратная связь, микропроцессор, интегральная оценка.

## INCREASING EFFICIENCY OF CONTROL OF EXCITATION OF BRUSHLESS SYNCHRONOUS GENERATOR IN AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS

Current trends in the development of modern Russian energy contribute to a significant increase in the role of autonomous power supply systems, in which in most cases diesel generator sets are used as sources of electricity. The increasing demands of responsible consumers to the reliability of power supply and the quality of electricity in all modes of operation of electricity sources lead to the need to improve their management and control systems, the need to study and research the possibility of using more advanced control laws (regulation).

In connection with the development of computational and microprocessor technology, optimal control laws are of considerable interest, allowing to ensure the greatest efficiency of regulatory processes. An exceptional place in the theory of optimal control is occupied by the problem of maximum speed. Time-optimal system, in addition to ensuring the transition process a minimum of time, in some cases, it provides a high dynamic accuracy.

The study of the possibility of applying the optimal speed control is very important, in particular, for synchronous generators with a diode brushless exciter, for which there is an inertial exciter in the control circuit of the diode brushless system reduces the speed of the system and leads to a deterioration in the quality of the voltage in the diesel generator set.

However, studies in the field of speed-optimal control of the excitation of a brushless synchronous generator have shown that the use of speed-optimal control of the excitation is not rational for small deviations of the generator voltage. In this regard, the article proposes an approach to constructing the excitation controller of a brushless synchronous generator in the form of a combined controller.

The development of disturbing influences leading to significant deviations of the voltage of the synchronous generator from the nominal value (more than 10%), such a regulator implements in accordance with the optimal speed regulation law. Damping of electromagnetic oscillations in the system with small voltage deviations (less than 10%) — proportional-integral regulation of the generator voltage using local hard feedback on the excitation voltage of the synchronous generator.

**Key words:** optimal control, speed, synchronous generator, efficiency, power quality, brushless exciter, control intervals, hard feedback, microprocessor, integrated rating.

*Введение.* Для современной российской электроэнергетики характерен ряд особенностей, которые приводят к существенному возрастанию роли автономного электроснабжения, особенно для объектов, предъявляющих повышенные требования к надежности электроснабжения и качеству электроэнергии [1, 2].

Среди этих особенностей следует особо выделить:

— снижение надежности электроснабжения сетевыми и электроснабжающими компаниями, главным образом, из-за почти 50 % физически и морально устаревшего оборудования;

— ориентация в развитии современной электроэнергетики на привлечение потребителей к решению вопросов обеспечения надежности электроснабжения и качества электроэнергии.

В качестве источников электроэнергии в системах автономного электроснабжения применяются в большинстве случаев дизель-генераторные агрегаты (ДГА), представляющие собой энергетическую установку, состоящую из дизеля и синхронного генератора (СГ), которым в настоящее время адекватной альтернативы пока нет.

Качество электроэнергии, вырабатываемой ДГА, определяется системами управления (регулирования) скорости вращения (частоты) первичного двигателя и напряжения СГ.

Следует подчеркнуть, что в настоящее время требования со стороны потребителей к качеству электроэнергии постоянно повышаются, что приводит к ужесточению требований к системам управления генераторными агрегатами и необходимости изучения и исследования более совершенных законов управления (регулирования).

Повышение надежности, быстродействия и функциональной насыщенности современной вычислительной техники привело к ее широкому использованию для управления сложными технологическими объектами. В связи с этим необходимым шагом на пути совершенствования систем управления генераторными агрегатами является перевод средств управления и регулирования с аналоговой на цифровую аппаратную базу. Внедрение цифровых управляющих ЭВМ (микропроцессоров, контроллеров) как раз и открывает новые возможности для реализации различных законов регулирования СГ, диагностических процедур, сервисных функций и т.д.

*Постановка задачи.* Несмотря на огромные успехи в развитии теории и практики построения автоматических систем управления, в настоящее время выдвигаются принципиально новые требования к автоматизации. Процессы управления должны проходить за минимальное время, с наименьшей затратой топлива, энергии и т.д. Именно применение цифровых управляющих ЭВМ для реализации сложных алгоритмов управления дают возможность использовать оптимальные законы управления, позволяющие обеспечить наибольшую эффективность процессов регулирования.

Исключительное место в теории оптимального управления занимает проблема предельного быстродействия. Время перевода объекта из одного режима в другой является одним из основных показателей качества систем управления. К такому классу задач может быть отнесена и задача восстановления напряжения синхронного генератора после его провала. Провалы напряжения на шинах происходят, как правило, из-за неисправностей в электрических сетях или в электроустановках потребителей, при подключении мощной нагрузки, а также могут быть связаны с возникновением и окончанием короткого замыкания или иного резкого возрастания тока в системе или электроустановке, подключенной к электрической сети.

В соответствии с требованиями [3] провал напряжения рассматривается как электромагнитная помеха, интенсивность которой определяется как напряжением, так и длительностью.

Особенно эта задача актуальна для синхронных генераторов с диодным бесщеточным возбудителем (бесщеточных синхронных генераторов) автономных систем электроснабжения. Наличие совместно-вращающегося на валу бесщеточного возбудителя снижает быстродействие системы и приводит к ухудшению качества напряжения СГ.

Учитывая, что для современных потребителей с электронными компонентами провалы напряжения вместе с колебаниями напряжения и перенапряжениями являются наиболее критичными нарушениями качества электроэнергии, задача восстановления напряжения за минимальное время является весьма важной для обеспечения надежного электроснабжения ответственных потребителей.

Таким образом, одним из возможных путей создания высокоэффективных систем возбуждения бесщеточного синхронного генератора (БСГ), позволяющих улучшить динамические характеристики и точность поддержания режимных параметров, является разработка оптимального по быстродействию регулятора возбуждения БСГ.

*Подход к определению оптимального управления возбуждением бесщеточного*

синхронного генератора при больших возмущениях. Задача восстановления напряжения синхронного генератора с диодным бесщеточным возбудителем за минимально возможное время (задача оптимального быстрого действия) может быть сформулирована следующим образом.

Задан объект (БСГ), который в упрощенном виде может быть описан линеаризованной в точке установившегося режима относительно переменных состояния  $e_q$  (э.д.с генератора) и  $e'_{dv}$  (э.д.с за переходным сопротивлением возбудителя) системой дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{k_{1B}}{T_d^H} x_2 - \frac{(1 + k_{2Л} - k_{1B}k_{qy})}{T_d^H} x_1; \\ \dot{x}_2 &= -\frac{k_{qy}}{T_{B1}} x_1 - \frac{1}{T_{B1}} x_2 + \frac{k_z k_y}{T_{B1}} \Theta, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x_1, x_2$  — переменные состояния,  $x_1 = e_q$ ;  $x_2 = e'_{dv}$ ;

$k_z, k_{1B}, k_{2Л}, k_{qy}, k_y$  — коэффициенты задачи модели;

$T_{B1}, T_d^H$  — постоянные времени возбудителя и генератора;

$\Theta$  — управляющее воздействие (скважность регулирующих импульсов на выходе регулятора).

Следует отметить, что данная математическая модель с достаточной для практики точностью описывает динамические свойства синхронного генератора с диодным бесщеточным возбудителем [4, 5].

Среди допустимых управлений требуется определить управление  $\Theta(t)$ , переводящее объект управления (1) из начального состояния  $x(0)$ , в котором напряжение генератора определяется напряжением провала (перенапряжения), в конечное  $x(T_k)$ , которому соответствует номинальное значение напряжения генератора  $u_T = u_{\text{ном}}$ , за минимально возможное время.

При этом на величину управляющего воздействия  $\Theta$  наложены ограничения:

$$0 = \Theta_{\min} < \Theta < \Theta_{\max} = 1. \quad (2)$$

Для решения данного класса задач наиболее часто применяется принцип максимума Л.С. Понтрягина [6], который позволяет свести задачу расчета оптимальной программы (задачу расчета оптимального управ-

ления как функции времени) к решению краевой задачи для системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

В работе [7] показано, что оптимальное управление возбуждением синхронного генератора является релейным, т.е. представляет собой последовательность интервалов предельной форсировки и расфорсировки возбуждения генератора.

Задача расчета оптимального по быстродействию управления может быть решена двумя способами:

— первый связан с совместным решением уравнений объекта управления и уравнений для сопряженных переменных [8];

— второй сводится к решению нелинейной алгебраической системы уравнений относительно длительностей интервалов исходя из знания структуры управления [9].

И в том, и в другом случаях, как правило, возникает необходимость использования численных методов, успех применения которых во многом зависит от удачного выбора начального приближения неизвестных, будь то сопряженные переменные или постоянные интегрирования в первом способе или длительности интервалов управления (моменты переключения управляющего воздействия) — во втором.

Указанную трудность удастся преодолеть с помощью применения метода последовательных опорных решений, позволяющего осуществить целенаправленный выбор начального приближения для итерационных вычислительных схем решения оптимизационных задач. Подробно метод изложен в работах [10, 11].

Как показала практика решения подобных задач, расчет оптимальной программы вторым способом осуществить проще и при этом требуется меньший объем математических вычислений.

В связи с этим для рассматриваемого объекта, структурная схема которого преобразована к параллельному соединению апериодических звеньев первого порядка, была получена трансцендентная система алгебраических уравнений относительно длительностей интервалов оптимального управления  $t_i$  ( $i = 1, 2$ ), которая имеет вид [7]:

— для режима наброса нагрузки ( $u_{\Gamma} < u_{\Gamma\text{ном}}$ )  
 $(z_{10} - k_{10}\Theta_{\max})\exp(-(t_1 + t_2)/T_{10}) +$   
 $+ k_{10}(\Theta_{\max} - \Theta_{\min})\exp(-t_2/T_{10}) + k_{10}\Theta_{\min} = z_{1k};$

$(z_{20} - k_{20}\Theta_{\max})\exp(-(t_1 + t_2)/T_{20}) +$   
 $+ k_{20}(\Theta_{\max} - \Theta_{\min})\exp(-t_2/T_{20}) + k_{20}\Theta_{\min} = z_{2k};$  (3)

— для режима сброса нагрузки ( $u_{\Gamma} > u_{\Gamma\text{ном}}$ )

$(z_{10} - k_{10}\Theta_{\max})\exp(-(t_1 + t_2)/T_{10}) +$   
 $+ k_{10}(\Theta_{\max} + \Theta_{\min})\exp(-t_2/T_{10}) + k_{10}\Theta_{\min} = z_{1k};$   
 $(z_{20} - k_{20}\Theta_{\max})\exp(-(t_1 + t_2)/T_{20}) +$   
 $+ k_{20}(\Theta_{\max} + \Theta_{\min})\exp(-t_2/T_{20}) + k_{20}\Theta_{\min} = z_{2k};$  (4)

где  $z_{10}, z_{20}, z_{1k}, z_{2k}$  — координаты начального ( $u_{\Gamma}$ ) и конечного ( $u_{\Gamma\text{ном}}$ ) состояния преобразованного объекта управления (БСГ);  $k_{10}, k_{20}, T_{10}, T_{20}$  — коэффициенты передачи и постоянные времени преобразованного объекта управления.

В результате решения систем уравнений определяются значения длительностей интервалов оптимального управления  $t_1, t_2$  в режимах наброса и сброса нагрузки.

Если предположить, что в дальнейшем, в идеальном случае, в системе никаких малых возмущений не происходит, то оптимального регулятора будет достаточно.

*Комбинированный регулятор возбуждения бесщеточного синхронного генератора.* В реальных системах, в которых возмущения, действующие на СГ, носят не детерминированный, а стохастический характер, объект может находиться лишь в квазиустановившемся состоянии, которое можно характеризовать определенными вероятностными оценками.

В этой ситуации время восстановления напряжения будет определяться только оптимальным по быстродействию регулятором, если при малых возмущениях управление (стабилизацию) осуществляет регулятор, обеспечивающий эффективное демпфирование электромагнитных колебаний в системе при малых отклонениях регулируемого параметра (статический регулятор).

Кроме того, исследования в области оптимального по быстродействию управления возбуждением БСГ показали, что применение оптимального управления возбуждением не рационально при малых отклонениях напряжения генератора. Это обуславлива-

ется, прежде всего, меньшей эффективностью и сложностью практической реализации, т.е. оптимальное управление более целесообразно применять при значительных отклонениях напряжения (провалах, перенапряжениях), т.е. оптимальный по быстродействию регулятор применим при больших возмущениях и незначительном регулирующем эффекте параметров нагрузки после их скачкообразного изменения во время переходного процесса, т.е. при  $r_{\text{н}} = \text{const}$  и  $x_{\text{н}} = \text{const}$ . Однако последнее условие не обязательно при применении коррекции (адаптации) программы управления.

Данное обстоятельство приводит к целесообразности построения регулятора возбуждения БСГ (далее комбинированного регулятора), который отработку возмущающих воздействий, приводящих к значительным отклонениям напряжения СГ от номинального (с учетом требований [3] более 10%), будет осуществлять изменением возбуждения возбудителя в соответствии с оптимальным по быстродействию законом регулирования (динамический регулятор), а демпфирование электромагнитных колебаний в системе при малых отклонениях напряжения СГ (менее 10%) — по одному из применяемых на практике законов регулирования (статический регулятор).

В качестве традиционного закона регулирования при отработке малых возмущений ( $\Delta U_{\Gamma} \leq 10\%$ ) целесообразно использовать пропорционально-интегральное регулирование напряжения генератора с применением местной жесткой обратной связи по напряжению возбуждения  $u_f$ .

Введение жесткой обратной связи по напряжению возбуждения генератора обеспечивает требуемую отзывчивость системы, приближая диодную бесщеточную систему к тиристорной бесщеточной системе (наиболее быстродействующей), а интегральная составляющая сводит установившуюся ошибку системы к нулю. При этом следует подчеркнуть, что жесткая обратная связь эффективна лишь при малых отклонениях регулируемой величины (напряжения генератора).

Функциональная схема цифрового устройства, реализующего предлагаемый комбини-

рованный способ регулирования возбуждения синхронного генератора, приведена на рисунке 1.

На вход АЦП через блоки ВТТ и ВТН поступают сигналы, пропорциональные значениям параметров состояния объекта управления ( $U_G$  — напряжение генератора, В;  $I_G$  — ток генератора, А;  $I_f$  — ток возбуждения генератора, А), где производится их конвертация в цифровую форму (соответственно в сигналы  $UG$ ,  $IG$ ,  $IF$ ). Преобразованные в АЦП данные сигналы поступают на вход МП, где осуществляется их измерение, вычисление значений (средних, действующих и т.д.) требуемых электрических величин, осуществляется обработка информации и исходя из требуемого закона управления определяются значения угла управления  $\alpha$ , который, в свою очередь, определяет условия работы ТВ [12], подключенного к обмотке возбуждения БСГ. ТВ в зависимости от угла управления  $\alpha$  увеличивает или уменьшает напряжение обмотки возбуждения возбудителя  $U_{вв}$  БСГ.

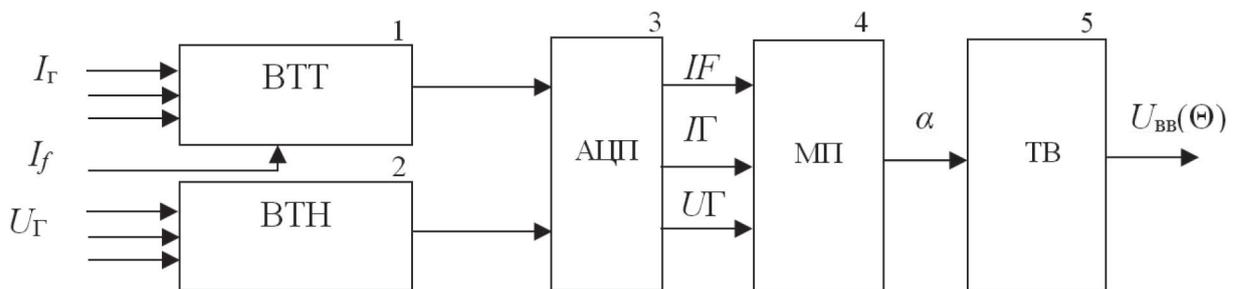
Алгоритм работы МП представлен на рисунке 2.

ОБР — оптимальный по быстродействию регулятор;  $W_p(p)$  — передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора) напряжения;  $W_o(p)$  — эквивалентная передаточная функция объекта управления (БСГ с ДБС), полученная после введения жесткой обратной связи по напряжению возбуждения генератора;  $\Delta U_G$  — отклонение напряжения СГ от номинального, В;  $k_p$  — коэффициент передачи пропорционального регулятора;  $T_{ин}$  — постоянная времени интегратора;  $k_{жос}$  — коэффи-

циент жесткой обратной связи по напряжению возбуждения генератора;  $k_{yp}$  — коэффициент передачи усилителя ПИ-регулятора;  $k_y$ ,  $k_{1л}$ ,  $k_{2л}$ ,  $k_r$  — коэффициенты передачи модели;  $T_B$ ,  $T_{B2}$  — постоянные времени возбудителя,  $T_{B2} = T_B \cdot (1 - k_{qy} k_{1л}/k_{2л})$ ,  $T_d^H$  — постоянная времени генератора;  $e_q$  — э.д.с. генератора;  $u_f$  — напряжение возбуждения генератора.

Таким образом, большие возмущающие воздействия обрабатывает ОБР, обеспечивающий минимальное время восстановления напряжения генератора, демпфирование электромагнитных колебаний в системе при малых отклонениях регулируемого параметра обеспечивает ПИ-регулятор с жесткой обратной связью по напряжению возбуждения СГ.

Оценка эффективности управления возбуждением БСГ с комбинированным регулятором. Эффективность разработанного комбинированного способа управления возможно оценить методом сравнительной оценки, получившим достаточно широкое распространение для оценки эффективности разрабатываемой новой техники и использующим сопоставление показателей разрабатываемого и базового изделий. Для этого было проведено сравнительное оценивание значений показателей эксплуатационно-технических характеристик БСГ (СБГ-800-750) с широтно-импульсным регулятором напряжения пропорционального типа с устройством гибких обратных связей (традиционный регулятор) с полученными результатами математического моделирования генератора с предлагаемым комбинированным регулятором возбуждения в типовых динамических режимах. Результаты представлены в таблице 1.



ВТТ — блок входных трансформаторов тока; ВТН — блок входных трансформаторов напряжения;  
АЦП — блок аналого-цифровых преобразователей;  
МП — микропроцессор (микро-ЭВМ); ТВ — тиристорный выпрямитель

**Рисунок 1.** Устройство комбинированного регулятора возбуждения СГ

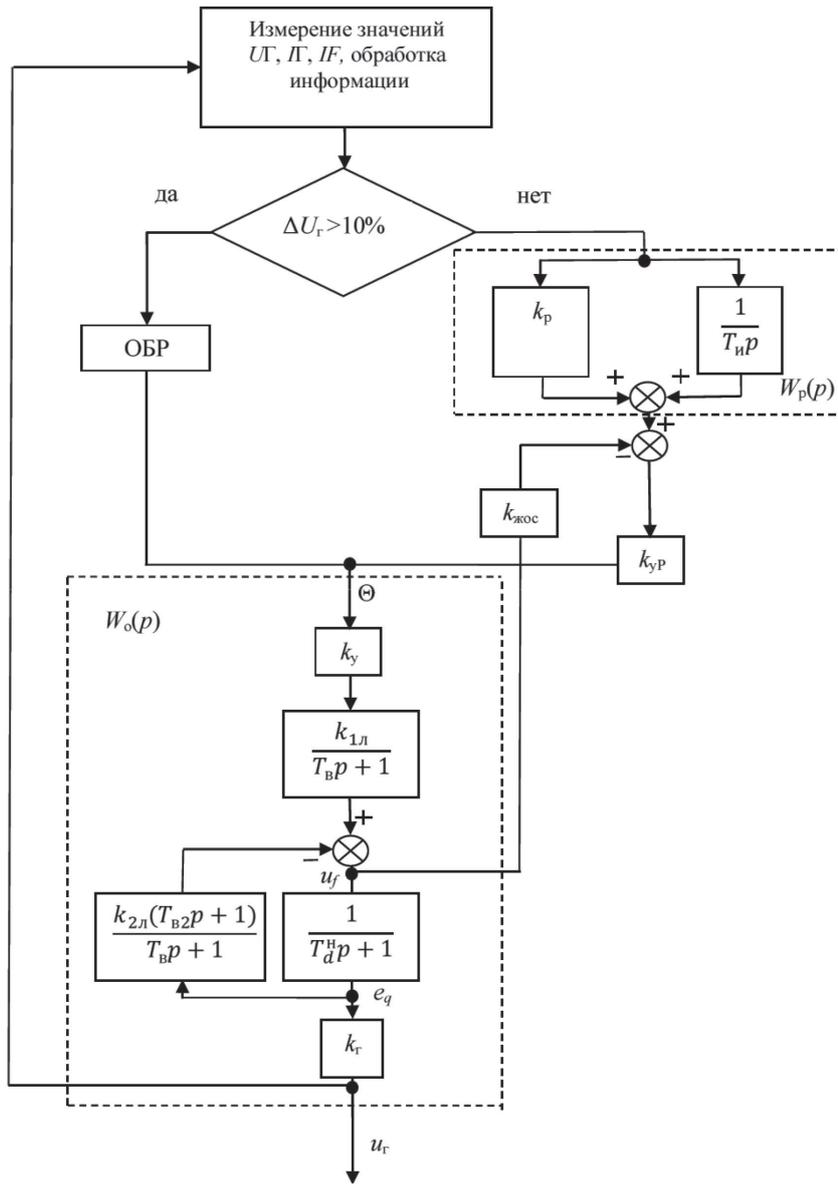


Рисунок 2. Алгоритм работы МП, реализующего комбинированный способ управления возбуждением БСГ

Таблица 1. Оценка эффективности комбинированного управления возбуждением БСГ методом сравнительной оценки

№ п/п	Исследуемый режим	Традиционный регулятор напряжения		Комбинированный регулятор напряжения		Соотношение $t_{\text{тп}} / t_{\text{кпн}}$
		$t_{\text{тп}}, \text{с}$	$\delta U_{\text{п}}, \%$	$t_{\text{тп}}, \text{с}$	$\delta U_{\text{п}}, \%$	
1.	Начальное возбуждение	1,50	21,00	0,64	—	2,34
2.	Наброс 100 % нагрузки с $\cos \varphi=0,3$	0,64	6,00	0,33	—	1,94
3.	Сброс 100 % нагрузки с $\cos \varphi=0,3$	0,73	5,00	0,55	—	1,33
4.	Пуск асинхронного двигателя мощностью 200 кВт	0,73	5,00	0,42	—	1,74
5.	Отключение 3-фазного к.з.	0,75	18,00	0,60	3,00	1,25

В таблице 1:  $t_{\text{тп}}$  — время переходного процесса, с;  $\delta U_{\text{п}}$  — перерегулирование за время переходного процесса; прочерк «—» соответствует величине  $\delta U_{\text{п}} < 2 \%$ ;  $t_{\text{тп}} / t_{\text{кпн}}$  — отношение времени переходного процесса БСГ

с традиционным регулятором возбуждения к времени переходного процесса БСГ с предлагаемым комбинированным регулятором возбуждения в соответствующих динамических режимах.

Учитывая, что целью регулирования возбуждения генератора в динамических режимах является получение переходного процесса, имеющего минимальные длительность и колебательность, то для оценки эффективности предлагаемого комбинированного способа регулирования возбуждения БСГ с диодной бесщеточной системой возбуждения можно использовать интегральную оценку качества переходного процесса, которая учитывает одновременно быстрдействие системы и максимальное отклонение от установившегося значения. В частности, для этих целей может быть использована интегральная оценка вида:

$$J = \int_0^{\infty} u_r^2(t) dt. \quad (5)$$

**Таблица 2.** Оценка эффективности комбинированного управления возбуждением БСГ с использованием интегрального критерия

№ п/п	Исследуемый режим	Соотношение $J_{\text{тип}} / J_{\text{кпп}}$
1.	Начальное возбуждение	1,72
2.	Наброс 100 % нагрузки с $\cos\varphi=0,3$	2,92
3.	Сброс 100 % нагрузки с $\cos\varphi=0,3$	1,39
4.	Пуск асинхронного двигателя мощностью 200 кВт	1,59
5.	Отключение 3-фазного к.з.	2,04

Анализ полученных результатов свидетельствует о преимуществах комбинированного способа управления, который позволяет уменьшить время переходного процесса в динамических режимах  $t_{\text{тип}}$ , обеспечивая при этом аperiodический характер восстановления напряжения.

### Выводы

Применение предлагаемого комбинированного регулятора возбуждения БСГ с диодной бесщеточной системой возбуждения позволит улучшить качество регулирования напряжения при больших и при малых возмущениях в автономных системах электроснабжения, что весьма существенно для обеспечения надежности электроснабжения ответственных потребителей.

### Список литературы

1. Воропай Н.И., Ковалёв Г.Ф., Кучеров Ю.Н. Концепция обеспечения надёжности в электроэнергетике. М.: Энергия, 2013. 304 с.

В этом случае наиболее эффективной будет система, обладающая меньшим значением интегральной оценки.

Так, интегральные оценки для режима наброса статической нагрузки с  $\cos\varphi=0,3$  имеют следующие значения:  $J_{\text{кпп}}=2194,08$ ,  $J_{\text{тип}}=4113,96$ , т.е. если сравнение систем осуществлять по минимуму интегрального критерия, то система возбуждения БСГ с комбинированным регулятором является более эффективной по сравнению с системой регулирования возбуждения БСГ с традиционным регулятором ( $J_{\text{тип}} / J_{\text{кпп}}=1,7$ ).

Оценки переходных процессов в типовых динамических режимах с использованием интегрального критерия представлены в таблице 2.

Очевидно, что предложенный метод оптимального управления БСГ в переходных режимах в реальном масштабе времени можно осуществить только при помощи вычислительной техники. Это требует внедрения в системы автоматического регулирования возбуждения СГ управляющих ЭВМ (микропроцессоров, микроконтроллеров), что в настоящее время является необходимым шагом на пути совершенствования систем возбуждения.

Применение цифровой вычислительной техники позволит значительно улучшить качество переходных процессов в СЭС, обеспечить гибкость регулирования и одновременно расширить функциональные возможности систем управления СГ.

2. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью. М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2011. 51 с.

3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических

средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.

4. Герасимов А.Н., Карагодин В.В. Математические модели и сравнительный анализ бесщеточных систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов малой и средней мощности. СПб.: ВИКА им. А.Ф. Можайского, 1995. 60 с.

5. Юрганов А.А., Кожевников В.А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов. СПб.: Наука, 1996. 138 с.

6. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1976. 392 с.

7. Горин В.А., Карагодин В.В., Вишняков Е.П. Математические основы построения оптимального по быстродействию управления возбуждением синхронного генератора // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2013. Т. 134. № 3. С. 3-8.

8. Моисеев Н.Н. Численные методы в теории оптимальных систем. М.: Наука, 1971. 424 с.

9. Антомонов Ю.Г. Синтез оптимальных систем. Киев: Наукова Думка, 1972. 320 с.

10. Карагодин В.В. Метод последовательных опорных решений в задачах оптимального быстродействия. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. 144 с.

11. Karagodin V.V., Gorin V.A., Smirnov S.V. Sequential Supporting Solutions Method in the Linear Oscillating Objects Control Problems Optimized by Processing Speed // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) — 2017: materials of International Conference. Saint-Petersburg, Russia. 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8076115> (accessed 03.09.2016). DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076115.

12. Карагодин В.В. Автоматизация систем электроснабжения специальных объектов. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. 326 с.

## References

1. Voropai N.I., Kovalev G.F., Kuchero Yu.N. *Kontseptsiya obespecheniya nadezhnosti v elektroenergetike* [The Concept of

Reliability in the Power Industry]. Moscow, Energiya Publ., 2013. 304 p. [in Russian].

2. *Osnovnye polozheniya kontseptsii intellektual'noi energosistemy s aktivno-adaptivnoi set'yu* [The Main Provisions of the Concept of Intelligent Power System with Active-Adaptive Network]. Moscow, ОАО «FSK EES» Publ., 2011. 51 p. [in Russian].

3. GOST 32144-2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 32144-2013. Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Power Quality Limits in the Public Power Supply Systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 p. [in Russian].

4. Gerasimov A.N., Karagodin V.V. *Matematicheskie modeli i sravnitel'nyi analiz besshchetochnykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya возбуждениya sinkhronnykh generatorov maloi i srednei moshchnosti* [Mathematical Models and Comparative Analysis of Brushless Automatic Excitation Control Systems for Small and Medium Power Synchronous Generators]. Saint-Petersburg, VIKA im. A.F. Mozhaiskogo Publ., 1995. 60 p. [in Russian].

5. Yurganov A.A., Kozhevnikov V.A. *Regulirovanie возбуждениya sinkhronnykh generatorov* [Regulation of Excitation of Synchronous Generators]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 1996. 138 p. [in Russian].

6. Pontryagin L.S. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [Mathematical Theory of Optimal Processes]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 392 p. [in Russian].

7. Gorin V.A., Karagodin V.V., Vishnyakov E.P. *Matematicheskie osnovy postroeniya optimal'nogo po bystrodeistviyu upravleniya возбуждением sinkhronnogo generatora* [Mathematical Bases of Construction of Optimum on Speed of Control of Excitation of the Synchronous Generator]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM — Electromechanical Matters*. VNIIEM Studies, 2013, Vol. 134, No. 3, pp. 3–8. [in Russian].

8. Moiseev N.N. *Chislennyye metody v teorii optimal'nykh sistem* [Numerical Methods in the Theory of Optimal Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 424 p. [in Russian].

9. Antomonov Yu.G. *Sintez optimal'nykh sistem* [Synthesis of Optimal Systems]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1972. 320 p. [in Russian].
10. Karagodin V.V. *Metod posledovatel'nykh opornykh reshenii v zadachakh optimal'nogo bystrodeistviya* [The Method of Successive Reference Solutions in Problems of Optimal Performance]. Saint-Petersburg, VKA im. A.F. Mozhaiskogo Publ., 2013. 144 p. [in Russian].
11. Karagodin V.V., Gorin V.A., Smirnov S.V. Sequential Supporting Solutions Method in the Linear Oscillating Objects Control Problems Optimized by Processing Speed. Materials of International Conference «Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) — 2017». Saint-Petersburg, Russia, 2017. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8076115> (accessed 03.09.2016). DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076115.
12. Karagodin V.V. *Avtomatizatsiya sistem elektrosnabzheniya spetsial'nykh ob"ektov* [Automation of Power Supply Systems for Special Facilities]. Saint-Petersburg, VKA im. A.F. Mozhaiskogo Publ., 2017. 326 p. [in Russian].



**Ершов М. С.**  
**Ershov M. S.**

*доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры теоретической  
электротехники и электрификации  
нефтяной и газовой промышленности,  
ФГОАУ ВО «Российский государственный  
университет нефти и газа (национальный  
исследовательский университет)  
имени И.М. Губкина»,  
г. Москва, Российская Федерация*



**Лалин Д. И.**  
**Lapin D. I.**

*аспирант кафедры теоретической  
электротехники и электрификации  
нефтяной и газовой промышленности,  
ФГОАУ ВО «Российский государственный  
университет нефти и газа (национальный  
исследовательский университет)  
имени И.М. Губкина»,  
г. Москва, Российская Федерация*

УДК 621.365.5

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-15-22

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ НА БАЗЕ ЧЕТЫРЕХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Для непрерывных производств актуальна проблема сохранения устойчивой работы электроприемников при кратковременных возмущениях, обусловленных авариями, короткими замыканиями и сопровождающихся провалами напряжения в электрических сетях. В данной статье рассмотрено новое решение задачи обеспечения непрерывности питания ответственных электроприемников на основе четырехобмоточного трансформатора двойного питания, который представляет собой магнитопровод стержневого типа, на каждом из стержней которого размещено по четыре обмотки. Для исследования данного трансформатора были проведены опыты короткого замыкания, холостого хода, исследован ряд рабочих и аварийных режимов. Также представлены осциллограммы напряжений на выходе трансформатора при возмущениях на вводах трансформатора. На основании обработки осциллограмм вычислены значения прямой и обратной составляющих напряжения в аварийных и рабочих режимах. Из анализа результатов физических экспериментов следует, что в данной системе режимы, связанные с исчезновением напряжения на одном из вводов трансформатора, практически не влияют на работу всей нагрузки системы — нормальное напряжение на нагрузке обеспечивается за счет питающего ввода, оставшегося в работе, что и обеспечивает решение задачи сохранения устойчивости работы всей нагрузки при кратковременных нарушениях электроснабжения. Подобные устройства, в первую очередь, могут использоваться для создания систем гарантированного электроснабжения с целью обеспечения гарантированного питания оперативных цепей управления. Использование предлагаемого устройства наиболее эффективно для удаленных объектов, включая подстанции и распределительные пункты, регулярное обслуживание которых затруднительно, там, где создание систем гарантированного питания на базе источников бесперебойного питания с аккумуляторными батареями нерентабельно.

**Ключевые слова:** трансформатор, кратковременные нарушения электроснабжения, устойчивость энергосистемы, самоотключение нагрузки, короткие замыкания, повышенная надежность питания, система гарантированного электроснабжения.

## RESEARCH OF POWER SYSTEM OF HIGHER RELIABILITY BASED ON THE FOUR-WINDING TRANSFORMER

For continuous production, the problem of maintaining the stable operation of power consumers with short-term disturbances caused by accidents, short circuits and accompanied by voltage dips in electrical networks is relevant. This article is devoted to the new solution of ensuring continuity of power supply of responsible energy consumers on the base of four-winding transformer of double power supply, which is a rod-type magnetic circuit, on each of the rods of which four windings are placed. For researching this transformer, short-circuit and idle experiments were conducted, a number of operating and emergency conditions were researched. Oscillograms of voltages at the transformer output under disturbances at the transformer inputs are also presented. Based on the processing of the waveforms, the values of the forward and reverse voltage components in emergency and operating modes are calculated. As can be seen from the analysis of experiments, in this system, the modes associated with the disappearance of voltage at one of the transformer inputs practically do not affect the operation of the entire load of the system and the normal voltage at the load is ensured by the power input remaining in operation, which provides a solution to the problem maintaining the stability of the entire load during short-term power outages. Such devices, in the first place, can be used to create guaranteed power supply systems, in order to ensure guaranteed power to operational control circuits. Using the proposed device is most effective for remote facilities, including substations and distribution points, the regular maintenance of which is difficult, where the creation of guaranteed power systems based on uninterruptible power supplies with batteries is unprofitable.

**Key words:** transformer, momentary power failure, stability of the power system, load fault, short circuit, higher reliability of power source, guaranteed power supply system.

Для непрерывных производств актуальна проблема сохранения электрооборудования в устойчивом режиме работы при кратковременных сбоях подачи электроэнергии, которые обусловлены авариями и короткими замыканиями.

Следствием провалов напряжения в узлах электродвигательной нагрузки может быть потеря устойчивости электротехнических систем с большим составом высоковольтной электродвигательной нагрузки и массовое самоотключение низковольтных электродвигателей из-за отпадания магнитных пускателей и контакторов [1]. Известно, что отпадание магнитных пускателей и контакторов, как правило, начинается при снижении напряжения на их катушках ниже 0,7 отн. ед. Длительность отпадания пускателей составляет от периода до нескольких периодов синусоидального напряжения (десятки мс) и зависит от регулировки электромеханической части пускателей и от значений остаточного напряжения на катушках [2]. Известны различные мероприятия по предотвращению самоотключения двигателей, например применение специальных магнитных пускателей с задержкой на отключение. Такое решение не всегда применимо по условиям требования технологических процессов и техники

безопасности и требуют согласования изменения проектных решений. Другим решением является перевод цепей управления на питание от систем гарантированного электроснабжения (СГЭ). К такой системе подключаются устройства релейной защиты и автоматики, а также цепи управления ответственных электроприёмников низкого напряжения. При проектировании объекта устанавливается род тока и конкретный метод создания СГЭ, при этом все эти методы предполагают наличие третьего, независимого, источника питания. Для систем малых мощностей в качестве таких источников чаще всего выступают аккумуляторные батареи. Основные недостатки — это сложность их конструкции, высокая стоимость, ограниченный срок службы, повышенные требования к техническому обслуживанию. Также следует иметь в виду, что ни одно из известных на данный момент устройств в случае короткого замыкания не способно обеспечить номинальное напряжение в системе СГЭ, следовательно, гарантированность питания следует понимать в ограниченном смысле, то есть как защищенность от внешних возмущений [3]. В значительной степени минимальными средствами это возможно сделать с помощью трансформатора двойного пита-

ния, конструкция и схемы замещения которого представлены в [3–5].

Трехфазный четырехобмоточный трансформатор имеет две первичные и две вторичные

обмотки, определенным образом размещенные на стержнях магнитопровода. Принципиальная схема подключения трансформатора представлена на рисунке 1.

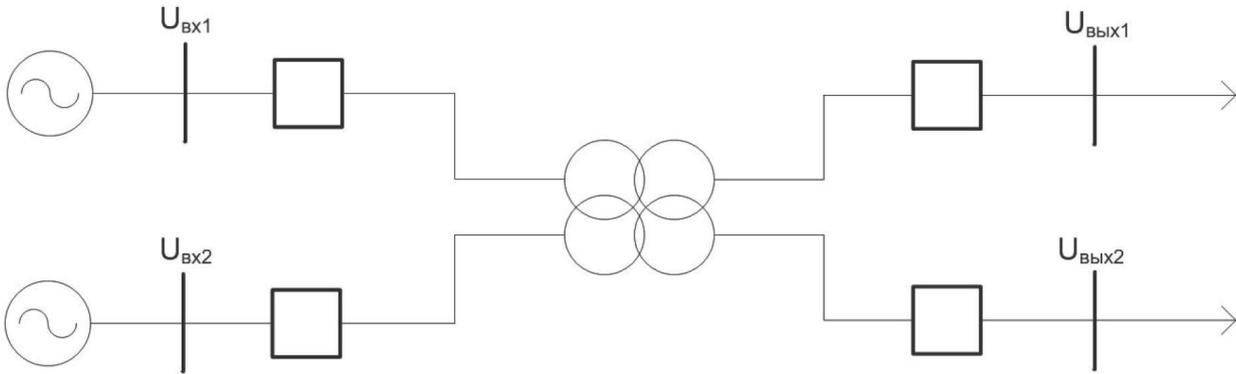


Рисунок 1. Схема подключения четырехобмоточного трансформатора

Процессы электрических цепей первичных и вторичных обмоток трехфазного четырехобмоточного трансформатора описываются системой из двенадцати дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 u_{i1} &= i_{i1}R_{11} + L_{\sigma 11} \frac{di_{i1}}{dt} + W_{11} \frac{d\Phi_{i1}}{dt}; \\
 u_{i2} &= i_{i2}R_{12} + L_{\sigma 12} \frac{di_{i2}}{dt} + W_{12} \frac{d\Phi_{i2}}{dt}; \\
 u_{j1} &= i_{j1}R_{21} + L_{\sigma 21} \frac{di_{j1}}{dt} + W_{21} \frac{d\Phi_{j1}}{dt}; \\
 u_{j2} &= i_{j2}R_{22} + L_{\sigma 22} \frac{di_{j2}}{dt} + W_{22} \frac{d\Phi_{j2}}{dt}; \\
 \Phi_{i1} + \Phi_{i2} + \Phi_{j1} + \Phi_{j2} + \Phi_n &= 0, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где индексы  $i = A, B, C$  (AB, BC, CA) соответствуют обозначениям фаз первичных обмоток;  $j = a, b, c$  (ab, bc, ca) — индексы, соответствующие обозначениям фаз вторичных обмоток;  $u_{i1}, u_{i2}, u_{j1}, u_{j2}$  и  $i_{i1}, i_{i2}, i_{j1}, i_{j2}$  — фазные первичные и вторичные напряжения и токи четырехобмоточного трансформатора;  $\Phi_{i1}, \Phi_{i2}, \Phi_{j1}, \Phi_{j2}$  — магнитные потоки, связанные с обмотками трансформатора, и поток  $\Phi_n$ , замыкаемый через бак трансформатора.

Переходя к эквивалентным синусоидам магнитных потоков, напряжений и токов, на основании приведенных выше уравнений и с учетом схемы замещения магнитной цепи трансформатора, можно получить систему уравнений, связывающих электромагнитные комплексные величины (напряжения, токи и потоки) трансформатора и представляющих собой модель установившегося режима трансформатора [3]. Результаты компьютерного моделирования характерных аварийных режимов на втором вводе четырехобмоточного трансформатора представлены в работе [4]. Часть из них используется в качестве расчетных величин, представленных в таблице 1.

В этой же таблице 1 приведены результаты экспериментов для указанных аварийных режимов, связанных с отключением отдельных фаз или различными короткими замыканиями на втором вводе трансформатора.

Эксперименты выполнены на макетном образце четырехобмоточного трансформатора. Обмотки трансформатора включены по схеме Ун / Ун / Д / Д. Соответствующие

Таблица 1. Расчетные и экспериментальные результаты моделирования системы на базе четырехобмоточного трансформатора

Режимы	Вывод 1				Вывод 2			
	расчет		опыт		расчет		опыт	
	u1	u2	u1	u2	u1	u2	u1	u2
Отключение фазы А	1,01	0,01	1,01	0,04	0,97	0,03	1,01	0,04
Отключение фаз А и В	1,00	0,02	1,05	0,01	0,93	0,04	1,05	0,07
Отключение всех фаз ввода	0,98	0,01	1,02	0,18	0,88	0	1,06	0,06
КЗ фазы А	0,93	0,08	1,04	0,17	0,78	0,24	0,94	0,40
КЗ между фазами А-В	0,89	0,12	1,02	0,07	0,65	0,35	0,98	0,37
КЗ трехфазное на вводе	0,79	0,01	1,01	0,11	0,63	0,01	0,71	0,11

номинальные напряжения на входе и выходе трансформатора составляют 380 / 380 / 220 / 220 В. Число витков первичных и вторичных обмоток одинаково и составляет 1420. Расчетное значение магнитной индукции 1,2 Тл. Расчетная мощность трансформатора составляет 240 ВА.

Трансформатор двойного питания представляет собой магнитопровод стержневого типа, на каждом из стержней которого размещено по четыре обмотки: ВН<sub>1</sub> и ВН<sub>2</sub> — первая и вторая обмотки высшего напряжения; НН<sub>1</sub> и НН<sub>2</sub> — первая и вторая обмотки низшего напряжения. Составные части данных обмоток размещаются на стержнях магнитопровода определенным образом.

Питание макетного образца трансформатора осуществлялось от разных источников напряжения, с возможностью регулирования уровня вводного напряжения, с реостатами и маломощными асинхронными двигателями в качестве нагрузки, что составляло около 70–80 % от номинальной нагрузки в рабочих

режимах. Были проведены опыты КЗ, холостого хода, исследованы рабочие и аварийные режимы. опыты короткого замыкания проведены при трехфазном КЗ на втором выходе НН<sub>2</sub>) для трех режимов, когда питание осуществлялось по каждому из вводов отдельно, а затем по обоим вводам. Напряжения короткого замыкания составили:

$$U_{K(ВН1-НН1)} = U_{K(ВН2-НН2)} = 16 \%;$$

$$U_{K(ВН1-НН2)} = U_{K(ВН2-НН1)} = \\ = U_{K(ВН1-ВН2)} = U_{K(НН1-НН2)} = 23 \%;$$

$$U_{K(ВН1,ВН2-НН1)} = U_{K(ВН1,ВН2-НН2)} = 12 \%.$$

Опыты холостого хода проведены для двух режимов, когда питание осуществлялось по обоим вводам, а также по одному из вводов (ВН<sub>1</sub>).

На рисунке 2 представлена схема замещения, параметры которой определены на основании опытов короткого замыкания и холостого хода трансформатора.

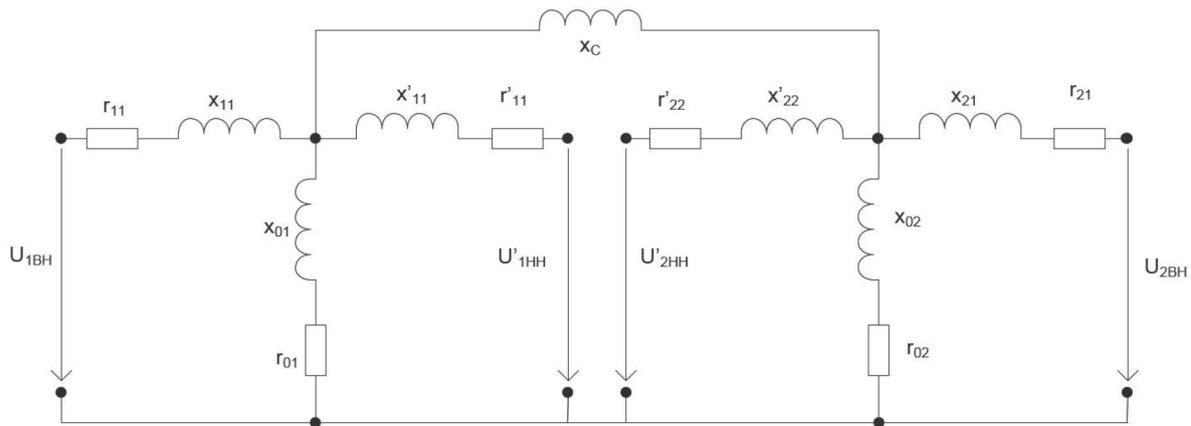


Рисунок 2. Полная схема замещения четырехобмоточного трансформатора

Полная схема замещения трансформатора содержит:

— ветви с реактивными сопротивлениями рассеяния и активными сопротивлениями первичных  $x_{11}$ ,  $r_{11}$ ,  $x_{12}$ ,  $r_{12}$  и вторичных  $x'_{21}$ ,  $r'_{21}$ ,  $x'_{22}$ ,  $r'_{22}$  обмоток;

— две намагничивающие ветви с сопротивлениями  $x_{01}$ ,  $r_{01}$ ,  $x'_{02}$ ,  $r'_{02}$ ;

— ветвь с сопротивлением связи  $x_c$ .

Для макетного образца значения сопротивлений схемы замещения составили:

$$x_{11} = x_{12} = x'_{21} = x'_{22} = 10 \text{ Ом};$$

$$r_{11} = r_{12} = r'_{21} = r'_{22} = 71 \text{ Ом};$$

$$x_{01} = x_{02} = 6590 \text{ Ом};$$

$$r_{01} = r_{02} = 3350 \text{ Ом};$$

$$x_c = 114 \text{ Ом}.$$

Для исследования аварийных режимов системы с четырёхобмоточным трансформатором была собрана экспериментальная установка, представленная на рисунке 3, и выполнены следующие опыты.

Отключение линейного напряжения по вводу ВН<sub>2</sub> трансформатора:

- отключение одной фазы;
- отключение двух фаз;
- отключение ввода ВН<sub>2</sub>.

КЗ на вводе ВН<sub>2</sub>:

- однофазное КЗ на землю;

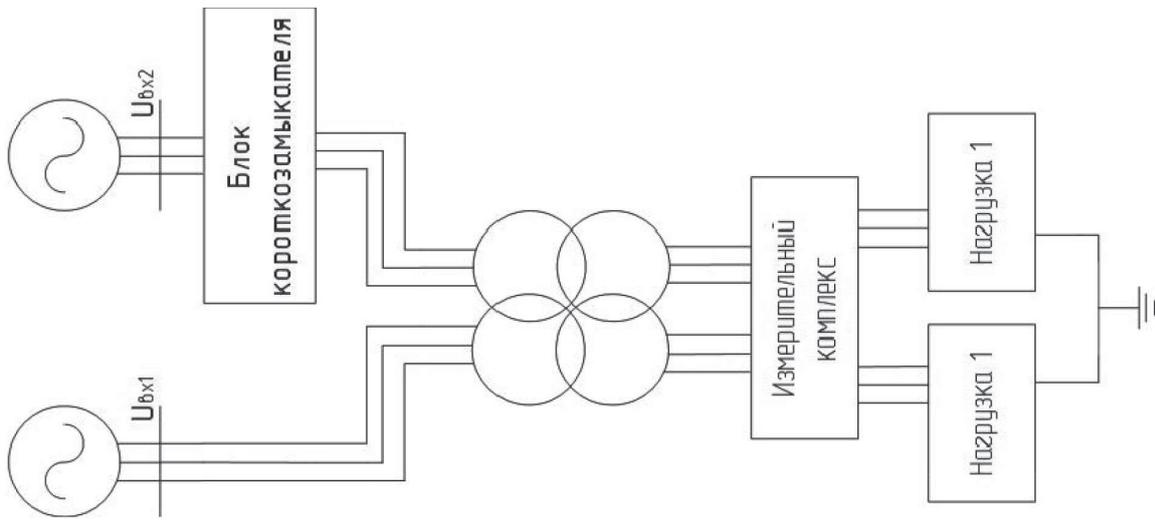


Рисунок 3. Схема экспериментальной установки

- двухфазное КЗ на землю;
- трёхфазное металлическое КЗ.

Все произведенные короткие замыкания являются металлическими и производились

при помощи блока короткозамыкателя, схема которого представлена на рисунке 4. Длительность коротких замыканий не превышала 2 с.

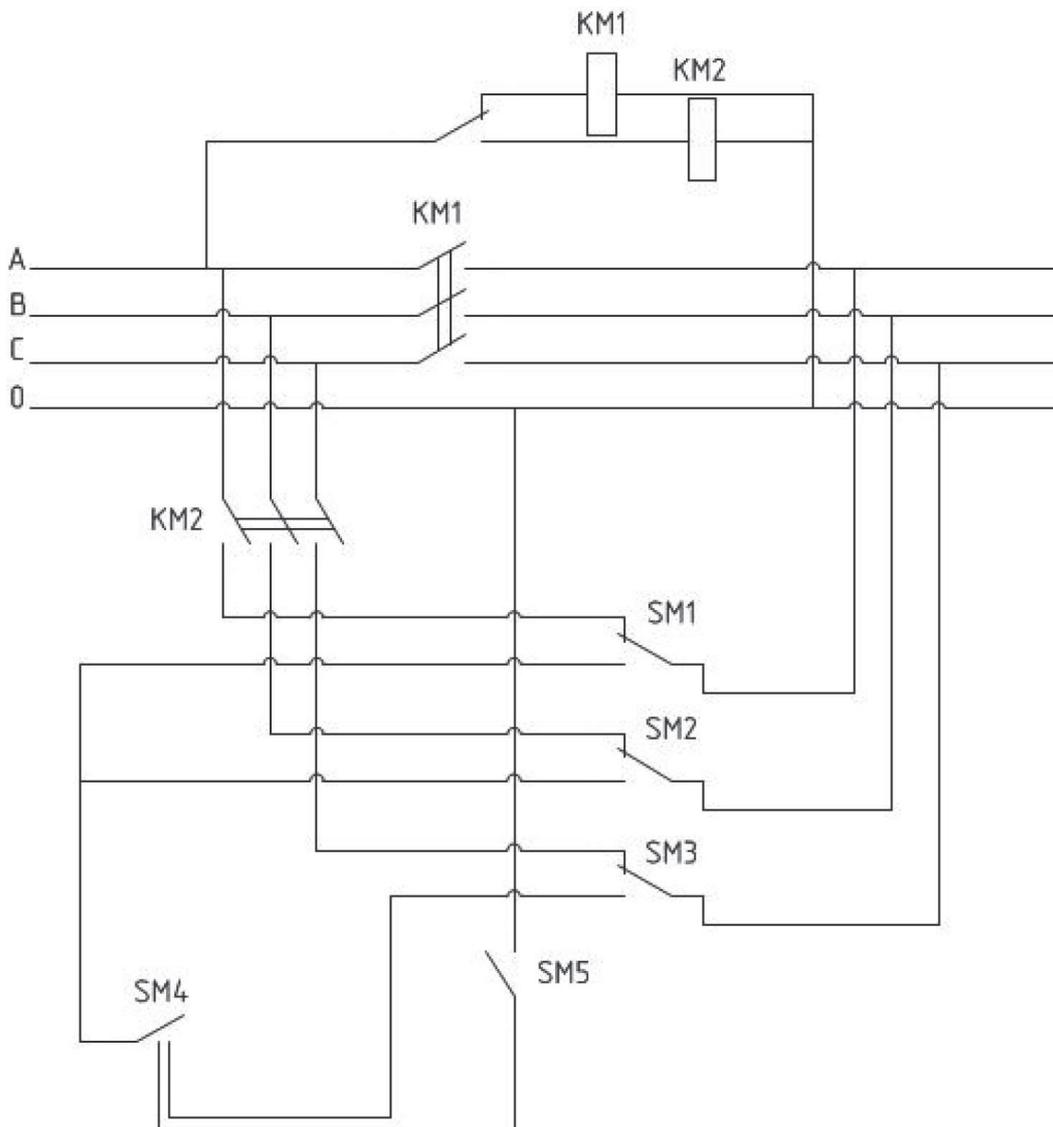
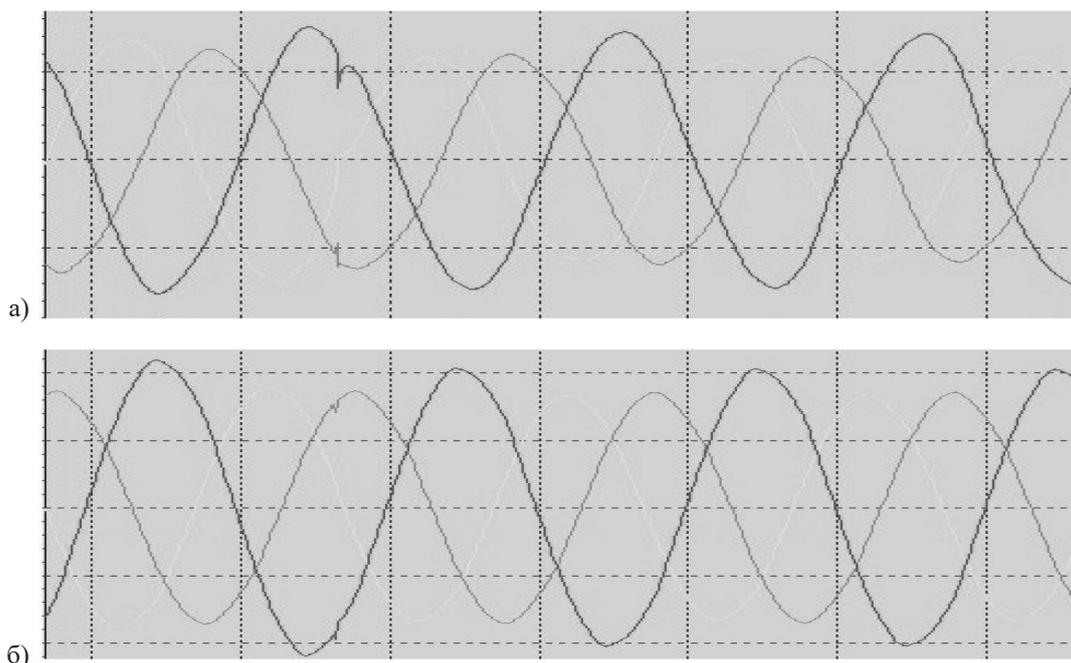


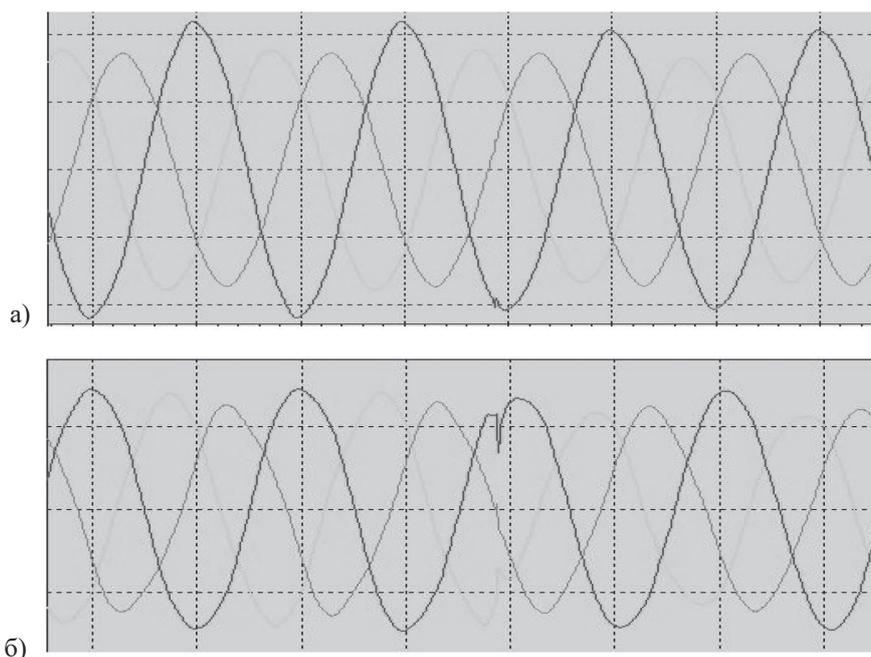
Рисунок 4. Схема короткозамыкателя

На рисунках 5–8 представлены осциллограммы напряжений на выходе трансформатора при возмущениях на вводах транс-

форматора. Осциллограммы сняты с использованием измерительного комплекса ADC-Lab Flash-Recorder-2-16.



**Рисунок 5.** Напряжения фаз выходов  $НН_1$  (а) и  $НН_2$  (б) при отключении фазы А на вводе  $ВН_2$



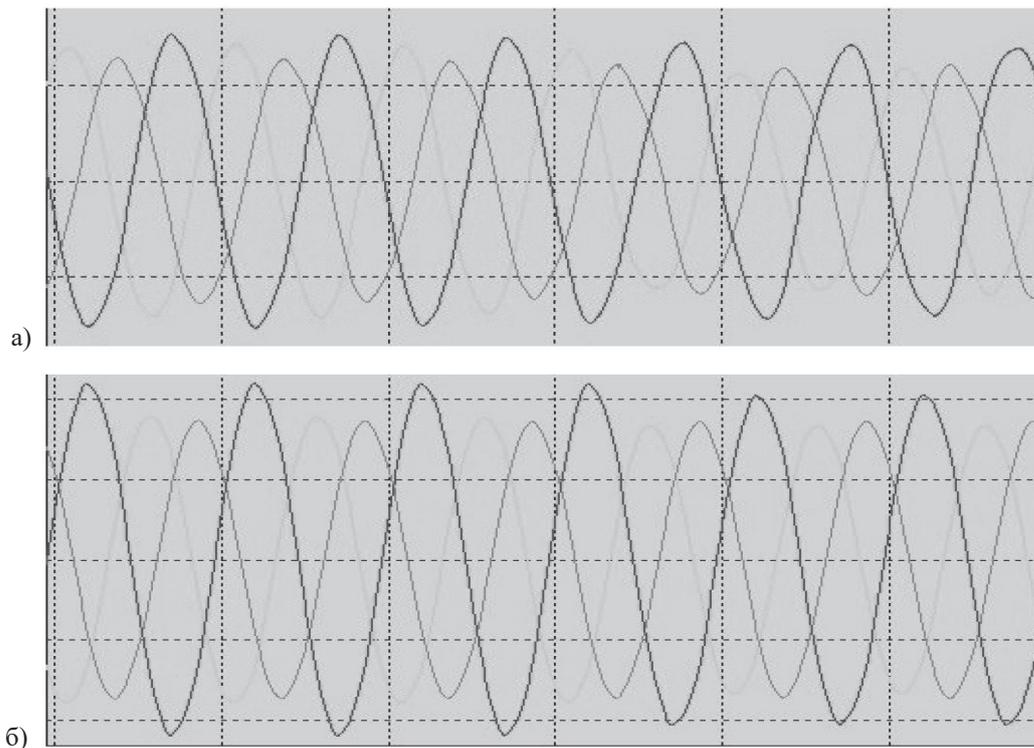
**Рисунок 6.** Напряжения фаз выходов  $НН_1$  (а) и  $НН_2$  (б) при отключении фаз А и В на вводе  $ВН_2$

На основании обработки осциллограмм вычислены значения прямой и обратной составляющих напряжения в указанных режимах. Для вычислений использовались упрощенные формулы (точность в пределах 6 %) из ГОСТ 13109-97, позволяющие выразить напряжения прямой  $U_1$  и обратной  $U_2$  последовательностей через линейные напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ :

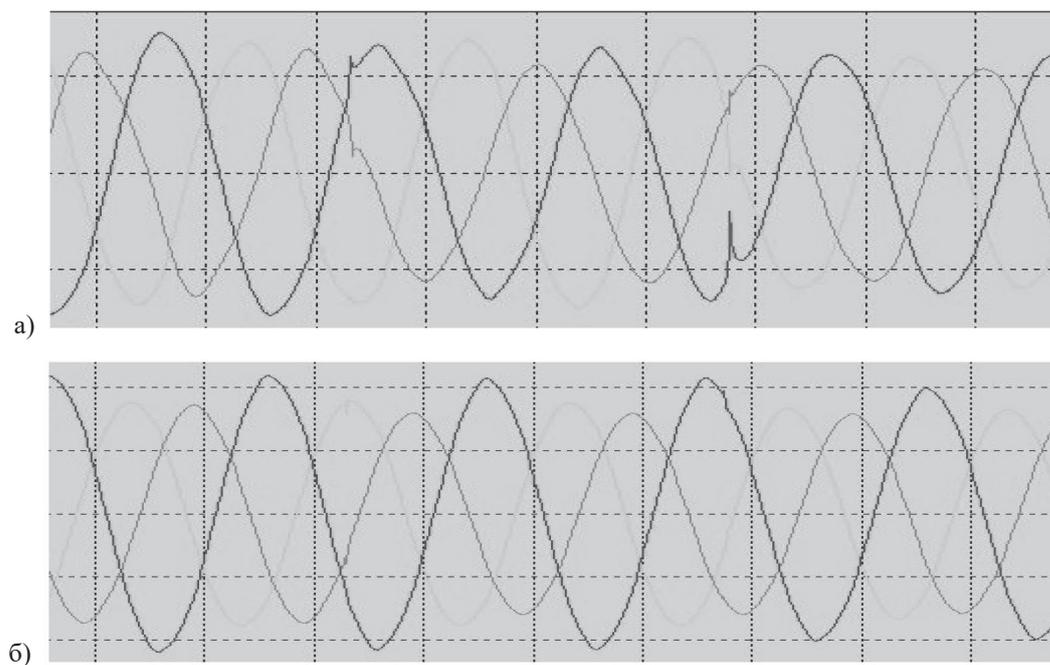
$$U_{1i} = \frac{1}{3} (U_{ABi} + U_{BCi} + U_{CAi});$$

$$U_{2i} = 0,62(U_{нби} - U_{нми}), \quad (2)$$

где  $U_{нби}$ ,  $U_{нми}$  — наибольшее и наименьшее значения из трех межфазных напряжений в  $i$ -ом наблюдении. Отношение напряжений прямой и обратной последовательностей к номинальному напряжению позволит полу-



**Рисунок 7.** Напряжение фаз выходов  $НН_1$  (а) и  $НН_2$  (б) при металлическом коротком замыкании фазы А на землю на вводе  $ВН_2$



**Рисунок 8.** Напряжение фаз выходов  $НН_1$  (а) и  $НН_2$  (б) при металлическом коротком замыкании фаз А-В-С на вводе  $ВН_2$

чить составляющие напряжения в относительных единицах.

Как видно из расчетных и опытных данных, устройство на базе четырехобмоточного трансформатора обеспечивает достаточно высокий уровень остаточного напряжения прямой последовательности, определяющий электромеханические переходные процессы электроприемников, прак-

тически в любых режимах питающих электрических сетей.

#### **Вывод**

В заключение можно сделать вывод о работоспособности предложенного устройства на базе четырехобмоточного трансформатора двойного питания. Подобные устройства, в первую очередь, могут использоваться для создания СГЭ с целью обеспечения

гарантированного питания оперативных цепей управления. При сравнении с традиционными источниками бесперебойного питания на базе аккумуляторных батарей: отсутствие необходимости технического обслуживания, малую стоимость, простоту конструкции, гальваническую развязку всех цепей. Использование предлагаемого устрой-

ства наиболее эффективно для удаленных объектов, включая подстанции и распределительные пункты, регулярное обслуживание которых затруднительно, там, где создание систем гарантированного питания на базе источников бесперебойного питания с аккумуляторными батареями нерентабельно.

### Список литературы

1. Ершов М.С., Егоров А.В., Трифонов А.А. Устойчивость промышленных электротехнических систем. М.: Недра, 2010. 318 с.
2. Гуревич Ю. Е., Кабиков К.В. Особенности электроснабжения ориентированного на бесперебойную работу потребителя. М.: ЭЛЕКС-КМ, 2005. 408 с.
3. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Егоров А.В. Исследование новой системы электроснабжения, обеспечивающей повышение устойчивости двигательной нагрузки // Электричество. 1997. № 8. С. 19–23.
4. Ершов М.С., Егоров А.В., Самодуров А.В. Система повышенной надежности электропитания цепей оперативного управления // Промышленная энергетика. 2005. № 2. С. 23–26.
5. Пат. 2054780 РФ, МПК Н 02 J 3/00. Устройство питания и распределения электрической энергии в системах электроснабжения / Б.Г. Меньшов, М.С. Ершов, А.В. Егоров, А.А. Назаретова. 94006039, Заявлено 22.02.1994; Опубл. 20.02.1996. Бюл. 5.

### References

1. Ershov M.S., Egorov A.V., Trifonov A.A. *Ustoichivost' promyshlennykh elek-*

*trotekhnicheskikh sistem* [Stability of Industrial Electrical Systems]. Moscow, Nedra Publ., 2010. 318 p. [in Russian].

2. Gurevich Yu. E., Kabikov K.V. *Osobennosti elektrosnabzheniya orientirovannogo na bespereboinuyu rabotu potrebitelya* [Features of Power Supply Focused on Uninterrupted Operation of the Consumer]. Moscow, ELEKS-KM Publ., 2005. 408 p. [in Russian].

3. Men'shov B.G., Ershov M.S., Egorov A.V. *Issledovanie novoi sistemy elektrosnabzheniya, obespechivayushchei povyshenie ustoichivosti dvigatel'noi nagruzki* [Investigation of a New Current Supply System Insuring Increasing the Stability of an Impellent Load]. *Elektrichestvo — Electrical Technology Russia*, 1997, No. 8, pp. 19-23. [in Russian].

4. Ershov M.S., Egorov A.V., Samodurov A.V. *Sistema povyshennoi nadezhnosti elektropitaniya tsepei operativnogo upravleniya* [High Reliability Power Supply System for on-Line Control Circuit]. *Promyshlennaya energetika — Industrial Power Engineering*, 2005, No. 2, pp. 23-26. [in Russian].

5. Menshov B.G., Ershov M.S., Egorov A.V., Nazaretova A.A. *Ustroistvo pitaniya i raspredeleniya elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya* [The Device of Power Supply and Distribution of Electric Energy in Power Supply Systems]. Patent RF, No. 2054780, 1996. [in Russian].



**Саттаров Р. Р.**  
**Sattarov R. R.**

доктор технических наук,  
профессор кафедры  
«Электротехника и  
электрооборудование  
предприятий»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация



**Стыскин А. В.**  
**Styskin A. V.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Электромеханика»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный  
авиационный технический  
университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация



**Уразбахтина Н. Г.**  
**Urazbakhtina N. G.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Электромеханика»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный  
авиационный технический  
университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация

УДК 621.318

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-23-29

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ В УСТРОЙСТВАХ ДЛЯ ФОРСИРОВКИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКТИВНЫХ МНОГОФАЗНЫХ НАГРУЗКАХ

Во многих современных приложениях необходимы быстродействующие электромеханические устройства, для управления которыми используются полупроводниковые преобразователи. Скорость переключений силовых полупроводниковых ключей существенно выше скорости коммутации обмоток. Поэтому во многих случаях для обеспечения высокого быстродействия различных электромеханических систем необходимо решить задачу ускорения коммутации обмоток электромеханических устройств. Для этого используются различные схемы по форсированию переходных процессов при подключении индуктивной нагрузки к источнику напряжения. Разработка и реализация устройств форсировки переходных процессов особенно необходима для быстродействующих электромагнитных механизмов, вентильно-индукторных и реактивных электрических машин.

В работе рассмотрены оригинальные устройства форсирования переходных процессов при переключении обмоток двухобмоточных электромеханизмов, работающих в двухтактном режиме, и многофазных электрических двигателей, имеющих значительную индуктивность обмоток. Проведен анализ протекающих в этих устройствах форсировки физических процессов. Для численного исследования используется схемотехническое компьютерное моделирование. Разработаны компьютерные модели в MatLAB и проведен анализ предлагаемых устройств форсирования. В результате получены данные о существенном влиянии предложенных устройств форсирования на характер переходного процесса при коммутации обмоток электрических машин, а также на характер электромагнитной обстановки при работе машины.

Проведенный анализ результатов компьютерного моделирования устройства форсировки переходных процессов позволяет определить оптимальные соотношения параметров устройства в зависимости от параметров коммутируемых обмоток. Практически важно, что получены соотношения между параметрами обмоток электрического двигателя и периодом следования управляющих сигналов, при которых можно добиться практически прямоугольной формы тока в обмотках. Величина перенапряжений при этом остается ограниченной допустимыми пределами.

Показано, что предложенные устройства форсирования могут быть использованы в многофазных электрических вентильных машинах для повышения быстродействия электропривода. Результаты исследования могут быть полезны при проектировании многофазных электрических машин и двухобмоточных электромеханизмов.

**Ключевые слова:** индуктивная нагрузка, электромеханизмы, вентильно-индукторный двигатель, переключение фаз, форсировка переходных процессов, ЭДС самоиндукции, рекуперация энергии, величина перенапряжения, электромагнитная совместимость, моделирование, MatLAB/Simulink.

## STUDY OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES OF ENERGY RECOVERY IN DEVICES FOR FORMING TRANSIENT PROCESSES IN INDUCTED MULTI-PHASE LOADS

In many modern applications, high-speed electromechanical devices are needed, which are controlled by semiconductor converters. The switching speed of power semiconductor switches is significantly higher than the switching speed of the windings. Therefore, in many cases, to ensure high speed of various electromechanical systems, it is necessary to solve the problem of accelerating the switching windings of electromechanical devices. For this purpose, various schemes are used for boosting the transient processes when an inductive load is connected to a voltage source. The development and implementation of transient forcing devices is especially necessary for high-speed electromagnetic mechanisms, valve-inductor and jet electric machines.

The paper considers the original devices forcing the transient processes when switching the windings of two-winding electric mechanisms operating in two-stroke mode and multi-phase electric motors with significant winding inductance. The analysis of physical processes occurring in these devices is carried out. For the numerical study circuit computer simulation was used. Computer models are developed in MatLAB and the proposed forcing devices are analyzed. As a result, data were obtained on the significant effect of the proposed forcing devices on the nature of the transient process when switching windings of electric machines, as well as on the nature of the electromagnetic environment during the operation of the machine. The analysis of the results of computer simulation of the device forcing the transient processes allows to determine the optimal ratios of the device parameters depending on the parameters of the switched windings. It is practically important that the obtained ratios between the parameters of the windings of an electric motor and the period of repetition of control signals, under which one can achieve almost rectangular current in the windings. The value of overvoltages, however, remains limited by the permissible limits. It is shown that the proposed forcing devices can be used in multiphase electric valve machines to improve their speed of the electric drive. The results of the study can be useful in the design of multi-phase electrical machines and double-wound electric mechanisms.

**Key words:** inductive load, electric mechanisms, valve-inductor motor, phase switching, forcing of transient processes, self-induced EMF, energy recovery, over voltage magnitude, electromagnetic compatibility, modeling, MatLAB/Simulink.

### *Введение*

Со стороны систем автоматики сегодня предъявляются высокие требования по быстродействию электромеханических исполнительных устройств [1]. В качестве таких устройств все большее применение находят вентильные индукторные двигатели [2], которые с электромагнитной точки зрения представляют собой многофазную практически чисто индуктивную нагрузку. Поэтому переходные процессы (ПП) в обмотках протекают сравнительно медленно [3, 4]. Аналогичные явления характерны и для

одно- и двухфазных индуктивных нагрузок (реле, электромагнитные приводы).

Поэтому для ускорения ПП используются различные средства, например, в электромагнитном приводе может быть использована дополнительная короткозамкнутая магнитосвязанная обмотка. Наибольшее распространение получили методы форсирования ПП за счет увеличения напряжения питания в начале процесса. Однако все эти методы связаны с необходимостью наличия дополнительных источников энергии [2].

Одним из перспективных направлений развития устройств форсировки ПП является использование энергии магнитного поля других обмоток. Идея этого метода форсирования ПП в индуктивных нагрузках была высказана довольно давно [5], однако повсеместного практического применения не нашла. Проведенные исследования устройств форсировки с рекуперацией подтверждают ее эффективность — время достижение максимального тока при коммутации обмоток может быть уменьшено в несколько раз [6]. С другой стороны, выявлены существенные недостатки схемы форсирования с рекуперацией, а именно, возникают перенапряжения в отключаемой обмотке (до 4 кВ), что может привести к выходу из строя полупроводниковых ключевых элементов и даже обмоток. Такие

импульсы напряжения также создают электромагнитные помехи [6].

Уменьшение перенапряжения без существенного снижения эффекта форсирования переходного процесса может быть достигнуто за счет применения емкости (рисунок 1), величина которой должна определяться исходя из допустимого уровня перенапряжения [7]. На рисунке 1 показана обобщенная схема устройства для форсирования ПП при коммутации обмоток многофазной индуктивной нагрузки, разработанная на основе «несимметричного моста» [8]. Здесь также используется ЭДС самоиндукции отключаемой обмотки, только изменяются цепи передачи тока от ЭДС самоиндукции отключаемой обмотки в цепь включаемой обмотки, она проходит через цепь от источника питания.

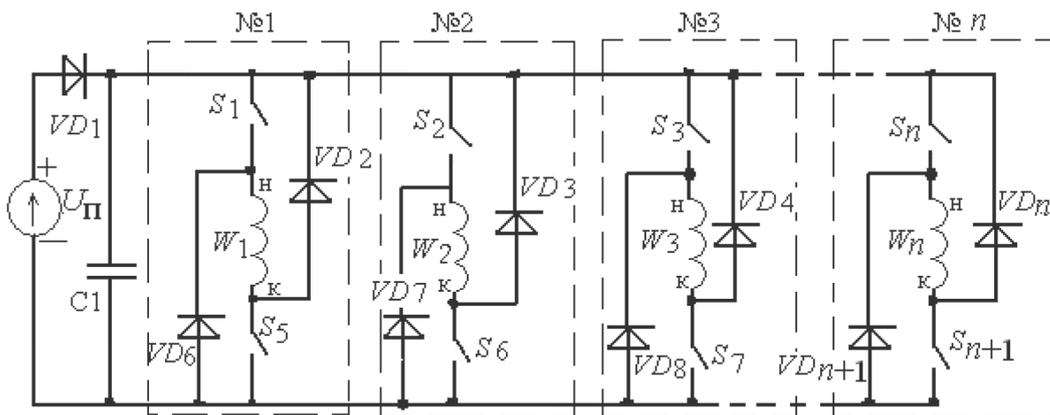


Рисунок 1. Устройство форсирования для n-фазной электрической нагрузки (фазные обмотки  $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$ )

В цепи каждой обмотки имеются по два ключа, которые периодически включаются и отключаются системой управления. Система управления также задает частоту коммутации обмоток. Чтобы предотвратить попадание тока рекуперации в источник питания, включен диод VD1. Для улучшения электромагнитной совместимости включен конденсатор C1, который ограничивает перенапряжения в схеме при коммутации обмоток.

*Схематехническое моделирование и анализ устройств форсирования*

В данной работе разработана и исследована схематехническая модель схемы форсирования ПП с рекуперацией и улучшенной электромагнитной совместимостью для двух- и трехфазных индуктивных нагрузок.

В случае двухфазной нагрузки схема симметрична, и могут быть использованы два конденсатора. На рисунке 2 приведена структурная схема схематехнической модели схемы форсирования ПП в двухфазной нагрузке.

Полученные на модели осциллограммы (рисунок 3) показывают, что перенапряжения достигают 100–120 В, т.е. 3–4-кратного значения напряжения питания, что считается допустимым. В то же время в схеме без конденсаторов C1 и C2 перенапряжения были около 4000 В, т.е. примерно 50-кратное превышение напряжения питания [6].

Структурная схема модели многофазной ( $n=3$ ) электрической машины приведена на рисунке 4. Устройство форсирования в ней выполнено на тиристорах типа ГТО.

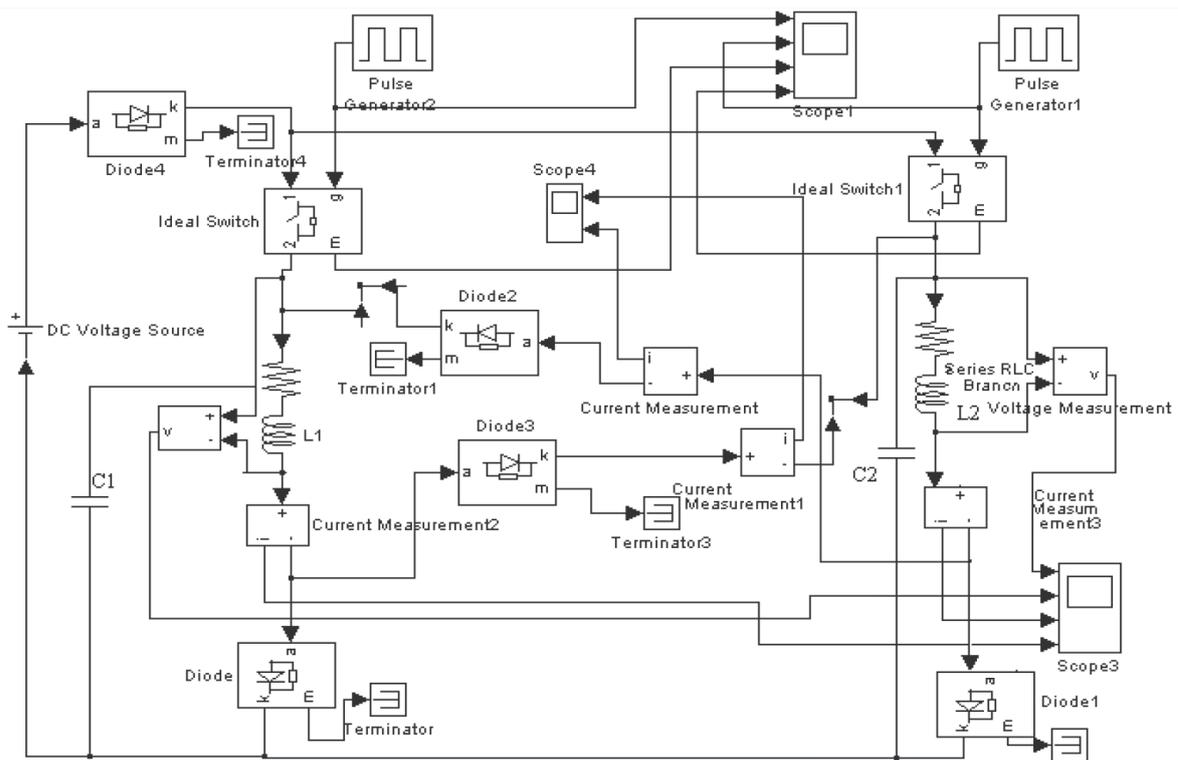


Рисунок 2. Структурная схема схемотехнической модели устройства форсирования для двухобмоточного электромеханизма

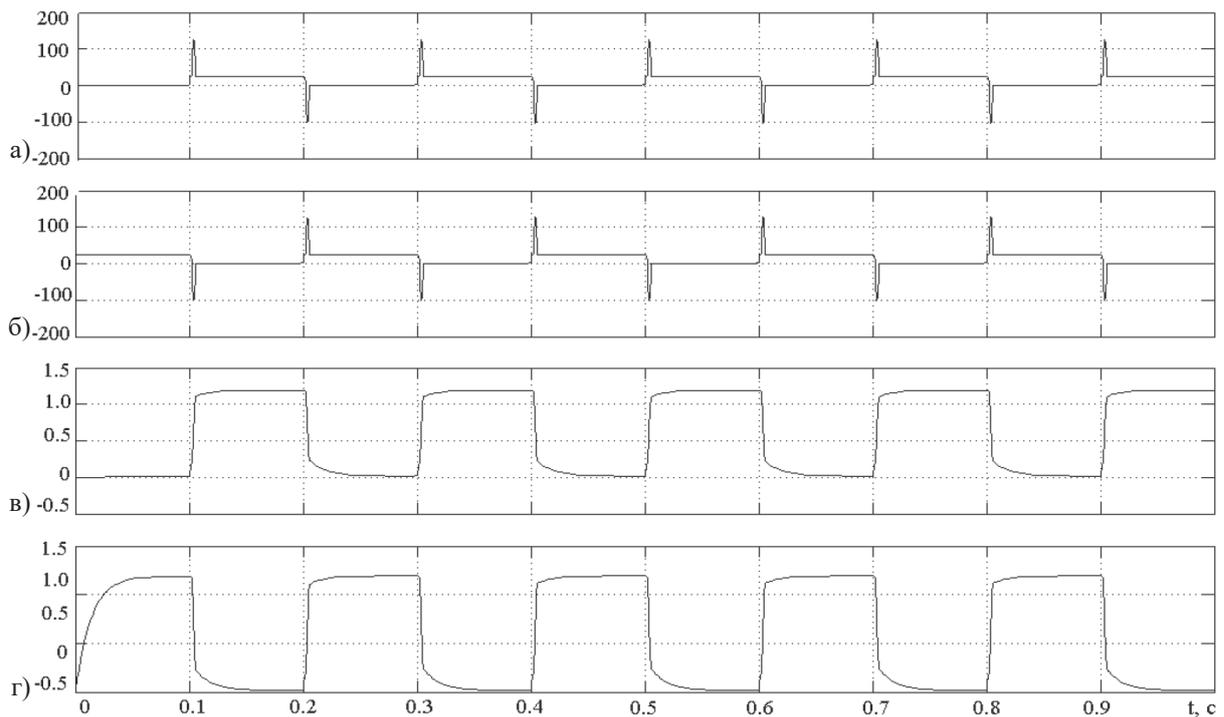


Рисунок 3. Кривые токов и напряжений двухобмоточной модели: кривые напряжения на первой и второй обмотках (а, б), кривые токов в этих же обмотках (в, г) электромеханизма

Осциллограммы токов и напряжений на обмотках многофазной машины, полученные при моделировании, представлены на рисунке 5. Анализ кривых переходного процесса показывает, что постоянные времени кривых тока практически незначительны — кривые практически прямоугольные, при

этом перенапряжения при переключении обмоток остаются в пределах нормативных показателей (125 В при напряжении питания 27 В). Было выяснено, что для каждого сочетания параметров машины существует определенный диапазон параметров импульсов управления — периодом следования.

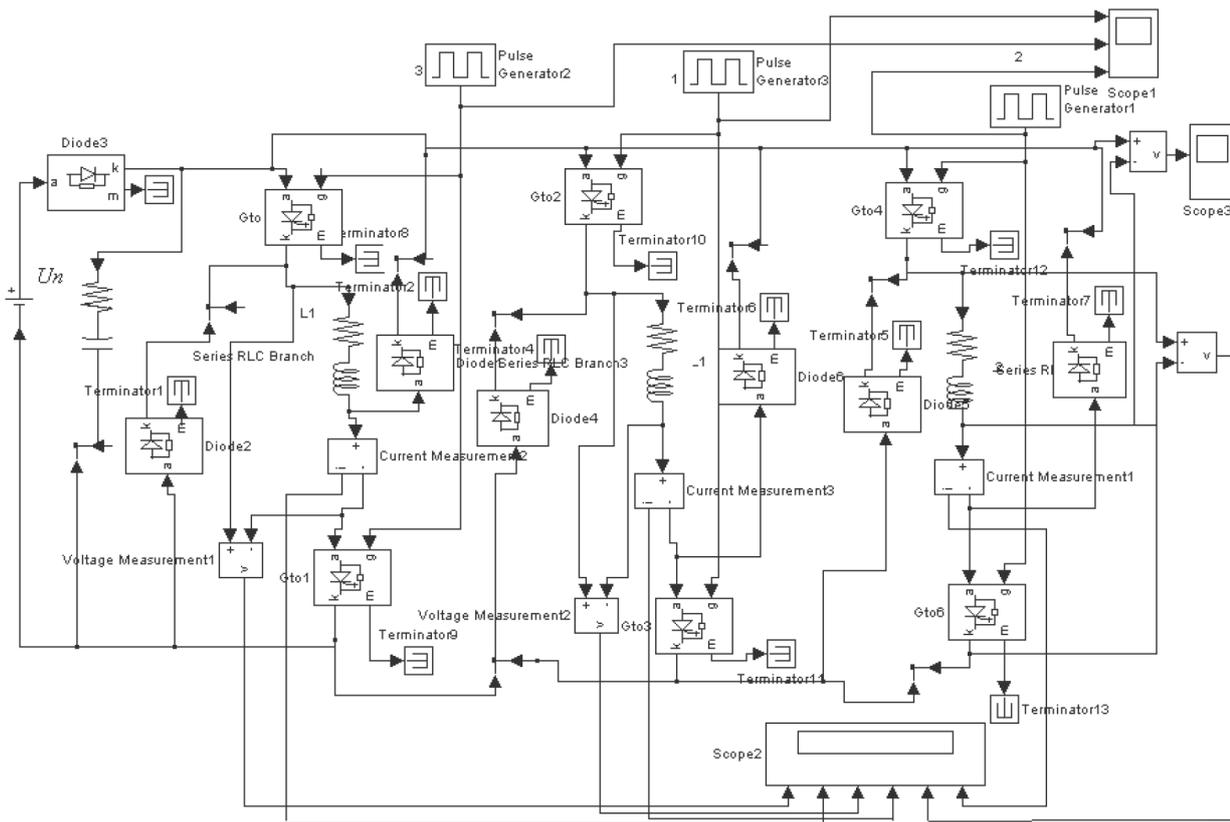


Рисунок 4. Структурная схема схемотехнической модели устройства форсирования трехфазной электрической машины



Рисунок 5. Кривые токов и напряжений модели: кривые напряжения на первой, второй и третьей обмотках (а, в, д), кривые токов в этих же обмотках (б, г, е) электрической машины

Анализ переходных процессов в модели двухобмоточного электромеханизма (рисунок 2) показал, что при увеличении индук-

тивности обмоток с 0,1 до 0,5 Гн и больше форма кривых тока в обмотках ухудшается, падение напряжения на обмотках возрастает,

появляется постоянная составляющая тока в обмотках (режим непрерывного тока), уменьшающая КПД устройства. Оптимальным периодом следования управляющих импульсов, выбранным для электромеханизма с индуктивностью обмоток 0,03 Гн, является  $T = 0,04$  с. Вторая схема форсирования (рисунки 1 и 4) не склонна к появлению постоянной составляющей, так как ускоряются (форсируются) и фронт и спад импульса тока (рисунок 5), поэтому возможен более широкий диапазон изменения параметров как самой электрической машины или электромеханизма, так и параметров (частоты и скважности) импульсов управления.

Благодаря этому более рационально для целей форсирования применять схему, представленную на рисунке 1, для любых многофазных нагрузок, например, электрических машин и электромеханизмов.

#### Вывод

Результаты схемотехнического моделирования позволяют получить следующие выводы.

#### Список литературы

1. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. М.: Издательство МЭИ, 2003. 70 с.
2. Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. М.: Энергоатомиздат, 1989. 157 с.
3. Попов А.П., Чугулев А.О. Форсированное переключение тока в индуктивных нагрузках с рекуперацией энергии магнитного поля // Омский научный вестник. 2010. № 2 (90). С. 145–147.
4. Нейман В.Ю. Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с предварительным аккумулярованием магнитной энергии в динамических режимах // Электротехника. 2003. № 2. С. 30-36.
5. Пат. 249489 СССР, Н 01 F 7/18. Устройство для форсирования переходных процессов / Р.П. Карташов, В.С. Федий, Б.Е. Пьяных. 1223691/24-7, Заявлено 01.03.1968; Оpubл. 05.08.1969. Бюл. 25.

1. Положения, высказанные в [7], были подтверждены путем схемотехнического моделирования.

2. Введение конденсаторов в схемах форсирования позволяет уменьшить перенапряжения на ключах при коммутации до допустимого уровня, в то же время уменьшение перенапряжения с помощью конденсатора снижает скорость изменения тока в обмотках, т.е. уменьшает эффект форсирования. Поэтому рекомендуется подбор емкости в соответствии с максимально допустимым напряжением ключевых элементов. Включение конденсаторов не только ограничивает перенапряжения в схеме при коммутации обмоток, но и улучшает электромагнитную совместимость устройства с окружающей аппаратурой за счет снижения величины  $du(t)/dt$  и уменьшения уровня радиопомех.

4. Устройство форсирования может использоваться для любой многофазной индуктивной нагрузки, в частности для многообмоточных электрических машин или электромеханизмов с четным количеством обмоток и поочередной коммутацией.

6. Сатаров Р.Р., Уразбахтина Н.Г., Стыскин А.В. Моделирование схемы форсирования переходных процессов в электромагнитных механизмах // Вестник УГАТУ. 2018. Т. 22. № 2 (80). С. 89–96.

7. Пат. 2654206 РФ, Н 03 К 17/04. Устройство для формирования переходных процессов в электромеханизмах (варианты) / Р.Р. Сатаров, Н.Г. Уразбахтина, А.В. Стыскин, А.М. Хизбуллин. 2017121934, Заявлено 21.06.2017; Оpubл. 17.05.2018. Бюл. 14.

8. Петров С. Однотактный прямоходовой мостовой конвертер: области применения и развитие схемотехники // Силовая электроника. 2009. № 5. С. 74–81.

#### References

1. Kuznetsov V.A., Kuzmichev V.A. Ventil'no-induktornye dvigateli [Valve-Inductor Motors]. Moscow, Izdatelstvo MEI Publ., 2003. 70 p. [in Russian].
2. Klimenko B.V. Forsirovannyye elektromagnitnyye sistemy [Forced Electromagnetic

Systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 157 p. [in Russian].

3. Popov A.P., Chugulev A.O. Forsirovanoe pereklyuchenie toka v induktivnykh nagruzkakh s rekuperatsiei energii magnitnogo polya [The Rapid Switching of Current in Inductive Loads with Energy Recovery of the Magnetic Field]. *Omskii nauchnyi vestnik — Omsk Scientific Bulletin*, 2010, No. 2 (90), pp. 145–147. [in Russian].

4. Neiman V.Yu. Analiz protsessov energopreobrazovaniya lineinykh elektromagnitnykh mashin s predvaritel'nym akkumulirovaniem magnitnoi energii v dinamicheskikh rezhimakh [Energy Conversion Processes Analysis in Linear Electromagnetic Motors with Preliminary Accumulation of Magnetic Energy in Dynamic Modes]. *Elektrotehnika — Russian Electrical Engineering*, 2003, No. 2, pp. 30–36. [in Russian].

5. Kartashov R.P., Fedii V.S., Pyanykh B.E. *Ustroistvo dlya forsirovaniya perekhodnykh protsessov* [Device for Forcing Transients]. Patent USSR, No. 249489, 1969. [in Russian].

6. Satarov R.R., Urazbakhtina N.G., Styskin A.V. Modelirovanie skhemy forsirovaniya perekhodnykh protsessov v elektromagnitnykh mekhanizмах [Modelling of the Scheme for Boosting Transients in Electromagnetic Devices]. *Vestnik UGATU — Vestnik USATU (Scientific Journal of Ufa State Aviation Technical University)*, 2018, Vol. 22, No. 2 (80), pp. 89–96. [in Russian].

7. Satarov R.R., Urazbakhtina N.G., Styskin A.V., Khizbullin A.M. *Ustroistvo dlya formirovaniya perekhodnykh protsessov v elektromekhanizмах (varianty)* [Device for the Formation of Transient Processes in the Electric Mechanisms (Options)]. Patent RF, No. 2654206, 2018. [in Russian].

8. Petrov S. Odnokontnyi pryamokhodovoi mostovoi konverter: oblasti primeneniya i razvitie skhemotekhniki [Single-Ended Forward Converter Bridge: the Scope and Development of Circuit Design]. *Silovaya elektronika — Power Electronics Magazine*, 2009, No. 5, pp. 74–81. [in Russian].



**Еникеева А. Р.**  
**Enikeeva A. R.**  
магистрант кафедры  
«Промышленная  
теплоэнергетика»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Шарипов Б. А.**  
**Sharipov B. A.**  
магистрант кафедры  
«Промышленная  
теплоэнергетика»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Федосеева Е. А.**  
**Fedoseeva E. A.**  
кандидат технических  
наук, доцент кафедры  
«Промышленная  
теплоэнергетика»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация

УДК 620.9

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-30-35

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПОКРЫТИЯ НАГРУЗКИ НА ПОДОГРЕВ РЕЗЕРВУАРОВ

На многих предприятиях Российской Федерации действует энергетический менеджмент. Поскольку энергетика является серьезным источником неблагоприятного воздействия на человека и окружающую среду, это влияние сказывается на атмосфере за счет высокого потребления кислорода, выбросов газа, твердых частиц и влаги. Сфера действия энергетического менеджмента направлена на повышение энергетической эффективности предприятия в целом, что отражает не только снижение потребления топливно-энергетических ресурсов, но также повышение экологической эффективности деятельности (снижение выбросов и т.д.).

В последние годы большое внимание уделяется интенсификации теплообмена при нагреве вязких нефтепродуктов. В данной статье рассматривается замена источника теплоты при подогреве нефтепродуктов в резервуаре.

Каждый день, согласно статистике, на поверхность земли поступает солнечная энергия по объемам, равным годовому расходу ископаемых видов топлива, потребляемых человеком. Данный вид энергии является практически неиссякаемым, а главное экологически безопасным. Ветровая энергия, также как и солнечная, является чистым видом энергии и не сопровождается выбросом вредных газов. Несмотря на низкий экономический потенциал использования энергии солнца и ветра технически их использование на территории страны более чем оправдано.

Основными предложенными вариантами источников для покрытия тепловой нагрузки на поддержание температуры топлива в резервуаре являлись вакуумные солнечные коллекторы, фотоэлектрические солнечные батареи, а также ветроэлектрические установки.

В результате было выявлено, что использование возобновляемых источников энергии может быть эффективно при условии возможности размещения оборудования на территории действующих предприятий.

**Ключевые слова:** нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, альтернативная энергетика, солнечная энергия, солнечная радиация, солнечный коллектор, ветровая энергия.

## NON-TRADITIONAL RENEWABLE ENERGY SOURCES USE FOR TANK HEATING

In many enterprises of the Russian Federation energy management operates. Its scope is aimed at improving the energy efficiency of the enterprise as a whole, which reflects not only a reduction in the consumption of fuel and energy resources, but also an increase in the environmental performance of the activity (reduction of emissions, etc.).

In recent years, much attention has been paid to the intensification of heat transfer when heating viscous petroleum products. This article discusses the replacement of the heat source during the heating of petroleum products in the tank.

Every day, according to statistics, solar energy enters the earth's surface in volumes equal to the annual consumption of fossil fuels consumed by humans. This type of energy is practically inexhaustible, and most importantly environmentally friendly. Wind energy as well as solar is a pure form of energy and is not accompanied by the emission of harmful gases. Despite the low economic potential of using solar and wind energy, their use in the country is technically more than justified.

The main proposed sources for covering the heat load to maintain the temperature of the fuel in the tank were vacuum solar collectors, photovoltaic solar panels, as well as wind power plants.

As a result, it was revealed that the use of renewable energy sources can be efficient provided that the equipment can be located on the territory of operating enterprises.

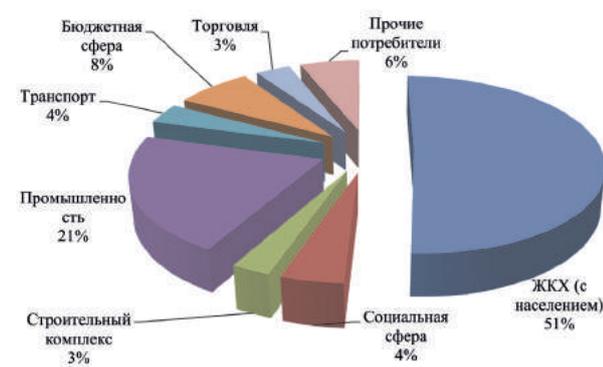
**Key words:** non-traditional and renewable energy sources, alternative energy, solar energy, solar radiation, solar collector, wind energy.

В последние годы большое внимание в Российской Федерации уделяется способам повышения энергетической эффективности. Под энергоэффективностью понимается не только снижение потребления топливно-энергетических ресурсов, но и повышение экологической эффективности компаний.

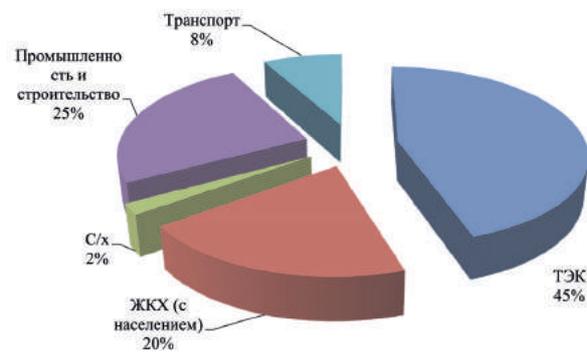
Использование традиционных источников энергии приводит к выбросам с дымовыми газами загрязняющих газов (оксиды углерода, азота, мазутная зола, диоксид азота и т.д.) в атмосферу. Таким образом, приоритет-

ной задачей многих предприятий становится снижение нагрузки на источники выработки тепловой и электрической энергии. Решением данной проблемы является внедрение альтернативных источников энергии.

Согласно приведенной статистике [1], основная доля потребления топлива в крупных городах приходится на жилищно-коммунальный сектор (рисунок 1, а), а в целом по РФ — на топливно-энергетический комплекс (рисунок 1, б).



а)



б)

Рисунок 1. Структура потребления топлива по отраслям в крупных городах (а) и по РФ (б)

Согласно данным Российского энергетического агентства, потенциал возобновляемых источников энергии (ВИЭ) (солнечной, ветровой, геотермальной и др. видов энергии) составляет порядка 4,6 млрд т у.т. На

рисунок 2 представлен экономический и технический потенциал ВИЭ в России [2].

Как видно из рисунка 2, несмотря на низкий экономический потенциал использования энергии солнца и ветра (наиболее



Рисунок 2. Потенциал ВИЭ в России

популярные ВИЭ в мире), технически их использование на территории страны более чем оправдано.

При выборе вида альтернативного источника энергии следует учитывать многие факторы, но одним из основных является расположение региона.

Например, солнечная энергетика имеет много достоинств, таких как неисчерпаемость и безопасность для окружающей среды. Однако, если посмотреть на карту уровня инсоляции на территории страны, видно, что эта величина достигает менее  $4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$  во многих регионах (рисунок 3). Это приводит к необходимости нахождения больших площадей для размещения солнечных коллекторов. При этом солнечные электростанции и солнечные системы теплоснабжения не функционируют ночью, а также слабо выполняют свою функцию утром и вечером, что вызывает необходимость установки аккумуляторов энергии. Все это при-

водит к повышению капитальных затрат и увеличению срока окупаемости.

Ветровая энергия, также как и солнечная, является чистым видом энергии и не сопровождается выбросом вредных газов. К основному достоинству энергии ветра можно отнести компактность. При этом по сравнению с поступлением солнечной радиации ветер является более непостоянным источником энергии (рисунок 4), что приводит к низкому выходу электроэнергии. К тому же в последние годы было доказано, что ветровые турбины оказывают сильное влияние на животный мир.

В связи с вышеперечисленным при рассмотрении вопросов внедрения возобновляемых источников энергии необходимо проводить полное технико-экономическое обоснование.

На европейской территории РФ основным топливом для источников теплоснабжения является природный газ. В отдаленных реги-



Рисунок 3. Уровни инсоляции регионов России [3]

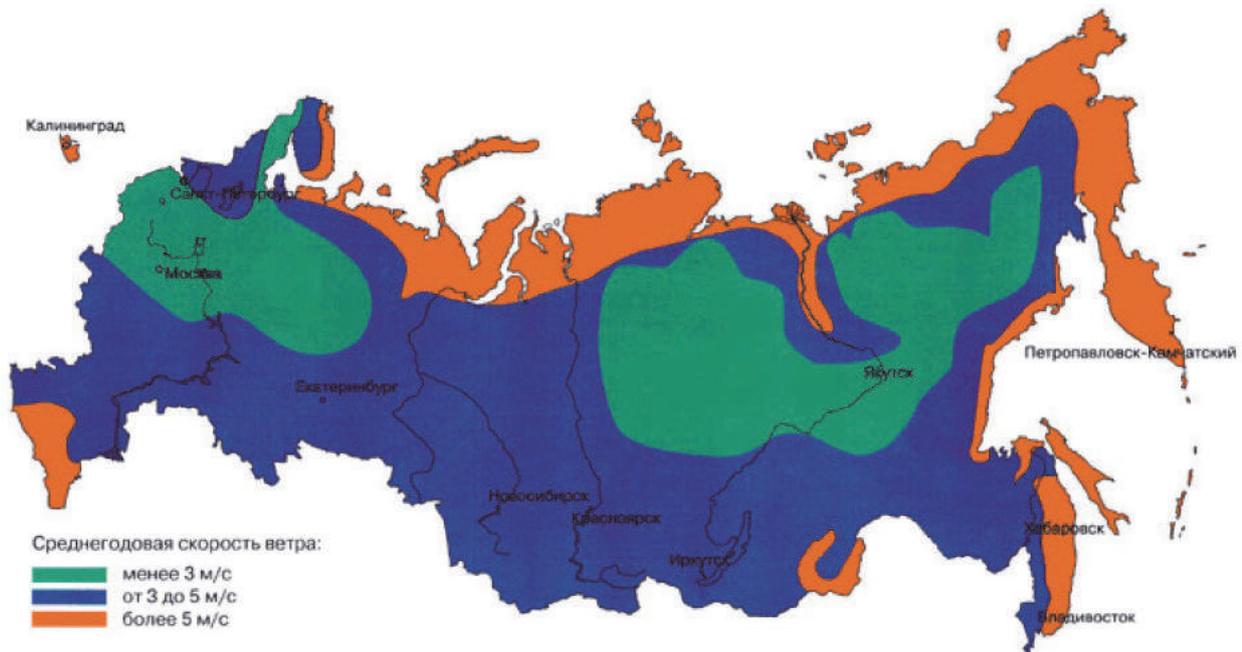


Рисунок 4. Карта ветров России [4]

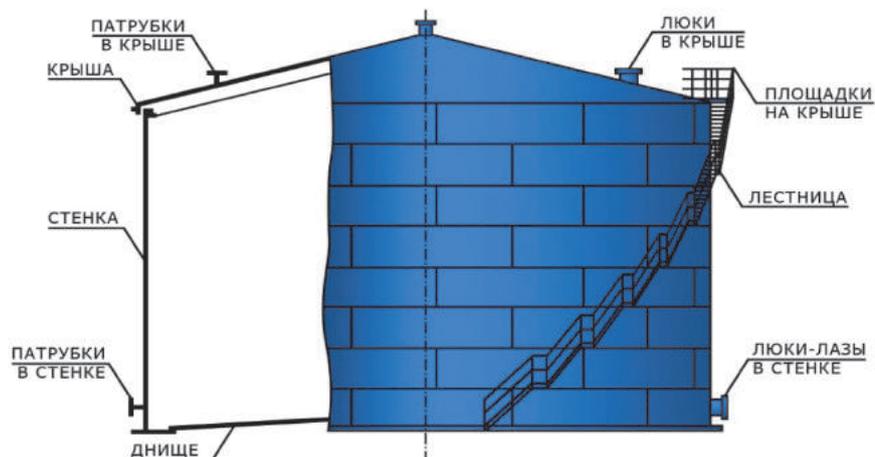
онах России зачастую применяют жидкое топливо (мазут, нефть, дизельное топливо и т.д.) в связи с отсутствием газификации регионов. При использовании жидкого топлива возникает необходимость его подогрева и поддержания определенной температуры при хранении.

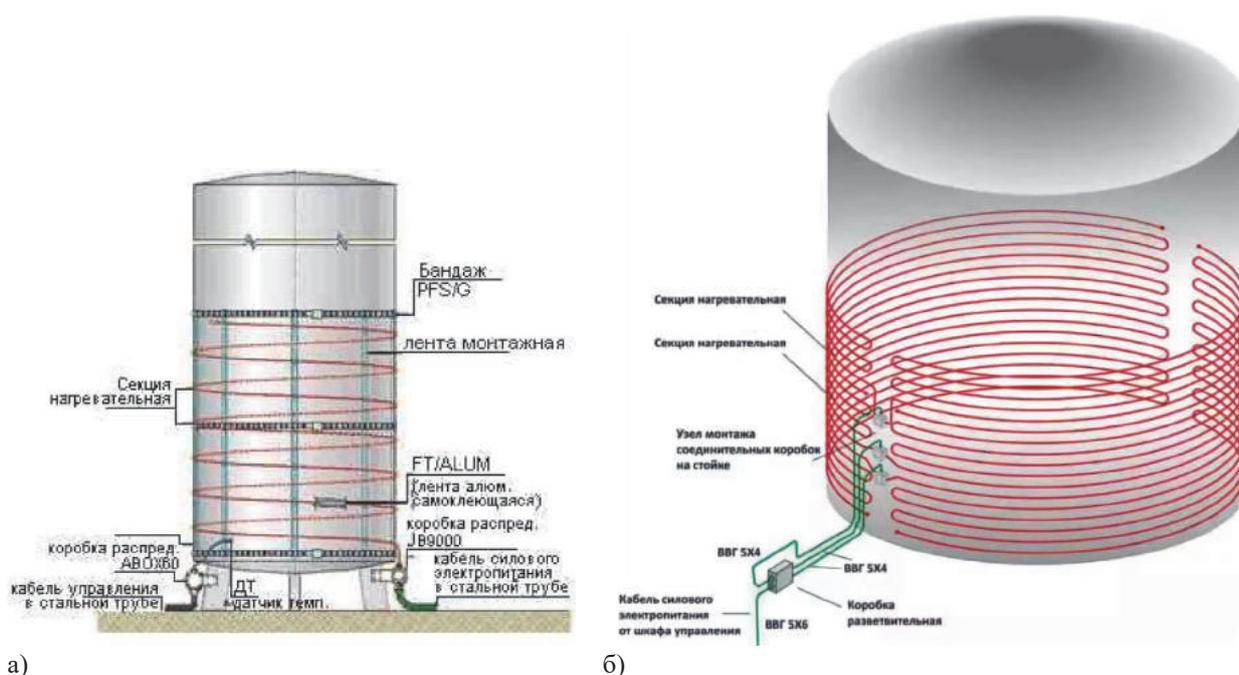
Для рассмотрения возможности использования нетрадиционных источников энергии для поддержания постоянной температуры топлива был рассмотрен резервуар  $V=5000 \text{ м}^3$ , расположенный на территории г. Уфа. Резервуар предназначен для хранения мазута. Температуру мазута поддерживают на уровне  $t=40\text{--}45 \text{ }^\circ\text{C}$ . На рисунке 5 приведена схема резервуара с указанием основных конструктивных характеристик [5]. Для снижения тепловых потерь резервуар утепляют мине-

ральной ватой толщиной 100 мм. Поддержание температуры топлива производится при помощи теплообменного аппарата, располагаемого внутри резервуара, или при помощи греющего кабеля.

В качестве источников для покрытия тепловой нагрузки на поддержание температуры топлива в резервуаре предлагается рассмотреть три варианта:

1. Использование вакуумных солнечных коллекторов для нагрева теплоносителя, поступающего в теплообменный аппарат резервуара;
2. Использование фотоэлектрических батарей для покрытия нагрузки электрического греющего кабеля (в первом случае учтена стоимость электрических панелей; во втором — стоимость солнечных панелей,

Рисунок 5. Конструкция резервуара ( $V=5000 \text{ м}^3$ ,  $D=22906 \text{ мм}$ ,  $H=11780 \text{ мм}$ )



а) **Рисунок 6.** Принципиальные схемы расположения теплообменного аппарата (а) [6] и греющего кабеля (б) [7] при обогреве резервуара

включая все прилежащее оборудование, необходимое для электростанции);

3. Использование ветрогенератора для покрытия нагрузки электрического греющего кабеля.

Согласно теории теплообмена, была рассчитана тепловая нагрузка, требуемая для подогрева мазута в резервуаре. Она составила  $Q=75$  кВт. Сравнение вариантов покрытия нагрузки на поддержание температуры мазута представлено в таблице 1.

**Таблица 1.** Сравнение вариантов применения ВИЭ

№ п/п	Наименование	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
1	Суммарные затраты, тыс. руб.	396	11266	5324
2	Затраты на первичную энергию, тыс. руб.	1247	1247	1247
3	Срок окупаемости, лет	0,3	9,1	4,3

Как видно из анализа таблицы 1, простой срок окупаемости при использовании вакуумных солнечных коллекторов составляет менее 1 года. Однако при решении внедрения солнечных систем нагрева теплоносителя необходимо решать вопрос размещения оборудования, что сделать на действующих предприятиях достаточно сложно.

### Список литературы

1. Отчет по маркетинговому исследованию на тему: Исследование рынка ресурсов — и энергосбережения города Москвы // Портал информационной поддержки малого и среднего производственного бизнеса. URL: [http://subcontract.ru/Docum/DocumShow\\_DocumID\\_1088.html](http://subcontract.ru/Docum/DocumShow_DocumID_1088.html) (дата обращения: 28.02.2019).

### Вывод

На основании проведенного исследования можно сделать заключение, что вопросы использования возобновляемых источников энергии лучше всего решать на стадии проектирования предприятий.

2. Потенциал возобновляемых источников энергии Workbook (xlsx). London, 2012. URL: Statistical Review of World Energy (дата обращения: 28.02.2019).

3. Солнечная инсоляция — справочные таблицы // Альтернативная энергия. URL: <https://alternativenergy.ru/solnechnaya-energetika/312-solnechnaya-insolyaciya.html> (дата обращения: 28.02.2019).

4. Карта ветров России // Развитие. URL: <http://verdit.ru/finansing/karta-vetrov-rossii.html> (дата обращения: 28.02.2019).

5. Резервуар РВС-5000. Резервуары вертикальные // Промснаб. URL: <http://promsupp.ru/rezervuar-rvs-5000/> (дата обращения: 28.02.2019).

6. Электрообогрев емкостей и резервуаров хранения // Элетен. URL: [http://www.eleten.com.ua/Jelektricheskij\\_obogrev\\_emkostej,\\_cistern\\_i\\_rezervuarov.html](http://www.eleten.com.ua/Jelektricheskij_obogrev_emkostej,_cistern_i_rezervuarov.html) (дата обращения: 28.02.2019).

7. Обогрев резервуаров // Альфа Проджект. URL: <http://www.obogrevay.ru/engineering/obogrev-rezervuarov> (дата обращения: 28.02.2019).

### References

1. Otchet po marketingovomu issledovaniyu na temu: Issledovanie rynka resursov — i energosberezheniya goroda Moskvy [Report on Marketing Research on the Topic: Research of the Market of Resources — and Energy Saving of the City of Moscow]. *Portal informatsionnoi podderzhki malogo i srednego proizvodstvennogo biznesa*. Available at: [http://subcontract.ru/Docum/DocumShow\\_DocumID\\_1088.html](http://subcontract.ru/Docum/DocumShow_DocumID_1088.html) (accessed 28.02.2019). [in Russian].

2. *Potentsial vozobnovlyayemykh istochnikov energii Workbook (xlsx)* [Potential Renewable Energy Workbook (xlsx)].

Potential Renewable Energy Workbook (xlsx). London, 2012. URL: *Statistical Review of World Energy* (accessed: 02.28.2019).

3. Solnechnaya insolyatsiya — spravочnye tablitsy [Solar Insolation-Reference Tables]. *Al'ternativnaya energiya*. Available at: <https://alternativenergy.ru/solnechnaya-energetika/312-solnechnaya-insolyaciya.html> (accessed 28.02.2019). [in Russian].

4. Karta vetrov Rossii [Wind Map of Russia]. *Razvitie*. Available at: <http://verdit.ru/finansing/karta-vetrov-rossii.html> (accessed 28.02.2019). [in Russian].

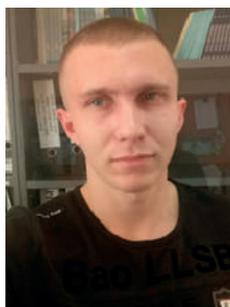
5. Rezervuar RVS-5000. Rezervuary vertikal'nye [Tank RVS-5000. Vertical Tanks]. *Promsnab*. Available at: <http://promsupp.ru/rezervuar-rvs-5000/> (accessed 28.02.2019). [in Russian].

6. Elektroobogrev emkoste i rezervuarov khraneniya [Electric Heating of Tanks and Storage Tanks]. *Eleten*. Available at: [http://www.eleten.com.ua/Jelektricheskij\\_obogrev\\_emkostej,\\_cistern\\_i\\_rezervuarov.html](http://www.eleten.com.ua/Jelektricheskij_obogrev_emkostej,_cistern_i_rezervuarov.html) (accessed 28.02.2019). [in Russian].

7. Obogrev rezervuarov [Tank Heating]. *Al'fa Prodzhekt*. Available at: <http://www.obogrevay.ru/engineering/obogrev-rezervuarov/> (accessed 28.02.2019). [in Russian].



**Кротенко Д. С.**  
**Krotenko D. S.**  
аспирант кафедры  
«Энергетические установки  
и электрооборудование  
судов», ФГБОУ  
ВО «Камчатский  
государственный  
технический университет»,  
г. Петропавловск-  
Камчатский,  
Российская Федерация



**Тимощук В. Н.**  
**Tymoschuk V. N.**  
студент кафедры  
«Энергетические установки  
и электрооборудование  
судов», ФГБОУ  
ВО «Камчатский  
государственный  
технический университет»,  
г. Петропавловск-  
Камчатский, Российская  
Федерация



**Белов О. А.**  
**Belov O. A.**  
кандидат технических наук,  
заведующий кафедрой  
«Энергетические установки  
и электрооборудование  
судов», ФГБОУ  
ВО «Камчатский  
государственный  
технический университет»,  
г. Петропавловск-  
Камчатский,  
Российская Федерация

УДК 621.311

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-36-40

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С РАЗЛИЧНЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Оптимальное управление нормальными режимами электростанции заключается в том, чтобы за рассматриваемый период времени обеспечить надежное электроснабжение потребителей электрической энергией требуемого качества при минимальных эксплуатационных затратах за рассматриваемый отрезок времени.

При разработке математического обеспечения предусматривается возможность использования двух критериев оптимальности режимов: минимума расхода условного топлива и минимума затрат на топливо. В качестве минимизируемой функции, или функции эффективности, используются издержки за интервал времени между двумя управляющими воздействиями.

Для оптимизации работы электростанций широко используются различные подходы и методы. К ним относятся такие, как принцип равного инкремента, Лагранжевы релаксации, квазиньютоновские методы, методы линейного программирования, методы рекурсивного квадратичного программирования, стохастическое динамическое программирование, генетический алгоритм, метод имитации отжига, метод роя частиц, оптимизация методом муравьиной колонии, нейронной сети, эволюционных стратегий и другие.

На практике такие методы оптимизации требуют создания модели электростанции. Однако точную модель реальной электростанции трудно создать, и по мере увеличения сложности алгоритмов, длительности времени вычислений эти методы оптимизации могут быстро стать трудными для применения.

Одним из путей оптимизации суммарной выходной мощности электростанции с различными генераторами, позволяющим упростить такие методы, является анализ характеристик соответствующей функции эффективности.

**Ключевые слова:** электроэнергия, электростанция, электрогенератор, выходная мощность, функция эффективности, оптимальная точка, коэффициент полезного действия, оптимизация режимов.

## MODELING OPTIMAL OPERATION MODES OF THE ELECTRIC POWER STATION WITH DIFFERENT GENERATORS

The optimal control of the normal modes of a power plant is to ensure reliable power supply of consumers with electrical energy of the required quality for the considered period of time with minimal operating costs for the considered period of time.

When developing the software, it is possible to use two criteria for optimality of the modes: minimum consumption of conditional fuel and minimum cost of fuel. As a minimized function, or efficiency function, costs are used for the time interval between two control actions.

To optimize the operation of power plants, various approaches and methods are widely used. These include the equal increment principle, Lagrange relaxation, quasi-Newtonian methods, linear programming methods, recursive quadratic programming methods, stochastic dynamic programming, genetic algorithm, annealing simulation method, particle digging method, optimization using the ant colony, neural network, evolutionary strategies other.

In practice, such optimization methods require the creation of a power plant model. However, the exact model of a real power plant is difficult to create, and as the complexity of the algorithms increases, the duration of the computation time increases, these optimization methods can quickly become difficult to apply.

One of the ways to optimize the total output power of a power plant with various generators, which makes it possible to simplify such difficulties, is to analyze the characteristics of the corresponding efficiency function.

**Key words:** electric power, power plant, electric generator, output power, efficiency function, optimal point, efficiency, optimization of modes.

Оптимизация режимов работы электростанции может осуществляться на различных временных и эксплуатационных уровнях. В качестве базового уровня рассмотрим оптимизацию текущего режима за интервал времени в пределах 1 ч. При оптимизации текущего режима предполагается, что параметры этого режима в течение рассматриваемого интервала времени остаются относительно постоянными [1].

В состав современных электростанций могут входить генераторы различных типов и мощностей. Наряду с единичной, автономной работой одного генератора, для обеспечения баланса мощностей возможны различные режимы работы электростанции с разными генераторами.

В этом случае выбор оптимального режима работы электростанции, в различных состояниях и для различного сочетания элементов установки является актуальной задачей. Для ее эффективного решения используем методы математического анализа и вычислительной математики [2, 3].

Генератор, чтобы подключаться к сети, должен разгоняться до частоты вращения  $n_0$ . На рисунке 1 представлена кривая эффек-

тивности обобщенного генератора электроэнергии.



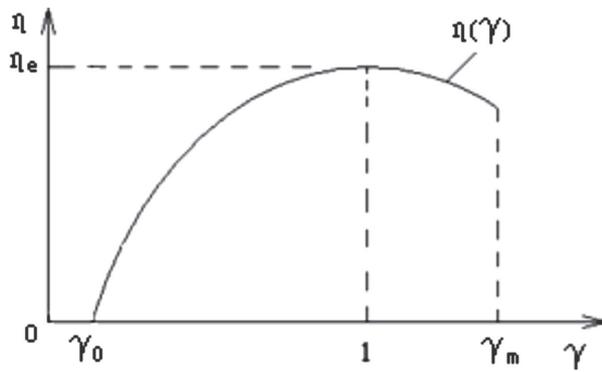
генератора;  $\eta$  — функция работоспособности генератора (КПД генератора);  $L_0$  — регулируемый фактор входного сигнала при нулевой нагрузке генератора;  $\eta_e$  — максимальный КПД;  $L_e$  — оптимальный фактор входного сигнала генератора;  $L_m$  — максимальное значение фактора входного сигнала генератора

**Рисунок 1.** Кривая эффективности обобщенного генератора электроэнергии

Определим скорость нагрузки  $\gamma$  как:

$$\gamma = \frac{L}{L_e}. \quad (1)$$

Определим также  $\eta_N(\gamma)$  как функцию эффективности нормализации [4]. Функция эффективности нормализации  $\eta_N(\gamma)$  имеет вид, представленный на рисунке 2.



$\gamma$  — тариф нагрузки и переменная;  
 $\eta_N(\gamma)$  — нормализованная эффективность

**Рисунок 2.** Функция эффективности нормализации  $\eta_N(\gamma)$

$$\eta_N(\gamma) = \eta(\gamma L_e). \quad (2)$$

Если функции эффективности нормализации двух генераторов одинаковы, то

$$\eta_{N1}(\gamma) = \eta_{N2}(\gamma). \quad (3)$$

Определяем эти генераторы как генераторы подобия эффективности.

Произведенная электроэнергия может быть выражена как:

$$\begin{aligned} W_t &= \sum_{i=1}^n W_i = \frac{W_0}{L_t} \sum_{i=1}^n L_i \eta_i(L_i) = \\ &= \frac{W_0}{L_t} \sum_{i=1}^n \gamma_i L_{ie} \eta_i(\gamma_i L_{ie}) = \\ &= \frac{W_0}{L_t} \sum_{i=1}^n \gamma_i L_{ie} \eta_N(\gamma_i); \\ \gamma_i &= \frac{L_i}{L_{ie}}; \\ \sum_{i=1}^n \gamma_i L_{ie} &= L_t; \\ \eta_0 &= \frac{1}{L_t} \sum_{i=1}^n \gamma_i L_{ie} \eta(\gamma_i L_{ie}) = \\ &= \frac{1}{L_t} \sum_{i=1}^n \gamma_i L_{ie} \eta_N(\gamma_i), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $n$  — общее число генераторов;

$W_0$  — входная идеальная энергия;

$W_t$  — общая энергия на выходе электростанции;

$W_i$  — выход электроэнергии из генератора;

$L_t$  — итоговая величина регулируемого входного коэффициента;

$\eta_0$  — общий КПД;

$\eta_i(L_i)$  — эффективность работы  $i$ -го генератора;

$\eta_N(\gamma_i)$  — эффективность нормализации  $i$ -го генератора;

$L_i$  — величина регулируемого входного коэффициента  $i$ -го генератора;

$L_{ie}$  — оптимальный вход  $i$ -го генератора;

$L_{i0}$  —  $L$  в нулевой нагрузке  $i$ -го генератора;

$\gamma_i$  — уровень нагрузки генератора.

$$L_t = \sum_{i=1}^n L_i > \sum_{i=1}^n L_{i0}. \quad (5)$$

Для оптимизации задачи  $W_t$  при фиксированном  $L_t$  максимизация общей выработки электроэнергии  $\max W_t$ :

$$\max W_t = W_0 \eta_N \left( \frac{L_t}{\sum_{i=1}^n L_{ie}} \right). \quad (6)$$

То есть, максимизация общего КПД  $\eta_0$  электростанции достигается при выполнении условия:

$$L_m \geq L_i > L_0. \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n L_i = L_t. \quad (8)$$

Максимальный общий КПД  $\max \eta_0$  получаем из уравнения:

$$\max \eta_0 = \eta_N \left( \frac{L_t}{\sum_{i=1}^n L_{ie}} \right). \quad (9)$$

При параллельной работе двух генераторов, когда  $n=2$ , условие ограничения может быть представлено в виде:

$$L_1 + L_2 = L_t; \quad (10)$$

$$\gamma_1 L_{1e} + \gamma_2 L_{2e} = L_t. \quad (11)$$

Целевая функция  $W_t$  выражается уравнением:

$$W_t = \frac{W_0}{L_t} (\gamma_1 L_{1e} \eta_N(\gamma_1) + \gamma_2 L_{2e} \eta_N(\gamma_2)). \quad (12)$$

Оптимальное состояние приведено для

$$W'_t(\gamma_i) = 0. \quad (13)$$

Из этого следует, что

$$W'_t = L_{1e} \eta'_N(\gamma_1) + \gamma_1 L_{1e} \eta''_N(\gamma_1) - L_{1e} \eta'_N(\gamma_2). \quad (14)$$

Для сложной технической системы это один из эксплуатационных показателей [5].

Легко проверить, что

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \frac{L_t}{\sum_{i=1}^2 L_{ie}} \quad (15)$$

является оптимальной точкой. Проверяя вторую производную, видим:

$$W''_t < 0. \quad (16)$$

Поэтому оптимальная точка — это только максимум, и максимальное значение общей электрической энергии на выходе электростанции:

$$\max W_t = W_0 \eta_N \left( \frac{L_t}{\sum_{i=1}^2 L_{ie}} \right). \quad (17)$$

Максимальное значение общего КПД  $\eta_0$  электростанции:

$$\max \eta_0 = \eta_N \left( \frac{L_t}{\sum_{i=1}^2 L_{ie}} \right). \quad (18)$$

Далее можно предположить, что это справедливо для  $n=k$ . Вышеприведенный вывод легко распространяется на случай  $n=k$ , и тогда оптимальная точка будет:

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_k = \frac{L_t}{\sum_{i=1}^k L_{ie}}. \quad (19)$$

Тогда этот случай задается  $n = k + 1$ . Для суммарной выработки электроэнергии получим:

$$W_t = \frac{W_0}{L_t} \left( \sum_{i=1}^k \gamma_i L_{ie} \eta_N(\gamma_i) + \gamma_{k+1} L_{(k+1)e} \eta_N(\gamma_{k+1}) \right), \quad (20)$$

и максимум первого пункта:

$$\max \frac{W_0}{L_t} \sum_{i=1}^k \gamma_i L_{ie} \eta_N(\gamma_i) = \frac{W_0}{L_t} \left( L_t - \gamma_{k+1} L_{(k+1)e} \eta_N \left( \frac{L_t - \gamma_{k+1} L_{(k+1)e}}{\sum_{i=1}^k L_{ie}} \right) \right), \quad (21)$$

где  $\gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_k$ .

Выражение для  $W_t$  становится:

$$W_t = \frac{W_0}{L_t} \left( (L_t - \gamma_{k+1} L_{(k+1)e}) \eta_N \left( \frac{L_t - \gamma_{k+1} L_{(k+1)e}}{\sum_{i=1}^k L_{ie}} \right) + \gamma_{k+1} L_{(k+1)e} \eta_N(\gamma_{k+1}) \right). \quad (22)$$

Оптимальное состояние приведено для:

$$W_t'(\gamma_{k+1}) = 0. \quad (23)$$

Тогда получим:

$$-L_{(k+1)e} \eta_N \left( \frac{L_t - \gamma_{k+1} L_{(k+1)e}}{\sum_{i=1}^k L_{ie}} \right) - (L_t - \gamma_{k+1} L_{(k+1)e}) \eta_N' \left( \frac{L_t - \gamma_{k+1} L_{(k+1)e}}{\sum_{i=1}^k L_{ie}} \right) \frac{L_{(k+1)e}}{\sum_{i=1}^k L_{ie}} + L_{(k+1)e} \eta_N(\gamma_{k+1}) + \gamma_{k+1} L_{(k+1)e} \eta_N'(\gamma_{k+1}) = 0. \quad (24)$$

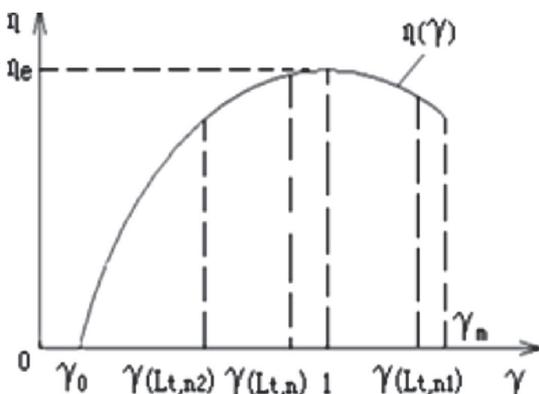


Рисунок 3. Функция эффективности нормализации при  $\gamma(L_t, n) < 1$

Затем легко проверить, что

$$\gamma_{k+1} = \frac{L_t - \gamma_{k+1} L_{(k+1)e}}{\sum_{i=1}^k L_{ie}} \quad (25)$$

оптимальная точка.

То есть,

$$\gamma_{k+1} = \frac{L_t}{\sum_{i=1}^{k+1} L_{ie}}; \quad (26)$$

$$\gamma_1 \sum_{i=1}^k L_{ie} = L_t - \gamma_{k+1} L_{(k+1)e}; \quad (27)$$

$$\gamma_1 = \frac{L_t - \gamma_{k+1} L_{(k+1)e}}{\sum_{i=1}^k L_{ie}}. \quad (28)$$

Поэтому оптимальная точка всегда

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_k = \gamma_{k+1} = \frac{L_t}{\sum_{i=1}^{k+1} L_{ie}} \quad (29)$$

и максимальное значение общей электроэнергии на выходе

$$\max W_t = W_0 \eta_N \left( \frac{L_t}{\sum_{i=1}^{k+1} L_{ie}} \right). \quad (30)$$

Максимальное значение общего КПД  $\eta_0$  станции в этом случае определяется выражением:

$$\max \eta_0 = \eta_N \left( \frac{L_t}{\sum_{i=1}^{k+1} L_{ie}} \right). \quad (31)$$

Определяем  $\gamma(L_t, n)$  как

$$\gamma(L_t, n) = \frac{L_t}{\sum_{i=1}^{k+1} L_{ie}}. \quad (32)$$

Предположим, что на электростанции имеется в общей сложности  $m$  единиц генераторов. Если  $n$  является оптимальным, то характеристика, представленная на рисунке 4, является более предпочтительной, чем характеристика на рисунке 3.

Если общее значение регулируемого коэффициента выработки энергии  $L_t$  изменяется, оптимальный  $n$  также может измениться.

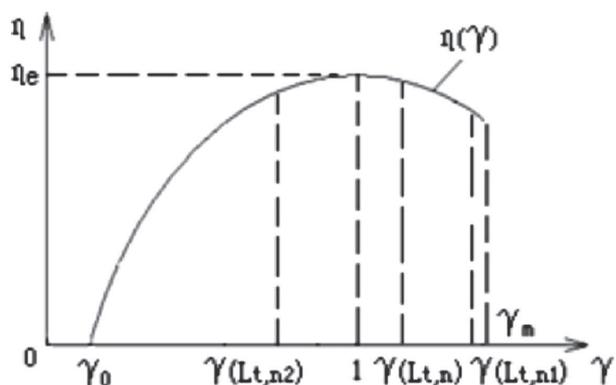


Рисунок 4. Функция эффективности нормализации при  $\gamma(L_t, n) > 1$

Оптимальное соотношение точки переключения зависит от того, увеличивается или уменьшается  $L_t$ .

Оптимальная точка переключения при  $\eta_N(L_t, n) = \eta_N(L_t, n1)$ , если  $L_t$  увеличивается.

#### Вывод

Таким образом, оптимальный метод управления и переключения в данной работе, главным образом, основан на характеристиках функции эффективности, которую можно приблизительно считать вогнутой, неотрицательной. То есть оптимальный метод управ-

ления заключается в поддержании одинаковой скорости ввода для каждого генератора, а оптимальные точки переключения должны быть размещены в тех же точках эффективности нормализации различных режимов работы.

Этот оптимальный метод имеет высокую универсальность, включая линейную и нелинейную системы, отсутствие необходимости в разработке математической модели всей системы.

#### Список литературы

1. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
2. Белов О.А., Марченко А.А., Труднев С.Ю. Анализ расчетно-аналитических методов прикладных задач технической безопасности // Вестник Астраханского государственного университета. Серия: Морская техника и технология. 2015. № 4. С. 7–15.
3. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. СПб.: Издательство «Лань», 2009. 608 с.
4. Белов О.А., Парфенкин А.И. Системная интеграция контроля электрооборудования // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 1. С. 14–17.
5. Белов О.А., Парфенкин А.И. Обзор основных факторов снижения безопасности сложных технических систем // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2016. № 35. С. 11–14. DOI: 10.17217/2079-0333-2016-35-11-14.

#### References

1. Idelchik V.I. Elektricheskie sistemy i seti [Electrical Systems and Networks]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 592 p. [in Russian].
2. Belov O.A., Marchenko A.A., Trudnev S.Yu. Analiz raschetno-analiticheskikh

metodov prikladnykh zadach tekhnicheskoi bezopasnosti [Analysis of Computational and Analytical Methods of Applied Tasks of Technical Security]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya — Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*, 2015, No. 4, pp. 7-15. [in Russian].

3. Marchuk G.I. Metody vychislitel'noi matematiki [Methods of Computational Mathematics]. Saint-Petersburg, Izdatel'stvo «Lan» Publ., 2009. 608 p. [in Russian].

4. Belov O.A., Parfenkin A.I. Sistemnaya integratsiya kontrolya elektrooborudovaniya [System Integration of Electrical Equipment Monitoring]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2014, Vol. 10, No. 1, pp. 14-17. [in Russian].

5. Belov O.A., Parfenkin A.I. Obzor osnovnykh faktorov snizheniya bezopasnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Review of Main Security Reduction Factors in Complex Engineering Systems]. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Bulletin of Kamchatka State Technical University*, 2016, No. 35, pp. 11-14. DOI: 10.17217/2079-0333-2016-35-11-14 [in Russian].



**Хазиева Р. Т.**  
**Khazieva R. T.**

*старший преподаватель кафедры  
«Электротехника и электрооборудование  
предприятий», ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной технический  
университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*



**Купцов Д. В.**  
**Kuptsov D. V.**

*студент кафедры «Электротехника и  
электрооборудование предприятий»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 621.3, 621.365

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-41-44

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПАТЕНТОВАНИЯ УСТРОЙСТВ ЗАРЯДА ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ

Проведен анализ динамики патентования систем и устройств заряда емкостных накопителей по материалам международных патентных баз и патентных баз России. Определены ведущие страны в области разработки и патентования систем и устройств заряда емкостных накопителей на основе индуктивно-емкостных преобразователей.

Отмечается актуальность разработки систем заряда емкостных накопителей на основе индуктивно-емкостных преобразователей для электротехнических и электротехнологических комплексов и систем, показан интерес специалистов в области импульсной и преобразовательной техники в разработке систем и устройств заряда емкостных накопителей.

Патентные исследования показывают, что наиболее распространенными и перспективными устройствами заряда емкостных накопителей являются устройства с индуктивно-емкостным преобразователем. В данной статье рассматриваются устройства заряда емкостных накопителей, в которых заряд емкостного накопителя (конденсатора) осуществляется от источника тока, а напряжение нарастает во времени по линейному закону. Использование индуктивно-емкостных преобразователей в системах заряда емкостных накопителей позволяет получить высокие энергетические параметры.

Авторами приведена классификация устройств заряда емкостных накопителей по различным критериям. Наиболее распространенная группа — это однофазные системы заряда емкостных накопителей.

Показан активный рост патентования систем и устройств заряда емкостных накопителей для создания электротехнических и электротехнологических комплексов и систем на их базе за последние 35 лет. Произведен анализ публикации патентов с использованием математического пакета MathCad 15, показывающий перспективность развития систем и устройств заряда емкостных накопителей на основе индуктивно-емкостных преобразователей, выполненных на гибридных электромагнитных элементах.

**Ключевые слова:** емкостной накопитель, система заряда, зарядное устройство, накопительный конденсатор, резонансный контур, индуктивно-емкостный преобразователь, гибридный электромагнитный элемент, динамика патентования, спектрально-корреляционная характеристика, патентные исследования.

## ANALYSIS OF PATENTING OF INDUCTIVE-CAPACITIVE TRANSDUCERS FOR CURRENT STABILIZATION SYSTEMS

The analysis of the dynamics of patenting systems and devices for charging capacitive drives based on the materials of the international patent bases and patent bases of Russia has been carried out. Identified leading countries in the development and patenting of systems and devices for charging capacitive drives based on inductive-capacitive converters.

The relevance of the development of charge systems for capacitive storage based on inductive-capacitive converters for electrical and electrotechnological complexes and systems is noted, the interest of experts in the fields of pulse and converter technology in the development of systems and devices for charging capacitive accumulators is shown.

Patent research shows that the most common and promising devices for charging capacitive accumulators are devices with an inductive-capacitive converter. This article discusses devices for charging capacitive storage, in which the charge of a capacitive storage (capacitor) is from a current source, and the voltage increases in time according to a linear law. The use of inductive-capacitive converters in charge systems of capacitive storage allows to obtain high energy parameters.

The authors provide a classification of the device for charging capacitive drives according to various criteria. The most common group is the single-phase charge system of capacitive storage.

The active growth of patenting of systems and devices for charging capacitive drives for creating electrical and electrical systems and systems based on them for the last 35 years is shown. An analysis of the publication of patents using the mathematical package MathCad 15, showing the prospects for the development of systems and devices for charging capacitive drives based on inductive-capacitive converters made on hybrid electromagnetic elements, has been carried out.

**Key words:** capacitive storage, charging system, charger device, storage capacitor, resonant circuit, inductive-capacitive converter, hybrid electromagnetic element, patent dynamics, spectral-correlation characteristic, patent research.

Устройства для заряда емкостных накопителей (УЗЕН) в полной мере используются в импульсной энергетике. Главной особенностью импульсной энергетике является то, что в ней используется технология медленного заряда накопителей емкостной энергии в последствии с их быстрым разрядом на нагрузку. Для максимального значения КПД зарядных устройств необходимо, чтобы ток, подаваемый на них, всегда был постоянным [1].

Выполненный обзор областей применения устройств заряда емкостных накопителей в научно-технической сфере в качестве источников питания электротехнологических комплексов, обеспечивающих импульсные режимы передачи энергии в нагрузку, показывает, насколько необходимы такие устройства в современном мире.

Перед авторами стояла задача проведения патентных исследований систем и устройств заряда емкостных накопителей, в технических решениях которых присутствуют индуктивно-емкостные преобразователи (ИЕП), в

основе которых лежат гибридные и дискретные электромагнитные элементы (ЭМЭ), поскольку данные системы представляют интерес с точки зрения улучшения энергетических и массогабаритных показателей, эксплуатационной надежности [2].

Авторами проведено патентное исследование по базам США, Канады, Китая, Российской Федерации и десяткам других стран. Глубина патентного поиска составляла 35 лет. Во время работы было изучено более 10000 патентов и заявок на патентирование. В ходе работы были найдены 70 патентов, которые могут стать основой для будущих изобретений.

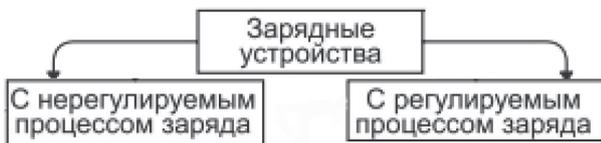
Предприятия и фирмы (50 %) чаще патентуют устройства в данной области, вдвое и в четыре раза меньше патентуют устройства заряда емкостных накопителей предприятия и фирмы (25 %) и частные лица (25%) соответственно.

При проведении патентных исследований авторы определили следующие классифика-

ционные признаки для систем заряда емкостных накопителей:

- по типу используемых электромагнитных элементов;
- по количеству фаз;
- по выполняемым функциям.

На рисунке 1 приведена классификация систем заряда емкостных накопителей по выполняемым функциям. Одна из популярных групп (около 50 %) — это зарядные устройства с регулируемым процессом заряда. Ко второй группе относятся зарядные устройства с нерегулируемым процессом заряда. Наиболее распространенный метод заряда емкостных накопителей — это метод, в котором в качестве источников тока используется ИЕП.



**Рисунок 1.** Классификация систем заряда емкостных накопителей по выполняемым функциям

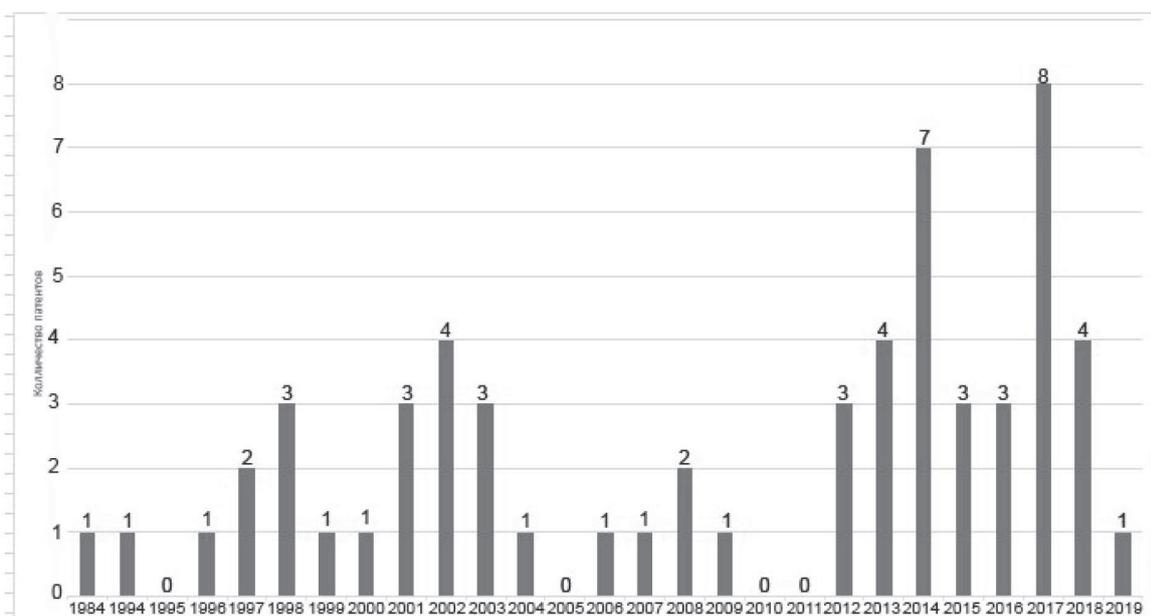
После исследования патентования систем заряда емкостных накопителей по количеству фаз было определено, что преимущественно объектом для патентования являются однофазные системы (порядка 43 %) и многофазные (около 49 %). Большой частью многофаз-

ных являются — трехфазные системы заряда емкостных накопителей (46 %).

Наряду с широко известными достоинствами систем заряда емкостных накопителей, в конструкции которых применяются дискретные ЭМЭ, так же присутствует и ряд недостатков, которые устраняются при использовании гибридных ЭМЭ на замену дискретным. Согласно этому, устройства заряда емкостных накопителей можно разделить на две группы по виду ЭМЭ, которые в них используются:

- гибридные ЭМЭ (≈ 8 %);
- дискретные ЭМЭ (92 %) [3].

Исследуя базы патентов, зарегистрированных на территории Российской Федерации, было выяснено, что количество заявок на патент систем заряда емкостных накопителей существенно не изменилось по сравнению с прошлым десятилетием. Однако было выяснено, что в большую сторону увеличился спектр использования УЗЕН на основе ИЕП. Исходя из результатов патентного обзора можно судить о потребности рынка в устройствах заряда емкостных накопителей на базе ИЕП, а также в технологиях, связанных с этой сферой. Для полного анализа заявок на патентирование использовались данные, поданные в таких странах, как Китай, США, Российская Федерация и так далее (рисунок 2).



**Рисунок 2.** Распределение числа полученных патентов за период 1984–2019 гг.

После исследования колебаний количества заявок на патентирование на промежуток в 420 месяцев (1984–2019 гг.) было выяснено, что разработка ИЕП на основе гибридных ЭМЭ является очень актуальным и перспективным направлением.

### Вывод

Об актуальности данной темы можно судить по многочисленным научным трудам ученых из разных стран, которые занимаются разработкой зарядных устройств накопительных конденсаторов. Большое количество новых схемотехнических решений устройств заряда емкостных накопителей в России и США свидетельствует об интересе этих стран к подобным разработкам. Заявителями по данной теме в большинстве

случаев выступают фирмы и предприятия (50 %).

Исследование динамики патентирования показывает, что наиболее актуальными и перспективными способами заряда емкостных накопителей являются устройства на основе ИЕП. Рассмотрена классификация систем заряда емкостных накопителей по различным критериям. Самая популярная группа (около 50 %) — это однофазные системы заряда емкостных накопителей.

По графику подачи заявок на патентирование устройств заряда емкостных накопителей на базе гибридных ЭМЭ, выполняющих функцию ИЕП, видно, что эта сфера представляет большой научный интерес.

### Список литературы

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
2. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Хлюпин П.А. Компьютерная модель системы заряда емкостного накопителя на основе индуктивно-емкостного преобразователя // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. № 4. С. 374-390. URL: [http://ogbus.ru/issues/4\\_2015/ogbus\\_4\\_2015\\_p374-390\\_KonesevSG\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/4_2015/ogbus_4_2015_p374-390_KonesevSG_ru.pdf) (дата обращения: 06.06.2019). DOI: 10.17122/ogbus-2015-4-374-390.
3. Чернова К.В. Развитие и перспективы применения магнитного воздействия на скважинную продукцию в нефтедобыче. Уфа: «Монография», 2005. 106 с.

### References

1. Mesyats G.A. Impul'snaya energetika i elektronika [Pulsed Power Engineering and

Electronics]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 704 p. [in Russian].

2. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Khlyupin P.A. Komp'yuternaya model' sistemy zaryada emkostnogo nakopitelya na osnove induktivno-emkostnogo preobrazovatelya [Computer Model of the Capacitive Storage Charge System Based on Inductive-Capacitive Transducers]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2015, No. 4, pp. 374-390. URL: [http://ogbus.ru/issues/4\\_2015/ogbus\\_4\\_2015\\_p374-390\\_KonesevSG\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/4_2015/ogbus_4_2015_p374-390_KonesevSG_ru.pdf) (accessed 06.06.2019). DOI: 10.17122/ogbus-2015-4-374-390 [in Russian].

3. Chernova K.V. *Razvitie i perspektivy primeneniya magnitnogo vozdeistviya na skvazhinnuyu produktsiyu v neftedobyche* [Development and Prospects of Application of Magnetic Influence on Borehole Production in Oil Production]. Ufa, «Monografiya» Publ., 2005. 106 p. [in Russian].



*Латыпов И. С.*

*Latypov I. S.*

*соискатель кафедры «Электроэнергетика»,  
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»,  
ООО «Тюменский нефтяной научный центр»,  
г. Тюмень Российская Федерация*

УДК 621.592.00

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-45-52

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕИЗОЛИРОВАННЫХ ПРОВОДОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ В ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА**

Основную долю воздушных линий электропередачи Российской Федерации составляют линии среднего класса напряжения 6–35 кВ, в частности, велика их протяженность в системах электроснабжения потребителей нефтегазовой отрасли. Длины воздушных линий 6–35 кВ до потребителей в данных системах могут составлять несколько десятков километров в виду отдаленности электроприемников от энергоцентра.

Нагрев проводов в процессе передачи, в том числе их перегрев за счет превышения токовой нагрузки, приводит к тепловым потерям электроэнергии при передаче, которые необходимо учитывать при разработке и эксплуатации систем электроснабжения нефтегазовых потребителей, так как систематические токовые перегрузки элементов воздушной линии могут привести к выходу из строя дорогостоящего оборудования.

В процессе эксплуатации воздушных линий электропередачи класса напряжения 6–35 кВ возникают аварийные ситуации, связанные с нарушением электроснабжения ответственных потребителей. Причиной таких аварийных ситуаций могут являться: воздействия окружающей среды, нарушения требований эксплуатации, дефекты монтажа и конструкций воздушной линии электропередачи, посторонние воздействия. Наиболее тяжелыми являются нарушения, связанные с воздействием окружающей среды (ветер и гололед), так как время ликвидации таких аварий может составлять несколько суток из-за большой протяженности воздушных линий электропередачи и труднодоступности места аварии.

Для решения указанных выше проблем в статье рассмотрены вопросы снижения температуры нагрева при передаче электрического тока и увеличения механической прочности проводов, применяемых в распределительных сетях класса напряжения 6–35 кВ системы электроснабжения потребителей нефтегазовой отрасли. Предложена и исследована энергоэффективная форма витого неизолированного провода линии электропередачи. Выполнено моделирование тепловых и механических процессов в программной системе конечно-элементного анализа (МКЭ).

**Ключевые слова:** неизолированный провод, моделирование, энергоэффективная форма провода, коэффициент гладкости, коэффициент заполнения, система конечно-элементного анализа.

## MODELING AND RESEARCH OF UNINSULATED WIRE FOR ELECTRICAL COMPLEXES OF CONSUMERS IN THE OIL AND GAS INDUSTRY IN A FINITE ELEMENT ANALYSIS SOFTWARE SYSTEM

The main share of overhead power transmission lines of the Russian Federation is made up of medium-voltage lines of 6–35 kV, in particular, their length in power supply systems of consumers in the oil and gas industry is large. The lengths of overhead lines 6–35 kV to consumers in these systems can be several tens of kilometers in view of the remoteness of power receivers from the energy center.

Heating of wires during transmission, including overheating due to exceeding the current load, leads to thermal losses of electricity during transmission, which must be taken into account when developing and operating power supply systems for oil and gas consumers, since systematic current overloads of overhead line elements can lead to exit building expensive equipment.

In the process of operating overhead power lines of a voltage class of 6–35 kV, emergency situations arise related to a violation of the power supply of responsible consumers. The cause of such emergencies can be: environmental influences, violations of operating requirements, installation defects and overhead power line structures, extraneous influences. The most severe are violations associated with environmental influences (wind and ice), since the time to eliminate such accidents can be several days due to the long length of overhead power lines and the inaccessibility of the accident site.

To solve the above problems, the article addresses the issue of lowering the heating temperature during electric current transmission and increasing mechanical strength, wires used in distribution networks of voltage class 6–35 kV of the power supply system for consumers of the oil and gas industry. An energy-efficient form of twisted uninsulated wire of a power line is proposed and investigated. The simulation of thermal and mechanical processes in the software system of finite element analysis (FEM) is performed.

**Key words:** uninsulated wire, simulation, power-efficient configuration of wire, coefficient of filling of full section, coefficient of a wire with material, finite element analysis.

Распределительные сети системы электроснабжения потребителей нефтегазовой отрасли относятся к классу напряжения 6–35 кВ и представлены преимущественно неизолированными проводами электропередачи [1]. Применение неизолированных проводов связано, прежде всего, с ориентированностью нефтегазового сектора на оборудование и материалы, которые зарекомендовали свое применение в данной отрасли, а также наличием большой базы продукции на рынке [2].

В настоящее время в распределительные сети класса напряжения 6–35 кВ системы электроснабжения потребителей нефтегазовой отрасли широко внедряются самонесущие изолированные провода (СИП) [3].

К основным преимуществам применения СИП в сравнении с неизолированными проводами, относят [4]:

- резкое снижение (до 80 %) эксплуатационных затрат, вызванное высокой надежностью и бесперебойностью энергообеспече-

ния потребителей, т.к. исключены короткие замыкания из-за схлестывания при вибрационной пляске проводов, обрывы из-за падения деревьев, гололедообразования и снегоналипания;

- снижение реактивного сопротивления изолированных проводов по сравнению с неизолированными;

- простота монтажных работ, возможность подключения новых потребителей электроэнергии под напряжением, без отключения остальных от энергоснабжения и, как следствие, сокращение сроков ремонта и монтажа.

К недостаткам применения СИП относятся:

- высокая цена на продукцию — разница в цене между неизолированным проводом и СИП достигает порядка 20 % в зависимости от номинального сечения, поэтому не всегда экономически обосновано применение изолированных проводов;

— большое значение активного сопротивления СИП в сравнении с неизолированным проводом равного номинального сечения. Связан данный недостаток с ограничением теплообмена с поверхности провода при передаче электрического тока за счет наличия изоляции провода;

— меньшее разрывное усилие проводов СИП в сравнении с применяемыми витыми неизолированными проводами в распределительной сети класса напряжения 6–35 кВ системы электроснабжения потребителей нефтегазовой отрасли — наибольшую применимость получили провода типа АС [5] с несущей (стальной) и токопроводящей (алюминиевой) частями.

Для увеличения механической прочности линии электропередачи применяют неизолированные провода высокой прочности типа АСВП, АААС, АССС, Аеро-Z и др. [6–8]. При передаче электроэнергии с использованием данных проводов не учитываются (или учитываются лишь косвенно) вопросы, связанные со снижением потерь электроэнергии в проводниках и повышением энергоэффективности распределительных сетей 6–35 кВ нефтегазовой отрасли.

Таким образом, поиск технического решения, позволяющего совместить преимущества выпускаемых в нашей стране неизолированных и самонесущих изолированных проводов, является актуальной научно-технической задачей.

В данной работе авторами предлагается энергоэффективный неизолированный провод с увеличенной механической прочностью (в сравнении с проводами типа АС и СИП) для распределительных сетей класса напряжения 6–35 кВ, применение которых возможно в энергосистемах потребителей нефтегазовой отрасли [9, 10].

Рассмотрим основные результаты исследования.

В работе [11] были представлены результаты моделирования нагрева провода, а также распределения векторов теплового потока в зависимости от формы поперечного проводника (рассматривался цельный провод). По аналогии выполнено моделирование нагрева проводов, представленных на рисунке 1. Результаты моделирования сопоставлены с аналитическими расчетами, выполненными по формулам, представленными в работах [9, 12], и отражены в таблицах 1, 2.



а) самонесущий изолированный провод (СИП); б) неизолированный сталеалюминевый провод (АС); в) неизолированный энергоэффективный провод

**Рисунок 1.** Провода ВЛ 6–35 кВ

**Таблица 1.** Сравнение аналитических расчетов с результатами моделирования (исходные данные)

Вариант	Исходные данные						
	Номинальное сечение сердечника, мм <sup>2</sup>	Номинальное сечение алюминиевой части, мм <sup>2</sup>	Периметр в сечении, мм	Коэффициенты		Электрический ток, А	Ном. напряжение сети, кВ
				заполнения полного сечения материалом $\chi_{зан.}$	гладкости поверхности провода $m_{пр.}$		
а	—	150	45,56	0,91	1,00	370	10
б	19	120	57,30	0,89	0,82		
в	19	120	69,20	0,99	0,61		

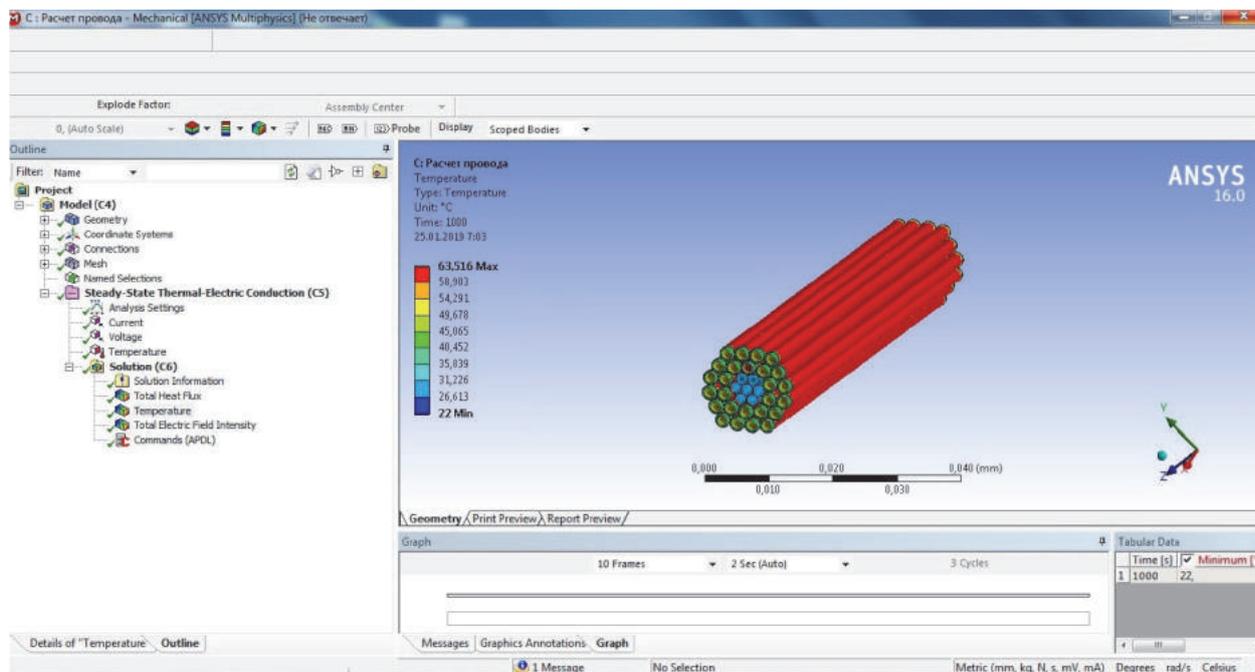


Рисунок 2. Интерфейс программы Ansys — моделирование нагрева провода под воздействием электрического тока

Таблица 2. Сравнение аналитических расчетов с результатами моделирования (расчетные величины)

Вариант	Расчетные величины			
	Коэффициент теплоотдачи $\alpha_T$	Температура провода (аналит.) $t_{np}$ , °C	Температура провода (моделиров.) $t_{np}$ , °C	Сальдо аналит. — моделир. $\Delta t$ , °C
а	14,2	75,4	76,8	-1,4
б	9,8	65,7	63,5	2,2
в	9,6	55,6	57,3	-1,7

На рисунке 2 представлен нагрев провода АС номинальным сечением 120/19 мм<sup>2</sup> в программной среде конечных элементов Ansys.

Анализ таблиц 1 и 2 показывает:

— увеличение боковой поверхности охлаждения позволяет отводить с поверхности провода большее количество теплоты — разница между вариантами б и в (неизолированные провода) достигает 20 %;

— большая температура нагрева провода СИП обусловлена наличием изоляции из светостабилизированного сшитого полиэтилена, которая ограничивает теплообмен между проводом и окружающей средой;

— энергоэффективный провод позволяет передавать больший электрический ток, следовательно и электрическую мощность, тем самым увеличивается пропускная способность электрической сети.

Моделирование механических процессов (сжатие, растяжение, кручение) витого неизолированного провода линии электропередачи показало, что более плотное сопряже-

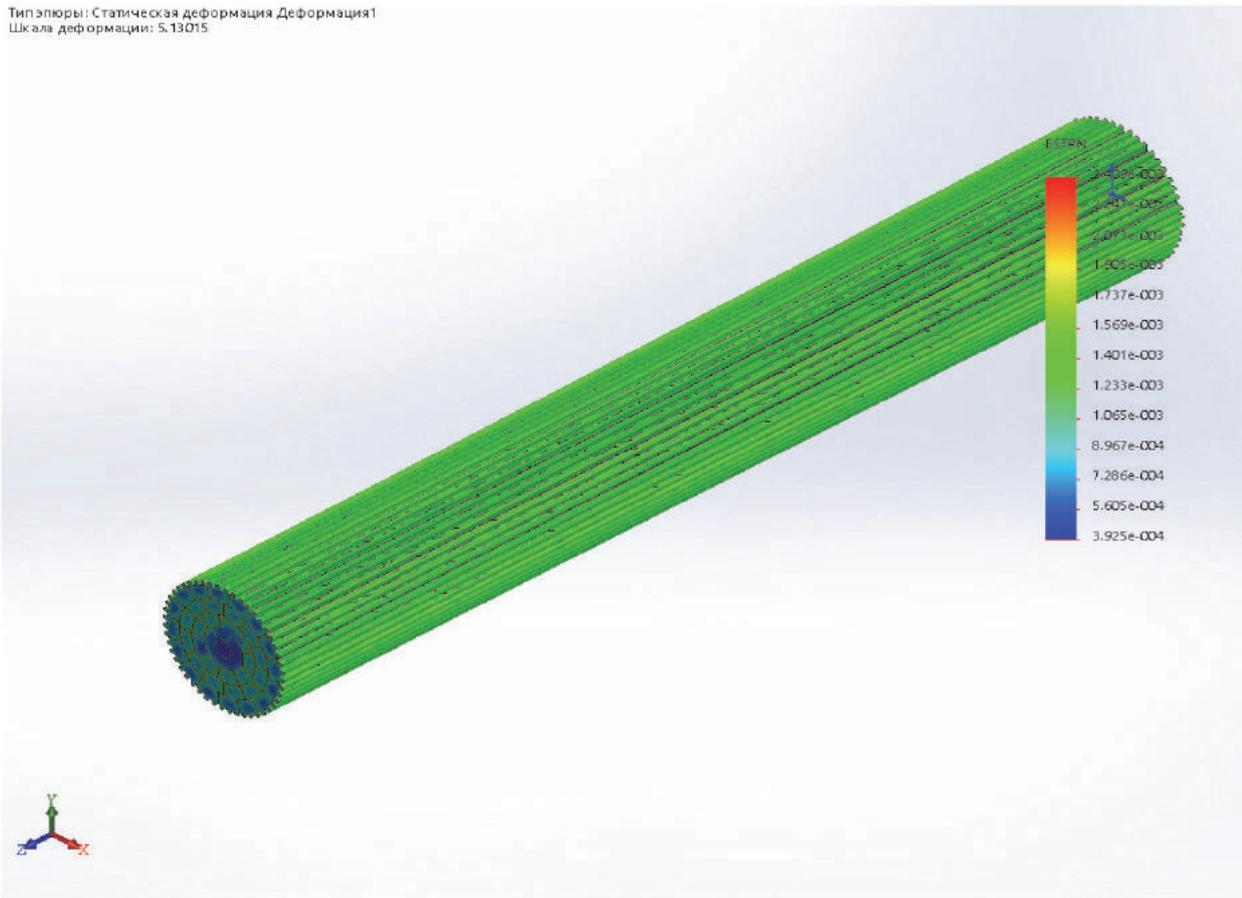
ние проволок позволяет увеличить механическую прочность провода более чем на 15 %.

На рисунках 3, 4 для примера приведены эквивалентные деформации (ESTRN) проводов различной формы поперечного сечения (исходные данные по моделированию представлены в таблице 3).

Анализ рисунков 3 и 4 показывает, что провод типа АС при растягивающей нагрузке 40 кН деформируется больше, то есть разрывное усилие, следовательно и запас прочности такого провода, меньше (разница составляет 15 %).

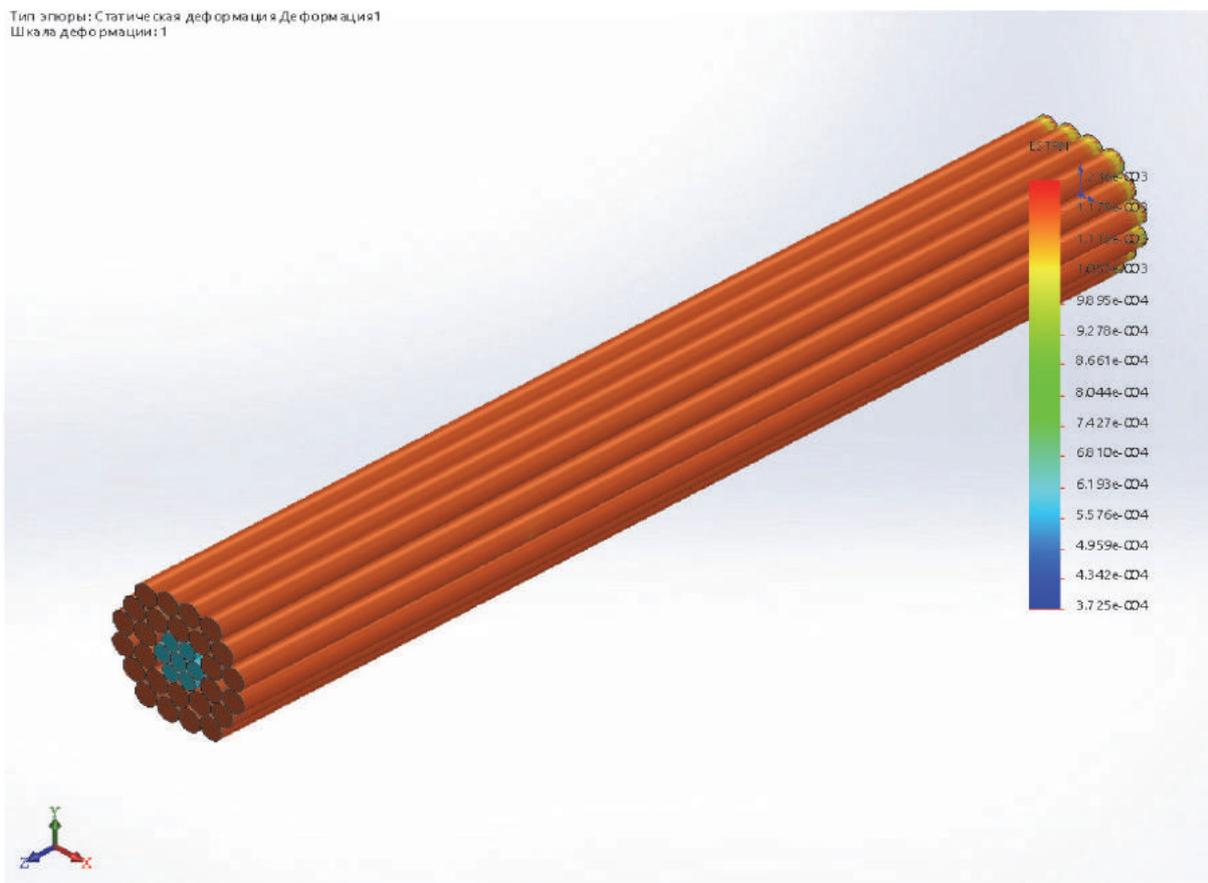
Провода ВЛ, подвешенные на опорах воздушной линии, находятся под постоянным действием равномерно распределенной по длине вертикальной статической нагрузки от собственного веса. Кроме того, на них могут действовать внешние силы, направленные вертикально (гололедно-изморозевые образования) и горизонтально (давление ветрового потока).

Тип эпоры: Статическая деформация Деформация1  
Шкала деформации: 5.13015



**Рисунок 3.** Эквивалентная деформация энергоэффективного провода [9] при растягивающей нагрузке в программе SolidWorks

Тип эпоры: Статическая деформация Деформация1  
Шкала деформации: 1



**Рисунок 4.** Эквивалентная деформация провода типа AC [5] при растягивающей нагрузке в программе SolidWorks

Таблица 3. Исходные данные, принятые при моделировании

Исходные данные		
Сердечник	Материал проволоки	Простая углеродистая сталь
	Тип модели	Линейный, упругий, изотропный
	Предел текучести	$2,20594e^{+008}$ , Н/м <sup>2</sup>
	Предел прочности при растяжении	$3,99826e^{+008}$ , Н/м <sup>2</sup>
	Модуль упругости	$2,1e^{+011}$ , Н/м <sup>2</sup>
	Коэффициент Пуассона	0,28
	Массовая плотность	7800 кг/м <sup>3</sup>
	Модуль сдвига	$7,9e^{+010}$ , Н/м <sup>2</sup>
	Коэффициент теплового расширения	$1,3e^{-005}$ 1/К
Токопроводящая часть	Материал проволоки	Алюминиевый сплав
	Тип модели	Линейный, упругий, изотропный
	Предел текучести	$2,75742e^{+007}$ , Н/м <sup>2</sup>
	Предел прочности при растяжении	$3,99826e^{+008}$ , Н/м <sup>2</sup>
	Модуль упругости	$6,9e^{+010}$ , Н/м <sup>2</sup>
	Коэффициент Пуассона	0,33
	Массовая плотность	2700 кг/м <sup>3</sup>
	Модуль сдвига	$2,7e^{+010}$ , Н/м <sup>2</sup>
	Коэффициент теплового расширения	$2,4e^{-005}$ 1/К

Вертикальная нагрузка от гололедно-изморозевых образований вызывает наибольшие усилия в проводах и действует не постоянно, а лишь при неблагоприятных сочетаниях атмосферных условий. Такая нагрузка может существовать на поверхности проводов длительное время, поэтому ее считают основной при расчете механической прочности проводов. Нарастание гололедного образования при этом происходит постепенно и не сопровождается динамическим изменением приложенной силы, поэтому нагрузку от гололеда при расчетах принимают статической [13]. Динамическим действием справедливо можно считать внезапный сброс гололеда при сильных порывах ветра или обрыва провода в смежных пролетах. Горизонтальная нагрузка от ветра, как и вертикальная нагрузка от гололеда, вызывает большие усилия в проводе.

Моделирование парусности проводов в зависимости от формы поперечного сечения выполнялось в работе [14], основные выводы по которой следующие:

— динамическое сопротивление ветровому потоку зависит от принятой формы провода (коэффициентов гладкости поверхности

провода и заполнения полного сечения материалом);

— наибольшее влияние оказывает коэффициент гладкости поверхности провода, изменение которого в сторону увеличения теплоотдачи приводит к повышению парусности провода в пролете;

— предложенный энергоэффективный провод [9, 10] имеет меньшую парусность (разница составляет 10 %) в сравнении с наиболее часто применяемым проводом типа АС в распределительной сети класса напряжения 6–35 кВ системы электроснабжения потребителей нефтегазовой отрасли.

### Выводы

Предлагаемые энергоэффективные формы проводов позволяют снизить тепловые потери электроэнергии в распределительной сети до 20 % за счет большой боковой поверхности охлаждения, увеличивают механическую прочность (разрывное усилие) до 15 %, снижают воздействие ветрового потока до 10 % в сравнении с наиболее часто применяемыми проводами в распределительной сети системы электроснабжения нефтегазовой отрасли типа АС [5].

### Список литературы

1. Макиенко Г.П. Кабели и провода, применяемые в нефтегазовой индустрии. Пермь: Стиль-МГ, 2004. 518 с.

2. Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Устинов Д.А. Электроснабжение нефтегазовых предприятий. СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2008. 81 с.

3. ГОСТ Р 31946-2012. Провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2013. 24 с.

4. Хайрисламов Д.С., Андрианова Л.П. Перспективы внедрения и особенности проектирования воздушных линий электропередач с самонесущими изолированными проводами // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. науч. тр. / Отв. ред. В.А. Шабанов. Уфа: УГНТУ, 2016. С. 276-280.

5. ГОСТ 839-80 1980. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2002. 32 с.

6. Кувшинов А.С. Инновационные конструкции проводов для высоковольтных линий электропередачи // Кабели и провода. 2014. № 2 (345). С. 14–16.

7. Федоров Н.А. Энергоэффективность и энергосбережение в электросетевом хозяйстве страны за счет применения инновационных проводов нового поколения // Воздушные линии. 2012. № 1. С. 31–34.

8. Aero-Z — провод для линий электропередачи // Новости Электротехники. 2004. № 4 (28). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2004/28/40.php> (дата обращения: 16.07.2019).

9. Латыпов И.С., Хмара Г.А., Сушков В.В. Подход к обоснованию выбора энергоэффективной формы витого неизолированного провода воздушной линии электропередачи класса напряжения 6–35 кВ // Промышленная энергетика. 2017. № 4. С. 8–12.

10. Пат. 2631421 РФ, МПК Н 01 В 5/08. Провод для воздушных линий электропередачи / И.М. Богачков, И.С. Латыпов. 2016114397; Заявлено 13.04.2016; Опубл. 22.09.2017. Бюл. 27.

11. Латыпов И.С., Сушков В.В., Хмара Г.А., Ефремова И.А. Система интеллектуального мониторинга гололедообразования в распределительной сети класса напряжения 6-35 кВ // Нефть. Газ. Новации. 2018. № 12. С. 93–97.

12. Гиршин С.С., Бубенчиков А.А., Горюнов В.Н., Левченко А.А., Петрова Е.В.

Анализ распределения температуры по сечению самонесущих изолированных проводов // Омский научный вестник. 2009. № 3 (83). С. 171–175.

13. Дьяков А.Ф., Левченко И.И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 448 с.

14. Латыпов И.С., Сушков В.В. Сравнение неизолированных проводов воздушной линии электропередачи различной формы поперечного сечения по различным критериям // Энергосбережение и инновационные технологии: матер. Всеросс. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов / отв. ред. А.Н. Халин. Тюмень: ТИУ, 2018. С. 273–277.

## References

1. Makienko G.P. *Kabeli i provoda, primenyaemye v neftegazovoi industrii* [Cables and Wires used in the Oil and Gas Industry]. Perm, Stil'-MG Publ., 2004. 518 p. [in Russian].

2. Abramovich B.N., Sychev Yu.A., Ustinov D.A. *Elektrosnabzhenie neftegazovykh predpriyatii* [Power Supply of Oil and Gas Enterprises]. Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi gornyi institut Publ., 2008. 81 p. [in Russian].

3. GOST R 31946-2012. *Provoda samonesushchie izolirovannye i zashchishchennye dlya vozdushnykh linii elektroperedachi. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State Standard R 31946-2012. Insulated and Protected Wires for Overhead Power Lines. General Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 24 p. [in Russian].

4. Khairislamov D.S., Andrianova L.P. *Perspektivy vnedreniya i osobennosti proektirovaniya vozdushnykh linii elektroperedach s samonesushchimi izolirovannymi provodami* [Prospects of Implementation and Design Features of Overhead Power Lines with Self-Supporting Insulated Wires]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov «Povyshenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotekhnicheskikh sistem i kompleksov»* [Interuniversity Collection of Scientific Papers «Improving the Reliability and Energy Efficiency of Electrical Systems and Complexes»]. Managing Ed. V.A. Shabanov.

Ufa, UGNTU Publ., 2016, pp. 276-280. [in Russian].

5. GOST 839-80 1980. *Provoda neizolirovannye dlya vozdushnykh linii elektroperedachi. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 839-80 1980. Uninsulated Wires for Aerial Power Lines. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2002. 32 p. [in Russian].

6. Kuvshinov A.S. Innovatsionnye konstruksii provodov dlya vysokovol'tnykh linii elektroperedachi [The Innovative Design of Cables for High-Voltage Power Lines]. *Kabeli i provoda — Cables and Wires*, 2014, No. 2 (345), pp. 14–16. [in Russian].

7. Fedorov N.A. Energoeffektivnost' i energosberezhenie v elektrosetevom khozyaistve strany za schet primeneniya innovatsionnykh provodov novogo pokoleniya [Energy Efficiency and Energy Saving in the Power Grid Sector of the Country Through the Use of Innovative Wires of the New Generation]. *Vozdushnye linii — Air Line*, 2012, No. 1, pp. 31–34. [in Russian].

8. Aero-Z — provod dlya linii elektroperedachi [Aero-Z — Wire for Power Lines]. *Novosti Elektrotehniki — The News of Electrical Engineering*, 2004, No. 4 (28). Available at: <http://news.elteh.ru/arh/2004/28/40.php> (accessed 16.07.2019). [in Russian].

9. Latypov I.S., Khmara G.A., Sushkov V.V. Podkhod k obosnovaniyu vybora energo-effektivnoi formy vitogo neizolirovannogo provoda vozdushnoi linii elektroperedachi klassa napryazheniya 6-35 kV [Approach to the Justification of the Choice of Energy Efficient Form of Twisted Uninsulated Wire Overhead Power Line Voltage Class 6-35 kV]. *Promyshlennaya energetika — Industrial Power Engineering*, 2017, No. 4, pp. 8–12. [in Russian].

10. Bogachkov I.M., Latypov I.S. *Provod dlya vozdushnykh linii elektroperedachi* [Wire for Overhead Power Lines]. Patent RF, No. 2631421, 2017. [in Russian].

11. Latypov I.S., Sushkov V.V., Khmara G.A., Efremova I.A. Sistema intellektual'nogo monitoringa gololedoobrazovaniya v raspredelitel'noi seti klassa napryazheniya 6–35 kV [System of Smart Monitoring with 6–35 kV Power Distribution Nets Icing]. *Neft'. Gaz. Novatsii — Oil. Gaz. Novation*, 2018, No. 12, pp. 93-97. [in Russian].

12. Girshin S.S., Bubenchikov A.A., Goryunov V.N., Levchenko A.A., Petrova E.V. Analiz raspredeleniya temperatury po secheniyu samonesushchikh izolirovannykh provodov [Temperature Distribution Analysis by Sectioning of Self-Bearing Insulated Wires]. *Omskii nauchnyi vestnik — Omsk Scientific Bulletin*, 2009, No. 3 (83), pp. 171–175. [in Russian].

13. Dyakov A.F., Levchenko I.I. *Diagnostika, rekonstruktsiya i ekspluatatsiya vozdushnykh linii elektroperedachi v gollednykh raionakh* [Diagnostics, Reconstruction and Operation of Overhead Power Lines in Icy Areas]. Moscow, Izdatelskii dom MEI Publ., 2007. 448 p. [in Russian].

14. Latypov I.S., Sushkov V.V. Sravnenie neizolirovannykh provodov vozdushnoi linii elektroperedachi razlichnoi formy poperechnogo secheniya po razlichnym kriteriyam [Comparison of Uninsulated Overhead Power Line Wires of Different Cross-Section Shapes According to Different Criteria]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov, molodykh uchenykh i spetsialistov «Energoberezhenie i innovatsionnye tekhnologii»* [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, Young Scientists and Specialists «Energy Saving and Innovative Technologies»]. Managing Ed. A.N. Khalin. Tyumen, TIU Publ., 2018, pp. 273-277. [in Russian].



**Шафиков И. Н.**

**Shafikov I. N.**

*аспирант кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 681.5:502:622.276

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-53-60

## РЕГУЛИРУЕМЫЙ ПРИВОД СКВАЖИННОГО ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО МНОГОУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Электроцентробежные скважинные насосы являются основным инструментом добычи нефти в нашей стране, в то время как их электроприводы — главные потребители электроэнергии на нефтедобывающих предприятиях.

Во время эксплуатации скважин часто требуется изменять производительность насосного погружного агрегата. Наиболее экономичным способом изменения производительности скважинного электроцентробежного насоса является использование частотно-регулируемого электропривода.

В настоящее время для регулирования скважинных насосов используют, в основном, низковольтные преобразователи частоты. Так как к скважинам подводится высокое напряжение, а погружные двигатели также выполняются высоковольтными, требуется установка трансформаторов перед и после низковольтного преобразователя частоты. Двойная трансформация напряжения снижает общий КПД системы, а также ограничивает диапазон регулирования частоты вращения вниз, так как характеристики трансформаторов на низких частотах резко ухудшаются.

В статье предлагается использовать в регулируемом электроприводе скважинных насосов высоковольтные преобразователи частоты, выполненные на основе многоуровневой схемы. Многоуровневые преобразователи частоты обладают более высоким КПД и надежностью.

Но самым важным достоинством многоуровневого преобразователя частоты является относительно низкий уровень генерируемых высокочастотных гармоник. В статье приводятся графики спектров входного напряжения погружного электродвигателя для случаев использования низковольтного преобразователя частоты с повышающим трансформатором и высоковольтного многоуровневого преобразователя частоты. Анализ спектров позволяет сделать вывод, что регулируемый электропривод на основе многоуровневого преобразователя частоты обеспечивает значительно больший уровень электромагнитной совместимости. Высокочастотные электромагнитные помехи, генерируемые преобразователями частоты, загрязняют сеть, а также вызывают нагрев и дополнительные потери в двигателе.

Для количественной оценки генерируемых преобразователем частоты помех в работе вычислены значения коэффициента нелинейных искажений для различного количества уровней напряжения. Сделан вывод, что для питания погружных электродвигателей наиболее целесообразно выполнять многоуровневые преобразователи частоты с тремя уровнями напряжений.

**Ключевые слова:** электроцентробежный насос, нефтяная скважина, электропривод, погружной электродвигатель, коэффициент полезного действия, спектр, многоуровневый преобразователь частоты, коэффициент нелинейных искажений.

## ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMP ADJUSTABLE DRIVE BASED ON HIGH-VOLTAGE MULTILEVEL FREQUENCY CONVERTER

Electric submersible pumps are the main tool of oil production in Russia. Electric submersible pumps drives are the main consumers of electricity at oil-producing enterprises.

It is often necessary to change the flow of the submersible pumping unit. The use of a variable frequency drive is the most economical way to change the flow of a submersible pump unit.

The low-voltage frequency converters are used to control well pumps now. But high voltage is supplied to the wells, and submersible electric motors are also made high-voltage. Therefore, it is necessary to install two transformers. Step-down transformer is installed at the input of the frequency converter and step-up transformer is installed at the output of the frequency converter. Dual voltage transformation reduces overall system efficiency.

In this article, the author proposes to use high-voltage multilevel frequency converters in the regulated electric drives of well pumps. Multilevel frequency converters have higher efficiency and reliability.

However, the most important advantage of a multilevel frequency converter is the low level of generated high-frequency harmonics. In the article, the author provides voltage spectra for using a low-voltage frequency converter with a step-up transformer and a high-voltage multilevel frequency converter. Spectrum analysis shows a high-voltage multilevel frequency converter provides a high level of electromagnetic compatibility. The high frequency harmonics pollute the electrical network, heat the motor, and cause additional losses.

The nonlinear distortion factor is calculated for a different number of voltage levels to quantify the generated interference. It is concluded that to power the submersible electric motors it is most expedient to perform multilevel frequency converters with three voltage levels.

**Key words:** electric submersible pump, oil well, electric drive, submersible electric motor, efficiency, spectrum, multilevel frequency converter, nonlinear distortion factor.

### *Введение*

На нефтепромыслах нашей страны для добычи углеводородного сырья широко используются скважинные электроцентробежные насосы (ЭЦН). В России установками ЭЦН эксплуатируется свыше 55 % скважин, которые обеспечивают добычу 75 % всей нефти [1, 2]. Установки ЭЦН получили широкое распространение благодаря таким преимуществам, как большие значения подачи и напора (до 500–1000 м<sup>3</sup>/сут и до 2000–3000 м), простота и компактность наземного оборудования, возможность использования в наклонных скважинах [3, 4]. Вместе с тем данный способ эксплуатации скважин имеет ряд недостатков: сравнительно высокие удельные затраты электроэнергии на подъем скважинной жидкости, сложность работы при наличии в продукции газа и песка [5].

Отдельную проблему представляет регулирование производительности погружного насоса. Необходимость изменять производительность насоса в процессе эксплуатации скважины может быть связана как с неточным

подбором оборудования, так и с изменением нефтеотдачи скважины. Замена типоразмера насосного агрегата требует проведения спускоподъемных операций и является чрезвычайно дорогостоящим мероприятием. Так как здесь, в отличие от станков-качалок, нет возможности механически регулировать производительность насоса, изменяя частоту качаний и длину хода штока, остается использовать два метода — дросселирование и частотное регулирование. Метод дросселирования, заключающийся в перекрытии задвижки на выкидной линии, сопряжен с большими гидравлическими потерями и, соответственно, повышенным расходом электроэнергии. Поэтому наиболее оптимальным с точки зрения энергоэффективности методом изменения производительности погружного насосного агрегата является частотное регулирование. Частотно-регулируемый привод (ЧРП) ЭЦН имеет целый ряд преимуществ: плавное регулирование скорости вращения, возможность плавных пусков погружного электродвигателя (ПЭД), отказ от периодической эксплуатации скважин [6, 7].

*Схема регулируемого привода ЭЦН на основе низковольтного преобразователя частоты*

Скважинные ПЭД могут выпускаться на различное номинальное напряжение от 0,4 до 3,0 кВ в зависимости от мощности и типа-размера. Кроме того, в кабеле ЭЦН происходят значительные потери напряжения, поэтому источник питания должен обеспечивать возможность генерации различных уровней выходного напряжения. Это затрудняет использование для ЧРП ЭЦН высоковольтных преобразователей частоты (ПЧ).

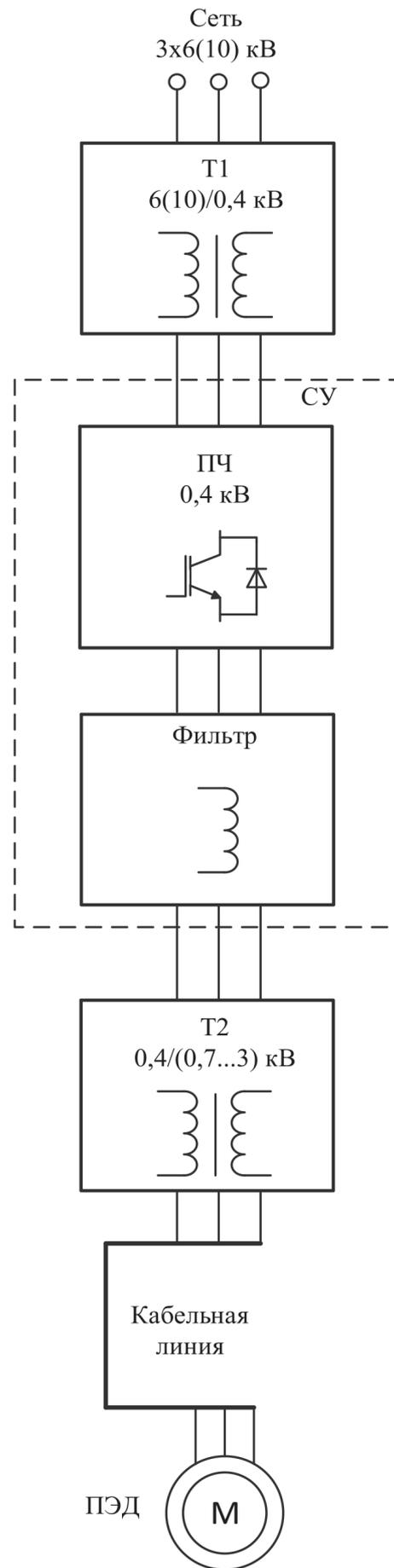
Поэтому в настоящее время в установках ЭЦН используют главным образом низковольтные ПЧ на 0,4 кВ, включаемые перед повышающим трансформатором [8]. Схема ЧРП ЭЦН на основе низковольтного ПЧ приведена на рисунке 1.

Такая схема содержит входной понижающий трансформатор Т1, низковольтный ПЧ, фильтр (установленные в станции управления), повышающий выходной трансформатор Т2, кабельную линию и ПЭД. Достоинствами такой схемы являются возможность использования доступных по стоимости и надежных низковольтных ПЧ на 0,4 кВ, безопасность обслуживания станции управления, где отсутствует высоковольтное электрооборудование, а также возможность регулирования выходного напряжения переключением отпаек на повышающем трансформаторе Т2.

Систему ЧРП ЭЦН на основе низковольтного ПЧ используют производители ряда отечественных и импортных станций управления: ЭЛЕКТОН-05, ИРЗ-500, Новомет-03, НЭК-03М, SpeedStar Titan II, АЛСУ-АЧ, REDAstar, SCD-630BAMW и другие [9–11].

Вместе с тем такая схема ЧРП ЭЦН имеет ряд недостатков:

- понижение общего КПД установки из-за двойной трансформации напряжения;
- ограниченный диапазон регулирования частоты питающего напряжения в сторону понижения из-за ухудшения свойств трансформатора в области низких частот;
- протекание больших токов через низковольтный ПЧ.



**Рисунок 1.** Схема ЧРП ЭЦН на основе низковольтного ПЧ

*Схема регулируемого привода ЭЦН на основе высоковольтного многоуровневого преобразователя частоты*

Перечисленные выше недостатки схем ЧРП ЭЦН на основе низковольтного ПЧ, а также стремление повысить энергетические и эксплуатационные характеристики скважинных насосов обусловили необходимость разработки новой схемы регулируемого электропривода ЭЦН. В связи с этим была предложена схема ЧРП ЭЦН на основе высоковольтного многоуровневого ПЧ (рисунок 2).

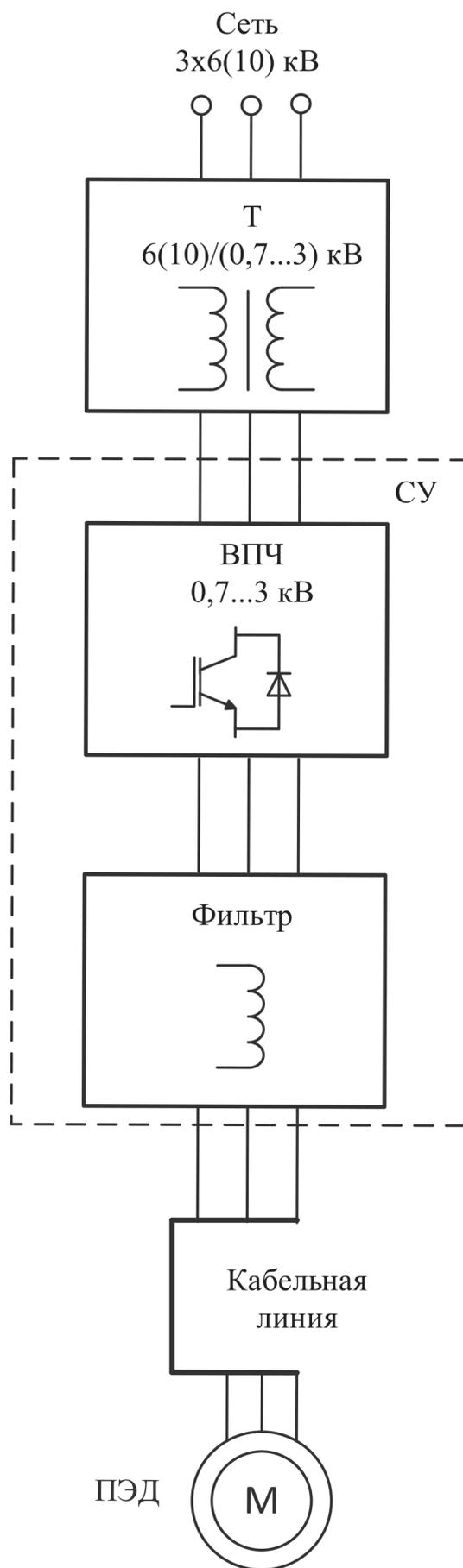
Такая схема содержит входной трансформатор, высоковольтный ПЧ, выполненный по многоуровневой схеме, фильтр, кабельную линию и ПЭД. Входной трансформатор понижает напряжение сети 6(10) кВ до номинального напряжения ПЭД с учетом потерь в ПЧ и кабеле.

Среди главных преимуществ схемы ЧРП на основе многоуровневого ПЧ следует отметить высокую степень электромагнитной совместимости благодаря низкому уровню генерируемых высокочастотных помех, а также высокую надежность благодаря возможности резервирования силовых ячеек [12, 13].

*Электромагнитная совместимость высоковольтного многоуровневого преобразователя частоты*

Электромагнитная совместимость устройств приводной полупроводниковой техники определяется, в значительной мере, уровнем генерируемых помех. Помехи от работающего полупроводникового преобразователя распространяются в обе стороны: в сеть, ухудшая показатели качества электрической энергии, и в электродвигатель, где вызывают нагрев его обмоток, ускоренное старение изоляции, снижение КПД и дополнительные потери [14].

Для сравнения на рисунках 3 и 4 показаны спектры выходных напряжений в ЧРП, выполненных на основе низковольтного и высоковольтного многоуровневого ПЧ. Из анализа рисунков 3 и 4 видно, что содержание высших гармоник в выходном напряжении высоковольтного многоуровневого ПЧ значительно ниже [15].



**Рисунок 2.** Схема электропривода погружного насоса на основе высоковольтного многоуровневого ПЧ

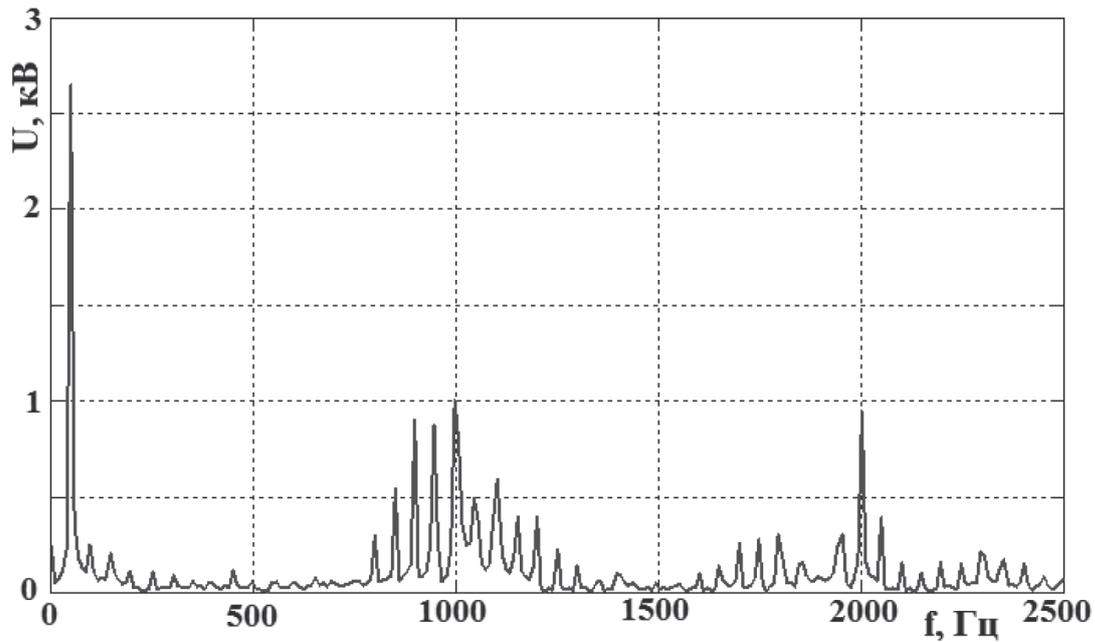


Рисунок 3. Спектр выходного напряжения ЧРП, выполненного на основе низковольтного ПЧ, при формировании синусоиды частотой 50 Гц

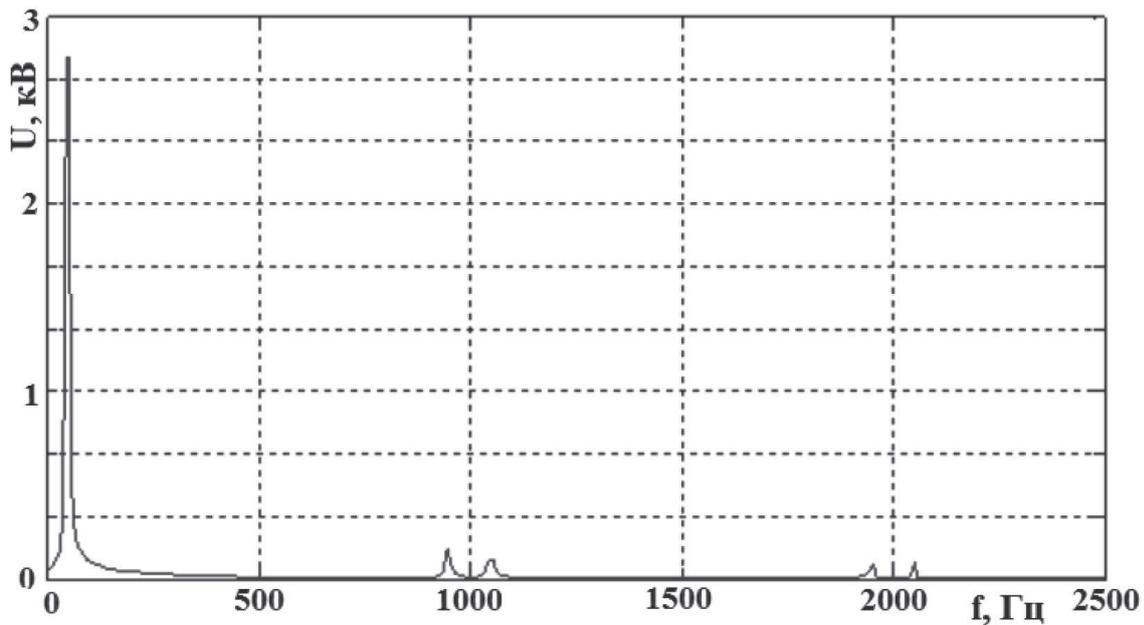


Рисунок 4. Спектр выходного напряжения ЧРП, выполненного на основе высоковольтного многоуровневого ПЧ, при формировании синусоиды частотой 50 Гц

Чтобы сделать количественную оценку отклонения формы напряжения, поступающего на вход ПЭД от синусоиды, необходимо выполнить разложение в ряд Фурье и найти коэффициент нелинейных искажений.

Выполним разложение в ряд Фурье входного напряжения ПЭД [16]:

$$\begin{aligned} \tilde{u}(\alpha) = & U_m \frac{\sin\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right)}{\frac{\Delta\alpha}{2}} \left\{ \sin\left(\omega t - \frac{\Delta\alpha}{2}\right) + \right. \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{mp-1} \sin[(mp-1)\omega t + \varphi_{mp-1}] + \\ & \left. + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{mp+1} \sin[(mp+1)\omega t + \varphi_{mp+1}] \right\}, \quad (1) \end{aligned}$$

где  $m=1; 2; 3; 4\dots; p=4n$  — число ступеней на период.

Коэффициент нелинейных искажений при равномерном квантовании по уровню находится по формуле:

$$k_u = \frac{4}{p\sqrt{6}}. \quad (2)$$

В таблице 1 приведены значения коэффициента нелинейных искажений в зависимости от числа уровней квантования.

**Таблица 1.** Зависимость коэффициента нелинейных искажений  $k_u$  от числа уровней квантования

Число уровней, $n$	Коэффициент нелинейных искажений, $k_u$
1	0,40
2	0,20
3	0,13
4	0,10
5	0,08
6	0,06

Как видно из таблицы 1, при числе уровней  $n=3$  коэффициент нелинейных искажений составляет 13 %, а при  $n=5$  — около 8 % (без учета фильтров). Увеличение количества уровней повышает качество выходного напряжения ПЧ, однако приводит к усложнению конструкции как самого преобразователя, так и входного трансформатора, увеличивает габариты устройства и его стоимость. Учитывая, что ПЭД выпускаются на напряжения до 3 кВ, наиболее оптимальным будет выполнять высоковольтный ПЧ с количеством уровней  $n=3$ . Современные IGBT-транзисторы способны коммутировать

### Список литературы

1. Хакимьянов М.И. Управление электроприводами скважинных насосных установок. М.: Инфра-Инженерия, 2017. 138 с.
2. Ивановский В.Н. Анализ современного состояния и перспектив развития скважинных насосных установок для добычи нефти // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2007. № 6. С. 12–21.
3. Искужин Р.В., Нугаев И.Ф. Анализ и синтез алгоритмов управления нефтескважины на базе электрического центробежного насоса // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9. № 1. С. 18–20.
4. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. 816 с.

напряжения до 1,7 кВ [17], что позволяет построить ПЧ на 3 кВ с тремя уровнями напряжений.

Дальнейшее увеличение количества уровней хоть и повысит качество напряжения и надежность преобразователя, но приведет к усложнению конструкции входного многообмоточного трансформатора и самого преобразователя и, как следствие, к удорожанию преобразователя.

### Выводы

1. Используемые в настоящее время ЧРП ЭЦН на основе низковольтных преобразователей частоты имеют ряд недостатков: высокий уровень генерации высших гармоник, низкий КПД за счет двойной трансформации напряжений, ограниченный диапазон регулирования частоты вниз.

2. В работе предлагается выполнять ЧРП ЭЦН на основе высоковольтных многоуровневых преобразователей частоты, обладающих более высокими характеристиками.

3. Для питания ПЭД требуется обеспечить выходное напряжение до 3 кВ, поэтому высоковольтный преобразователь частоты оптимально должен иметь три уровня напряжения. Дальнейшее увеличение количества уровней хоть и повысит качество напряжения и надежность преобразователя, но приведет к усложнению конструкции и повышению стоимости преобразователя.

5. Ивановский В.Н., Пекин С.С., Сабиров А.А. Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти. М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. 256 с.

6. Хакимьянов М.И., Шафиков И.Н. Анализ потребления электроэнергии при механизированной добыче нефти электроцентробежными насосами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9. № 3. С. 37–41.

7. Шабанов В.А. Основы регулируемого электропривода основных механизмов бурения, добычи и транспорта нефти. Уфа: УГНТУ, 2009. 156 с.

8. Сушков В.В., Марьянов А.С. Особенности обеспечения динамической устойчивости установок электроцентробежных насо-

сов с частотно-регулируемым приводом // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 1. С. 354–357.

9. Лепехин В.И., Видякин Н.Г., Вале-ев А.С., Канн А.Г. ЗАО «Электон»: разработка и опыт эксплуатации комплекса оборудования для автоматизации добычи нефти // Нефтяное хозяйство. 2004. № 5. С. 111–112.

10. Зайцев И.И., Сяктерев В.Н., Сяктере-ва В.В. Разработка модели и исследование макета активного выпрямителя напряжения в составе частотных преобразователей систем энергоснабжения погружных электродвигателей // Вестник ИжГТУ им. МТ Калашникова. 2017. Т. 20. № 3. С. 114–117. DOI: 10.22213/2413-1172-2017-3-114-117.

11. Мартюшев Д.Н. Комплексный подход к энергоэффективности при добыче нефти УЭЦН // Инженерная практика. 2011. № 6. С. 72–77.

12. Хакимьянов М.И., Шабанов В.А. Входные многообмоточные трансформаторы для многоуровневых преобразователей частоты // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 5. С. 47–54. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov\\_8.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_8.pdf). (дата обращения: 03.08.2019).

13. Донской Н., Иванов А., Матисон В., Ушаков И. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики // Силовая электроника. 2008. № 15. С. 43–46.

14. Павленко В., Климов В., Климов И. Сравнительный анализ электромагнитных процессов в структурах электроприводов нефтедобывающей промышленности // Силовая электроника. 2010. № 26. С. 30–35.

15. Сапельников В.М., Хакимьянов М.И. Спектр выходного напряжения многоуровневых преобразователей частоты // Датчики и системы. 2013. № 4. С. 20–23.

16. Смеляков В. В. Цифровая измерительная аппаратура инфранизких частот. М.: Энергия, 1975. 168 с.

17. Толкачев С., Алешин В., Мускати-ньев В., Сабешкин А., Гурвич А. Силовые полупроводниковые блоки компании ОАО «Электровыпрямитель» // Компоненты и технологии. 2016. № 6 (179). С. 38–41.

## References

1. Khakimyanov M.I. Upravlenie elektroprivodami skvazhinnykh nasosnykh ustanovok [Control of Electric Drives of Downhole Pumping Units]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2017. 138 p. [in Russian].

2. Ivanovskii V.N. Analiz sovremennogo sostoyaniya i perspektiv razvitiya skvazhinnykh nasosnykh ustanovok dlya dobychi nefiti [Analysis of the Current State and Prospects of Development of Downhole Pumping Units for Oil Production]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa — Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*, 2007, No. 6, pp. 12–21. [in Russian].

3. Iskuzhin R.V., Nugaev I.F. Analiz i sintez algoritmov upravleniya neftedobyvayushchei skvazhiny na baze elektricheskogo tsentrobezhnogo nasosa [Analysis and Synthesis of Algorithms of Management of the Oil-Extracting Well on the Basis of the Electric Centrifugal Pump]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2013, Vol. 9, No. 1, pp. 18–20. [in Russian].

4. Mishchenko I.T. Skvazhinnaya dobycha nefiti [Downhole Oil Production]. Moscow, «Nefit' i gaz» RGU nefiti i gaza im. I.M. Gubkina Publ., 2003. 816 p. [in Russian].

5. Ivanovskii V.N., Pekin S.S., Sabirov A.A. Ustanovki pogruzhnykh tsentrobezhnykh nasosov dlya dobychi nefiti [Submersible Centrifugal Pumps for Oil Production]. Moscow, «Nefit' i gaz» RGU nefiti i gaza im. I.M. Gubkina Publ., 2002. 256 p. [in Russian].

6. Khakimyanov M.I., Shafikov I.N. Analiz potrebleniya elektroenergii pri mekhanizirovannoi dobyche nefiti elektrotsentrobezhnyimi nasosami [Analysis of Energy Consumption of Artificial Lift Using Electric Submersible Pumps]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2013, Vol. 9, No. 3, pp. 37–41. [in Russian].

7. Shabanov V.A. *Osnovy reguliruemogo elektroprivoda osnovnykh mekhanizmov bureniya, dobychi i transporta nefiti* [Basics of Regulated Electric Drive of the Main Mechanisms of Drilling, Production and Transportation

of Oil]. Ufa, UGNTU Publ., 2009. 156 p. [in Russian].

8. Sushkov V.V., Maryanov A.S. Osobennosti obespecheniya dinamicheskoi ustoichivosti ustanovok elektrotsentrobezhnykh nasosov s chastotno-reguliruemym privodom [Specific of Ride-Through Solution for Electric Submersible Pump with Variable Speed Drives]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin — Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*, 2014, No. 1, pp. 354-357. [in Russian].

9. Lepikhin V.I., Vidyakin N.G., Valeev A.S., Kann A.G. ZAO «Elekton»: razrabotka i opyt ekspluatatsii kompleksa oborudovaniya dlya avtomatizatsii dobychi nefti [Elekton ZAO: Development and Experience of Operating of an Equipment Complex for an Oil Recovery Automation]. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry*, 2004, No. 5, pp. 111-112. [in Russian].

10. Zaitsev I.I., Syakterev V.N., Syaktereva V.V. Razrabotka modeli i issledovanie maketa aktivnogo vypryamatelya napryazheniya v sostave chastotnykh preobrazovatelei sistem energosnabzheniya pogruchnykh elektrodvigatelye [Development of a Model and Research of Active Voltage Rectifier Prototype as a Part of Frequency Converters of Submersible Electric Motor Power Supply Systems]. *Vestnik IzhGTU im. MT Kalashnikova — Bulletin of Kalashnikov ISTU*, 2017, Vol. 20, No. 3, pp. 114-117. DOI: 10.22213/2413-1172-2017-3-114-117 [in Russian].

11. Martyushev D.N. Kompleksnyi podkhod k energoeffektivnosti pri dobyche nefti UETsN [Integrated Approach to Energy Efficiency in Oil Production ESP]. *Inzhenernaya praktika — Engineering Practice*, 2011, No. 6, pp. 72-77. [in Russian].

12. Khakimyanov M.I., Shabanov V.A. Vkhodnye mnogoobmotochnye transformatory dlya mnogourovnevnykh preobrazovatelei

chastoty [Input Multiwinding Transformers for Multilevel Inverters]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2012, No. 5, pp. 47-54. Available at: [http://www.ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov\\_8.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_8.pdf). (accessed 03.08.2019). [in Russian].

13. Donskoi N., Ivanov A., Matison V., Ushakov I. Mnogourovnevnye avtonomnye inventory dlya elektroprivoda i elektroenergetiki [Multilevel Autonomous Inverters for Electric Drive and Electric Power Industry]. *Silovaya elektronika — Power Electronics Magazine*, 2008, No. 15, pp. 43-46. [in Russian].

14. Pavlenko V., Klimov V., Klimov I. Sravnitel'nyi analiz elektromagnitnykh protsessov v strukturakh elektroprivodov neftedobyvayushchei promyshlennosti [Comparative Analysis of Electromagnetic Processes in the Structures of Electric Drives in the Oil Industry]. *Silovaya elektronika — Power Electronics Magazine*, 2010, No. 26, pp. 30-35. [in Russian].

15. Sapelnikov V.M., Khakimyanov M.I. Spektr vykhodnogo napryazheniya mnogourovnevnykh preobrazovatelei chastoty [Investigation of the Output Voltage Spectrum in Multilevel Frequency Controlled Drives]. *Datchiki i sistemy — Sensors & Systems*, 2013, No. 4, pp. 20-23. [in Russian].

16. Smelyakov V.V. Tsifrovaya izmeritel'naya apparatura infranizkikh chastot [Infra-Low Frequency Digital Measuring Equipment]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 168 p. [in Russian].

17. Tolkachev S., Aleshin V., Muskatin'ev V., Sabeshkin A., Gurchich A. Silovye poluprovodnikovye bloki kompanii OAO «Elektrovypryamitel'» [Power Semiconductor Elements of the Company JSC «Elektrovypryamitel'»]. *Komponenty i tekhnologii — Components and Technologies*, 2016, No. 6 (179), pp. 38-41. [in Russian].



**Крымский В. Г.**  
**Krymsky V. G.**

*доктор технических наук, профессор кафедры управления  
и сервиса в технических системах,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной  
технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 004.052

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-61-69

## МОДЕЛИ РОСТА НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Надежность является важной составляющей качества программного обеспечения. Между тем, специфическим свойством программного обеспечения является тот факт, что его надежность возрастает с течением времени вследствие обнаружения и устранения содержащихся в нем ошибок («багов»). Этот процесс описывается математическими моделями роста надежности.

В статье анализируются разнообразные модели роста надежности применительно к совершенному и несовершенному дебаггингу. Традиционный подход к использованию таких моделей требует задания всех функций в аналитической форме, что затруднительно ввиду наличия неопределенности.

Показывается возможность преодоления отмеченной трудности за счет применения математического аппарата, основанного на теории интервальнозначных вероятностей и привлечения экспертных суждений. Это позволяет сделать модель более адекватной реальным условиям.

**Ключевые слова:** программное обеспечение, модель роста надежности, интервальнозначные вероятности.

## SOFTWARE RELIABILITY GROWTH MODELS: NEW APPROACHES TO CREATION AND WAYS OF ENHANCEMENT

Reliability is an important component of software quality. Meanwhile, a specific property of the software is the fact that its reliability increases over time due to the detection and elimination of errors («bugs») contained in it. This process is described by mathematical models of reliability growth.

The paper analyzes various reliability growth models in relation to perfect and imperfect debugging. The traditional approach to using such models requires specifying all the functions in an analytical form, which is difficult due to the presence of uncertainty.

There is shown the possibility of overcoming the noted obstacles through the application of a mathematical technique based on the theory of interval-valued probabilities and the use of expert judgments. This allows us to make the model more adequate to the real conditions.

**Key words:** software, reliability growth model, interval-valued probabilities.

### *Введение*

Надежность программного обеспечения (ПО) принято включать в перечень характеристик его качества. В соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93 «Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по

их применению» под надежностью ПО следует понимать набор атрибутов, относящихся к способности программного обеспечения сохранять свой уровень качества функционирования при установленных условиях за установленный период времени. Таким образом, если уровень качества функционирова-

ния не сохраняется, то можно говорить об отказе ПО. Более подробно определение понятия отказа программного обеспечения приводится в п. 3.57 ГОСТ Р МЭК 61513-2011 «Атомные станции. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Общие требования», где утверждается, что отказ ПО — это отказ системы из-за проявившейся проектной ошибки в компоненте программного обеспечения. Кроме того, подчеркивается, что «... все отказы программного обеспечения связаны с ошибками при проектировании, так как программное обеспечение в данном контексте не связано с физическими носителями, не изнашивается или не страдает от физических отказов». Хотя отказы ПО и являются следствиями человеческих ошибок, допущенных при разработке (проектировании), они, подобно отказам технических устройств, проявляются и / или могут быть обнаружены в случайные моменты времени. По этой причине их можно рассматривать как случайные события и применять для анализа надежности ПО статистические модели и методы [1].

Жизненный цикл программного обеспечения содержит следующие «укрупненные» этапы:

- непосредственно проектирование ПО, в том числе — разработку необходимых алгоритмов, выбор платформы и концепции построения программного обеспечения, кодирование и дизайн интерфейсов;
- тестирование и отладку ПО;
- выпуск в эксплуатацию и собственно эксплуатацию созданного программного обеспечения.

Ошибки, допущенные при проектировании ПО, могут проявляться на второй и третьей стадиях, обнаруживаться и устраняться. Процедуры обнаружения и исправления ошибок получили название дебаггинга (от английского «bug» — «жучок», как по традиции называют ошибку в кодировании на программистском сленге). При успешной реализации дебаггинга общее количество ошибок, содержащихся в ПО, с течением времени уменьшается, что соответствует росту надежности. В этом заключается принципиальное отличие ПО от технических устройств (аппа-

ратного обеспечения), для которых надежность с течением времени, как известно, падает.

Отмеченный рост надежности программных продуктов описывается рядом математических моделей, первые из которых были предложены еще в конце 70-х — начале 80-х годов прошлого века. Наибольшее распространение получили модели, основанные на неоднородном пуассоновском процессе (по-английски «non-homogeneous poisson process», или NHPP) [2].

Обозначим  $N(t)$  суммарное количество отказов, проявившихся к моменту времени  $t$ . Тогда в случае NHPP вероятность любого фиксированного значения  $x$  указанного количества отказов выражается соотношением

$$P(N(t) = x) = \frac{(\mu(t))^x}{x!} \exp(-\mu(t)), \quad x = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где  $\mu(t)$  — зависящая от времени скорость процесса, которая здесь приобретает смысл математического ожидания числа отказов (по-английски «mean value function», или MVF) [3].

Дальнейшая дифференциация моделей роста надежности ПО (по-английски такая модель называется «software reliability growth model», или SRGM) осуществляется в зависимости от вида выражения для MVF  $\mu(t)$ , а также особенностей дебаггинга. В отношении указанных особенностей принято различать идеальный, или «совершенный» («perfect») и неидеальный, или «несовершенный» («imperfect») дебаггинги.

Для идеального дебаггинга предполагается, что при обнаружении ошибки в программном продукте она полностью (с вероятностью, равной единице) устраняется, и при этом новые ошибки в ПО не вносятся. Напротив, при неидеальном дебаггинге не только вероятность полного устранения ошибки не равна единице, но и существует возможность внесения в ПО новых ошибок. Очевидно, что вторая ситуация более реалистична, но соответствующие ей модели на сегодняшний день являются менее разработанными, нежели модели для идеального дебаггинга.

Остановимся на анализе существующих разновидностей SRGM более подробно.

Модели роста надежности программного обеспечения применительно к ситуации с идеальным дебаггингом

Ниже рассматриваются только некоторые, наиболее известные SRGM.

Как уже отмечалось, различные модели на базе NHPP предполагают задание разных выражений для  $\mu(t)$ . Наиболее «старой» из них следует признать модель Гоэля-Окумото [4], предложенную в 1979 г. Она основывается на уравнении

$$d\mu(t)/dt = b \cdot (a - \mu(t)). \quad (2)$$

В этом уравнении  $\lambda(t) = d\mu(t)/dt$  — значение функции интенсивности отказов ПО в момент времени  $t$ ,  $a = \mu(\infty) = \text{const}$  — ожидаемое общее количество отказов, которое можно обнаружить за неограниченное время, и  $b = \text{const}$  характеризует интенсивность обнаружения отказов (по-английски «fault detection rate»), или FDR.

Из уравнения (2) вытекает следующее выражение для  $\mu(t)$ :

$$\mu(t) = a \cdot (1 - \exp(-bt)), \quad a > 0, \quad b > 0. \quad (3)$$

Позднее, в 1982 г., Гоэль предложил обобщенную модель [5], также базирующуюся на концепции NHPP и предполагающую включение в формулу для  $\mu(t)$  дополнительного параметра  $c$ :

$$\mu(t) = a \cdot (1 - \exp(-bt^c)), \quad a > 0, \quad b > 0, \quad c > 0, \quad (4)$$

где параметры  $b$  и  $c$  отражают качество проведения тестирования ПО.

Несколько SRGM, в частности описанных в работе [6], используют кривые Гомперца или логистические кривые. Для модели, в которой применяется кривая Гомперца, MVF характеризуется выражением

$$\mu(t) = ak^{bt}, \quad a > 0, \quad 0 < b < 1, \quad 0 < k < 1. \quad (5)$$

Здесь  $b$  и  $k$  — параметры, которые могут оцениваться в процессе регрессионного анализа.

Если используется логистическая кривая, соотношение для MVF приобретает вид

$$\mu(t) = \frac{a}{1 + k \exp(-bt)}, \quad a > 0, \quad b > 0, \quad k > 0. \quad (6)$$

Более сложная (S-образная) форма кривой роста надежности с учетом задержки задается моделью Ямады [7]. Она принимает во внимание тот факт, что программисты, осуществляющие поиск ошибок в ПО, первоначально затрачивают некоторое время на освоение данного программного продукта (что и обуславливает задержку). Формула для MVF в этом случае:

Формула для MVF в этом случае:

$$\mu(t) = a \cdot (1 - (1 + bt) \exp(-bt)), \quad a > 0, \quad b > 0. \quad (7)$$

Безусловно, разнообразие моделей роста надежности ПО применительно к предположению об идеальном дебаггинге поставило вопрос о возможности построения универсального описания, из которого каждую модель можно было бы получить как частный случай. Такое описание было предложено в 1998 г. в работе [8]. В ней показано, что модели (3)–(7) при определенных условиях вытекают из уравнения:

$$g(d\mu(t)/dt) = b(t) \cdot (a - g(\mu(t))), \quad (8)$$

где  $g(\bullet)$  — монотонная и дифференцируемая функция действительного переменного.

Так, если  $g(x) = x$ , то из уравнения (8) можно получить (см. работу [9]):

$$d\mu(t)/dt = b(t) \cdot (a - \mu(t)), \quad (9)$$

или

$$\mu(t) = a \cdot (1 - \exp(-B(t))), \quad a > 0, \quad (10)$$

где  $B(t)$  — это FDR для наиболее общей ситуации (когда она зависит от времени  $t$ ) и

$$B(t) = \int_0^t b(t) dt \quad (11)$$

представляет собой кумулятивную FDR.

Нетрудно увидеть, что модель (3) Гоэля-Окумото получается из соотношения (10) при  $b(t) = b = \text{const}$ .

Появление универсального описания моделей роста надежности ПО на базе NHPP обусловило существенный прогресс в развитии указанных SRGM. Тем не менее, оно не решило проблемы преодоления той трудности при их построении, которая вызвана необходимостью задания всех функций, входящих в соотношение (8), а именно —  $g(\bullet)$  и  $b(t)$  в аналитической форме. К сожалению, такое требование противоречит реальному положению дел, связанному с тем, что задать аналитический вид этих функций невозможно в силу недостатка информации (наличия априорной неопределенности).

*Модели роста надежности программного обеспечения применительно к ситуации с неидеальным дебаггингом*

В данном случае дифференциация моделей также связана с реализацией различных подходов к заданию MVF  $\mu(t)$ .

Здесь, в первую очередь, следует сказать о модели, предложенной в 1992 г. Ямадой [10] для ситуаций с неидеальным дебаггингом. Она ориентируется на представление MVF в виде:

$$\mu(t) = a(1 - \exp(-bt))(1 - \alpha/b) + \alpha at, \quad (12)$$

$$a(t) = a(1 + \alpha t),$$

где  $b(t) = b$ ,  $a > 0$ ,  $b > 0$ ,  $\alpha > 0$ . (13)

В этих соотношениях  $a(t)$  — сумма ожидаемого числа исходных ошибок в ПО и новых ошибок, дополнительно внесенных в него к моменту времени  $t$ ,  $b(t)$  — FDR,  $a$ ,  $b$  и  $\alpha$  — постоянные параметры модели. Предполагается, что новые ошибки вносятся в программу при проверках и корректировках.

Модель Фама-Чжана [11], также основанная на NHPP, предполагает, что MVF задается выражениями:

$$\mu(t) = \frac{(c + a)(1 - \exp(-bt))}{1 + \beta \exp(-bt)} - \frac{ab(\exp(-\alpha t) - \exp(-bt)) / (b - \alpha)}{1 + \beta \exp(-bt)}, \quad (14)$$

и  $a(t) = c + a(1 - \exp(-\alpha t))$ ,

$$b(t) = b / (1 + \beta \exp(-bt)), \quad (15)$$

$$a > 0, \quad b > 0, \quad c > 0, \quad \alpha > 0, \quad \beta > 0.$$

Данная модель соответствует случаю, когда новые отказы вносятся в ПО с интенсивностью, которая представляет собой экспоненциальную функцию времени тестирования. В свою очередь, FDR  $b(t)$  характеризуется неубывающей зависимостью от параметра  $\beta$ .

Другой известной SRGM, принимающей во внимание неидеальный дебаггинг, является модель Фама-Нордманна-Чжана (Pham-Nordmann-Zhang, или P-N-Z) [12]. Она базируется на следующей формуле для MVF:

$$\mu(t) = \frac{a((1 - \exp(-bt))(1 - \alpha/b) + \alpha t)}{1 + \beta \exp(-bt)}, \quad (16)$$

где  $a(t) = a(1 + \alpha t)$ ,

$$b(t) = b / (1 + \beta \exp(-bt)), \quad (17)$$

$$a > 0, \quad b > 0, \quad \alpha > 0, \quad \beta > 0.$$

Модель P-N-Z реализует предположение о том, что новые отказы вносятся в ПО с постоянной интенсивностью. Она составляет  $\alpha$  новых ошибок на один обнаруженный отказ.

Аналогично тому, как это имело место с моделями применительно к идеальному дебаггингу, в рассматриваемой ситуации также известен ряд попыток создания универсального описания. При этом ставилось целью, чтобы отдельные модели вытекали из него как частные случаи. Можно заключить, что наибольшими достоинствами в этом отношении обладает описание [13], предложенное в 2005 г. Лю и др. Оно объединяет учет эффективности устранения отказов, рассматриваемой как процентная доля обнаруженных и скорректированных ошибок, и вероятности внесения в ПО новых дефектов. Результирующая модель характеризуется системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} d\mu(t) / dt &= b(t) \cdot (a(t) - y(t)), \\ dy(t) / dt &= p(t) \cdot d\mu(t) / dt, \\ da(t) / dt &= q(t) \cdot d\mu(t) / dt. \end{aligned} \quad (18)$$

Здесь  $y(t)$  — ожидаемое число ошибок, устраненных к моменту времени  $t$ ,  $p(t)$  — эффективность устранения ошибок к моменту  $t$ ,  $q(t)$  — вероятность внесения новых отказов к тому же моменту времени.

Начальные условия для уравнений (18) задаются соотношениями

$$\mu(0) = 0; \quad a(0) = a_0; \quad y(0) = 0, \quad (19)$$

где  $a_0$  обозначает математическое ожидание начального количества ошибок в ПО.

Таким образом, класс SRGM на базе NHPP, учитывающих неидеальный дебаггинг, в последние десятилетия развивается и расширяется, пополняясь новыми моделями. Тем не менее, и в этой области сложилась ситуация, при которой использование моделей роста надежности ПО предполагает задание аналитического вида всех входящих в них функций. Это противоречит факту наличия реальной неопределенности.

Ниже рассматривается возможность преодоления такой трудности, которую способно создать применение специального аппарата, базирующегося на теории интервальнозначных вероятностей.

Новые модификации методик построения моделей роста надежности программного обеспечения: использование интервально-вероятностных описаний

Новые перспективы с точки зрения приближения свойств моделей к реальным условиям открывает использование положений теории «интервальнозначных», или «неточных» («imprecise»), вероятностей, в отношении которых основополагающими работами принято считать монографии [14, 15]. Ряд идей, относящихся к реализации указанного подхода при анализе надежности ПО, изложен в работах [16, 17].

Покажем далее, как отмеченный математический аппарат позволяет оценивать надежность ПО, не вводя требования к заданию в аналитическом виде, например, FDR и соответственно кумулятивной FDR.

Последовательность действий в данном случае выглядит следующим образом.

*Этап 1.* В первую очередь, необходимо привести описание, включенное в модели, к форме, фигурирующей в постановках задач оптимального управления. Покажем это на примере преобразования универсального описания (18).

В задачах оптимального управления рассматриваются системы, динамика которых характеризуется совокупностями дифференциальных уравнений в пространстве состояний [18]:

$$dx_l(t) / dt = \phi_l(x_1(t), \dots, x_r(t), u_1(t), \dots, u_m(t), t), \quad l = 1, 2, \dots, r. \quad (20)$$

Здесь входные сигналы (управления);  $x_l(t)$ ,  $\phi_l(\cdot)$ ,  $l = 1, 2, \dots, r$ , — координаты состояния и заданные функции соответственно.

Применительно к уравнениям (18) обозначим

$$\begin{aligned} u_1(t) &= b(t), & u_2(t) &= -(p(t) - q(t)), \\ x_1(t) &= \mu(t), & x_2(t) &= a(t) - y(t). \end{aligned} \quad (21)$$

Тогда соотношения (18) могут быть переписаны в виде:

$$\begin{aligned} dx_1(t) / dt &= u_1(t)x_2(t) = \phi_1(x_2(t), u_1(t)), \\ dx_2(t) / dt &= u_1(t)u_2(t)x_2(t) = \phi_2(x_2(t), u_1(t), u_2(t)). \end{aligned} \quad (22)$$

Выражения (22) задают модель, относящуюся к числу типовых моделей, применяемых в задачах оптимального управления. Она схематически показана на рисунке 1.

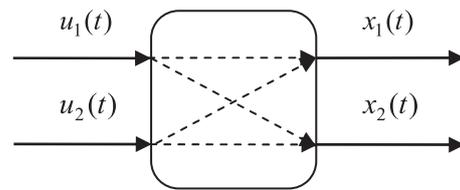


Рисунок 1. Модель для анализа надежности ПО в форме «пространства состояний»

Решение уравнений (22) дает результат

$$\begin{aligned} x_2(t) &= a_0 \exp\left(\int_0^t u_1(\tau)u_2(\tau)d\tau\right) = \\ &= a_0 \exp\left(-\int_0^t \omega(\tau)b(\tau)d\tau\right), \end{aligned} \quad (23)$$

где  $\omega(t) = -u_2(t) = p(t) - q(t)$ ,  
и

$$\begin{aligned} x_1(t) &= a_0 \left( \int_0^t u_1(t) \exp\left(\int_0^t u_1(\tau)u_2(\tau)d\tau\right) dt \right) = \\ &= a_0 \left( \int_0^t b(t) \exp\left(-\int_0^t \omega(\tau)b(\tau)d\tau\right) dt \right). \end{aligned} \quad (24)$$

На практике величина  $\omega(t)$  может быть найдена с помощью экспертного оценивания. При этом эксперты нередко дают информацию только о нижней  $\underline{\omega}$  и верхней  $\bar{\omega}$  границах интервала  $[\underline{\omega}, \bar{\omega}]$ , для которого выполняется

$$0 \leq \underline{\omega} \leq \omega(t) \leq \bar{\omega} \leq 1. \quad (25)$$

Анализ показывает, что в этом случае возникают следующие ограничения на величину MVF:

$$\begin{aligned} \underline{\mu}(t) &\leq \mu(t) \leq \bar{\mu}(t), \\ \underline{\mu}(t) &= a_0(1 - \exp(-\bar{\omega} \cdot B(t))) / \bar{\omega}, \\ \bar{\mu}(t) &= a_0(1 - \exp(-\underline{\omega} \cdot B(t))) / \underline{\omega}. \end{aligned} \quad (26)$$

Таким образом, уже на данном этапе фактически осуществляется переход к интервальным оценкам величины MVF.

*Этап 2.* Необходимо обработать «историю» отказов ПО, информация о которых накоплена за период от начала тестирования до текущего момента времени  $t_k$ . С этой целью можно использовать принцип максимального правдоподобия [19].

Разобьем указанный период  $(0, t_k]$  на  $k$  подинтервалов одинаковой длины:  $(t_0, t_1]$ ,  $(t_1, t_2]$ , ...,  $(t_{k-1}, t_k]$ . При этом  $t_0 = 0$ ,  $t_i - t_{i-1} = \Delta t = t_k / k$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ . Обозначим  $n_i$  число отказов, проявившихся (обнаруженных) в течение подинтервала  $(t_{i-1}, t_i]$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ . Логарифм

функции правдоподобия  $L(n_1, n_2, \dots, n_k)$  для модели на базе NHPP и MVF  $\mu(t)$  применительно ко всему рассматриваемому периоду времени равен:

$$\ln L(n_1, n_2, \dots, n_k) = \sum_{i=1}^k (n_i \ln(\mu(t_i) - \mu(t_{i-1})) - (\mu(t_i) - \mu(t_{i-1})) - \ln(n_i!)). \quad (27)$$

Если  $\mu(t)$  удовлетворяет неравенствам (26), то можно записать

$$\ln L(n_1, n_2, \dots, n_k) \geq \underline{\ln L}(n_1, n_2, \dots, n_k) = \sum_{i=1}^k (n_i \ln(\underline{\mu}(t_i) - \underline{\mu}(t_{i-1})) - (\underline{\mu}(t_i) - \underline{\mu}(t_{i-1})) - \ln(n_i!)). \quad (28)$$

Обозначим  $B(t_i) = B_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, k$ , и примем во внимание, что  $B_0 = 0$  по определению (11). При этом аналитические выражения для  $B(t)$  и соответственно  $b(t)$  будем считать неизвестными.

Тогда, находя частные производные от  $\underline{\ln L}(n_1, n_2, \dots, n_k)$  по  $a_0$ ,  $B_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, k$ , и приравняв их к нулю, можно получить систему уравнений относительно указанных параметров, отражающую необходимые условия достижения максимального правдоподобия. Решение полученной системы нелинейных алгебраических уравнений завершает данный этап оценивания надежности ПО. Отметим, что никаких предположений о наличии информации относительно аналитического вида FDR и вычисляемой на ее основе MVF в предлагаемой процедуре не вводилось.

*Этап 3.* На этом этапе осуществляется собственно оценивание надежности ПО. Следует уточнить, что в качестве показателя надежности программного обеспечения  $R(t^* | s)$ , как правило, выбирается вероятность его безотказного функционирования на определенном интервале времени  $[s, s + t^*]$  и в определенных условиях [20]. Если процесс проявления отказов ПО описывается моделью на базе NHPP, то формула для  $R(t^* | s)$  записывается следующим образом [11]:

$$R(t^* | s) = \exp(-(\mu(t^* + s) - \mu(s))), \quad (29)$$

где  $s \geq t_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ .

Применительно к рассматриваемой ситуации подразумевается, что  $s = t_k$ .

Оценки показателя  $R(t^* | s)$  предлагается искать в виде интервала  $[\underline{R}(t^* | s), \overline{R}(t^* | s)]$ . При

этом его нижняя  $\underline{R}(t^* | s)$  и верхняя  $\overline{R}(t^* | s)$  границы должны удовлетворять неравенствам

$$\underline{R}(t^* | s) \leq R(t^* | s) \leq \overline{R}(t^* | s). \quad (30)$$

Поиск значений  $\underline{R}(t^* | s)$  и  $\overline{R}(t^* | s)$  фактически сводится к соответственно минимизации и максимизации величины показателя (29) при учете ряда ограничений, в качестве которых выступают:

а) результаты обработки «истории» обнаруженных отказов, выполненной на этапе 2 (в частности, они могут послужить основой для экспертного оценивания нижней и верхней границ интервала значений FDR);

б) дифференциальные уравнения (22), представляющие универсальную модель роста надежности ПО;

в) соотношения (25), характеризующие «баланс» эффективности обнаружения дефектов в ПО и вероятности внесения в него новых ошибок.

Как показано в работе [17], такого рода задачи оптимизации могут быть успешно решены с использованием методов, развитых в рамках теории оптимального управления.

Результирующие оценки приобретают вид:

$$\begin{aligned} \underline{R}(t^* | s) &= \exp(-\overline{M}(t^* | s)), \\ \overline{R}(t^* | s) &= \exp(-\underline{M}(t^* | s)), \end{aligned} \quad (31)$$

где

$$\begin{aligned} \underline{M}(t^* | s) &= \int_s^{s+t^*} a_0 \underline{b} \exp(-\overline{\omega} \underline{b} t) dt = \\ &= \frac{a_0}{\overline{\omega}} \left( \exp(-\overline{\omega} \underline{b} s) - \exp(-\overline{\omega} \underline{b} (s + t^*)) \right), \end{aligned}$$

$$\overline{M}(t^* | s) = \frac{a_0}{\underline{\omega}} \left( \exp(-\underline{\omega} \overline{b} s) - \exp(-\underline{\omega} \overline{b} (s + t^*)) \right). \quad (32)$$

Продемонстрированный подход показывает, что надежность программных продуктов с использованием моделей роста их надежности можно оценивать и без введения предварительных допущений об аналитическом виде функций, входящих в эти модели. Между тем, «платой» за это оказывается получение итоговых оценок с точностью до границ содержащих их интервалов. Такие оценки выглядят не столь привлекательно, как «точечные», но они являются более адекватными имеющейся на практике реальной неопределенности.

**Вывод**

Данная публикация содержит подробный анализ текущего состояния проблемы, относящейся к оценке надежности программного обеспечения с помощью моделей роста указанной надежности. Показаны перспективы решения этой проблемы в условиях, когда отсутствуют предварительные сведения об аналитическом виде входящих в модель функций. Таких допущений можно избежать, если применить методы, разработанные в рамках теории интервальнозначных вероятностей. Дальнейшее совершенствование

отмеченных методик может базироваться на ряде результатов, изложенных в публикациях [21–26]. Указанные результаты, в основном, направлены на повышение точности определения границ интервалов для искомых значений показателей надежности. В свою очередь, более адекватные и точные модели позволят добиваться высокого качества разрабатываемых и тестируемых программных продуктов.

### Список литературы

1. Pham H. *System Software Reliability*. London: Springer-Verlag London Ltd, 2006. 456 p.
2. Lai R., Garg M. A Detailed Study of NHPP Software Reliability Models // *Journal of Software*. 2012. Vol. 7. Issue 6. P. 1296–1306. DOI: 10.4304/jsw.7.6.1296-1306.
3. Goel A.L. Software Reliability Models: Assumptions, Limitations, and Applicability // *IEEE Transactions on Software Engineering*. 1985. Vol. SE-11. Issue 12. P. 1411–1423. DOI: 10.1109/TSE.1985.232177.
4. Goel A.L., Okumoto K. A Time Dependent Error Detection Rate Model for Software Reliability and Other Performance Measures // *IEEE Transactions on Reliability*. 1979. Vol. R-28. Issue 3. P. 206–211. DOI: 10.1109/TR.1979.5220566.
5. Goel A.L. Technical Report RADCTR-82-263. *Software Reliability Modelling and Estimation Techniques*. Rome (USA): Rome Air Development Center, 1982. 14 p.
6. Xie M. *Software Reliability Modeling*. Singapore: World Scientific Publishing, 1991. 228 p. DOI: 10.1142/1390.
7. Yamada S., Ohba M., Osaki S. S-Shaped Reliability Growth Modelling for Software Error Detection // *IEEE Transactions on Reliability*. 1983. Vol. R-32. Issue 5. P. 475–484. DOI: 10.1109/TR.1983.5221735.
8. Hou R.H., Kuo S.Y., Chang Y.P. On a Unified Theory of Some Nonhomogeneous Poisson Process Models for Software Reliability // *Software Engineering: Education and Practice (SEEP'98)* — 1998: Proceedings of the International Conference. Washington DC, USA. 1998. P. 60–67. DOI: 10.1109/SEEP.1998.707634.
9. Huang C.-Y., Lyu M.R., Kuo S.Y. Unified Scheme of Some Nonhomogeneous Poisson Process Models for Software Reliability Estimation // *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2003. Vol. 29. Issue 3. P. 261–269. DOI: 10.1109/TSE.2003.1183936.
10. Yamada S., Tokuno K., Osaki S. Imperfect Debugging Models with Fault Introduction Rate for Software Reliability Assessment // *International Journal of Systems Science*. 1992. Vol. 23. No. 12. P. 2241–2252.
11. Zhang X.M., Teng X.L., Pham H. Considering Fault Removal Efficiency in Software Reliability Assessment // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part A: Systems and Humans*. 2003. Vol. 33. Issue 1. P. 114–120. DOI: 10.1109/TSMCA.2003.812597.
12. Pham H., Nordmann L., Zhang X. A General Imperfect Software Debugging Model with S-Shaped Fault Detection Rate // *IEEE Transactions on Reliability*. 1999. Vol. 48. Issue 2. P. 169–175. DOI: 10.1109/24.784276.
13. Liu H.-W., Yang X.-Z., Qu F., Shu Y.-J. A General NHPP Software Reliability Growth Model with Fault Removal Efficiency // *Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2005. Vol. 4. No. 2. P. 144–149.
14. Кузнецов В.П. Интервальные статистические модели. М.: Радио и связь, 1991. 352 с.
15. Walley P. *Statistical Reasoning with Imprecise Probabilities*. London: Chapman and Hall, 1991. 719 p.
16. Krymsky V.G., Ivanov I.V. Applications of Interval-Valued Probabilities and Unified Scheme of Non-Homogeneous Poisson Process Models to Software Failure Prognostics // *Safety and Reliability of Complex Engineered Systems*

— 2015: Proceedings of ESREL 2015 Conference. London, UK. 2015. P. 2403-2411.

17. Krymsky V.G. Software Failure Prognostics: Application of Interval-Valued Probabilities to Assessment of Reliability under Imperfect Debugging // *Safety and Reliability — Theory and Applications — 2017: Proceedings of ESREL'2017 Conference*. London, UK. 2017. P. 847–855.

18. Friedland B. Control System Design: an Introduction to State-Space Methods. New-York: Dover Publications, 2005. 528 p.

19. Xie M., Hong G.Y., Wohlin C. A Practical Method for the Estimation of Software Reliability Growth in the Early Stage of Testing // *Software Reliability Engineering — 1997: Proceedings The Eighth International Symposium*. Albuquerque, New Mexico, USA. 1997. P. 116–123. DOI: 10.1109/ISSRE.1997.630856.

20. Hong G.Y., Xie M., Zhao M., Wohlin C. Interval Estimation in Software Reliability Analysis // *Applied Statistics in Industry — 1997: Proceedings of the 4th International Conference*. Kansas City, Missouri, USA. 1997. P. 105–112.

21. Krymsky V.G. Computing Interval Bounds for Statistical Characteristics Under Expert-Provided Bounds on Probability Density Functions // *Lecture Notes in Computer Science*. 2006. Vol. 3732. P. 151–160.

22. Kozine I.O., Krymsky V.G. Computing Interval-Valued Statistical Characteristics: What is the Stumbling Block for Reliability Applications // *International Journal of General Systems*. 2009. Vol. 38. Issue 5. P. 547–565. DOI: 10.1080/03081070802187798.

23. Kozine I., Krymsky V. Bounded Densities and Their Derivatives: Extension to Other Domains // *Journal of Statistical Theory and Practice*. 2009. Vol. 3. Issue 1. P. 25–38. DOI: 10.1080/15598608.2009.10411909.

24. Kozine I., Krymsky V. An Interval-Valued Reliability Model with Bounded Failure Rates // *International Journal of General Systems*. 2012. Vol. 41. Issue 8. P. 760–773. DOI: 10.1080/03081079.2012.721201.

25. Krymsky V.G. Control Theory Based Uncertainty Model in Reliability Applications // *International Journal of Performability Engineering*. 2014. Vol. 10. No. 5. P. 477–486.

26. Kozine I., Krymsky V. Computing Interval-Valued Reliability Measures: Application of Optimal Control Methods // *International Journal of General Systems*. 2017. Vol. 46. No. 2. P. 144-157. DOI: 10.1080/03081079.2017.1294167.

## References

1. Pham H. *System Software Reliability*. London, Springer-Verlag London Ltd, 2006. 456 p.

2. Lai R., Garg M. A Detailed Study of NHPP Software Reliability Models. *Journal of Software*, 2012, Vol. 7, Issue 6, pp. 1296–1306. DOI: 10.4304/jsw.7.6.1296-1306.

3. Goel A.L. Software Reliability Models: Assumptions, Limitations, and Applicability. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1985, Vol. SE-11, Issue 12, pp. 1411–1423. DOI: 10.1109/TSE.1985.232177.

4. Goel A.L. Okumoto K. A Time Dependent Error Detection Rate Model for Software Reliability and Other Performance Measures. *IEEE Transactions on Reliability*, 1979, Vol. R-28, Issue 3, pp. 206-211. DOI: 10.1109/TR.1979.5220566.

5. Goel A.L. Technical Report RADC-TR-82-263. *Software Reliability Modeling and Estimation Techniques*. Rome (USA), Rome Air Development Center, 1982. 14 p.

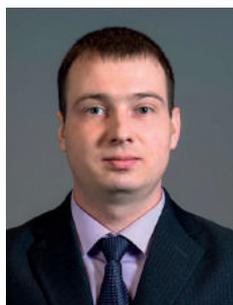
6. Xie M. *Software Reliability Modeling*. Singapore, World Scientific Publishing, 1991. 228 p. DOI: 10.1142/1390.

7. Yamada S., Ohba M., Osaki S. S-Shaped Reliability Growth Modeling for Software Error Detection. *IEEE Transactions on Reliability*, 1983, Vol. R-32, Issue 5, pp. 475-484. DOI: 10.1109/TR.1983.5221735.

8. Hou R.H., Kuo S.Y., Chang Y.P. On a Unified Theory of Some Nonhomogeneous Poisson Process Models for Software Reliability. *Proceedings of the International Conference «Software Engineering: Education and Practice (SEEP'98) — 1998»*. Washington DC, USA, 1998, pp. 60–67. DOI: 10.1109/SEEP.1998.707634.

9. Huang C.-Y., Lyu M.R., Kuo S.Y. Unified Scheme of Some Nonhomogeneous Poisson Process Models for Software Reliability Estimation. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2003, Vol. 29, Issue 3, pp. 261–269. DOI: 10.1109/TSE.2003.1183936.

10. Yamada S., Tokuno K., Osaki S. Imperfect Debugging Models with Fault Introduction Rate for Software Reliability Assessment. *International Journal of Systems Science*, 1992, Vol. 23, No. 12, pp. 2241–2252.
11. Zhang X.M., Teng X.L., Pham H. Considering Fault Removal Efficiency in Software Reliability Assessment. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part A: Systems and Humans*, 2003, Vol. 33, Issue 1, pp. 114–120. DOI: 10.1109/TSMCA.2003.812597.
12. Pham H., Nordmann L., Zhang X. A General Imperfect Software Debugging Model with S-Shaped Fault Detection Rate. *IEEE Transactions on Reliability*, 1999, Vol. 48, Issue 2, pp. 169–175. DOI: 10.1109/24.784276.
13. Liu H.-W., Yang X.-Z., Qu F., Shu Y.-J. A General NHPP Software Reliability Growth Model with Fault Removal Efficiency. *Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2005, Vol. 4, No. 2, pp. 144–149.
14. Kuznetsov V.P. *Interval'nye statisticheskie modeli* [Interval Statistical Models]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1991. 352 p. [in Russian].
15. Walley P. *Statistical Reasoning with Imprecise Probabilities*. London, Chapman and Hall, 1991. 719 p.
16. Krymsky V.G., Ivanov I.V. Applications of Interval-Valued Probabilities and Unified Scheme of Non-Homogeneous Poisson Process Models to Software Failure Prognostics. *Proceedings of ESREL 2015 Conference «Safety and Reliability of Complex Engineered Systems — 2015»*. London, UK, 2015, pp. 2403–2411.
17. Krymsky V.G. Software Failure Prognostics: Application of Interval-Valued Probabilities to Assessment of Reliability under Imperfect Debugging. *Proceedings of ESREL' 2017 Conference «Safety and Reliability — Theory and Applications — 2017»*. London, UK, 2017, pp. 847–855.
18. Friedland B. *Control System Design: an Introduction to State-Space Methods*. New-York, Dover Publications, 2005. 528 p.
19. Xie M., Hong G.Y., Wohlin C. A Practical Method for the Estimation of Software Reliability Growth in the Early Stage of Testing. *Proceedings the Eighth International Symposium «Software Reliability Engineering — 1997»*. Albuquerque, New Mexico, USA, 1997, pp. 116–123. DOI: 10.1109/ISSRE.1997.630856.
20. Hong G.Y., Xie M., Zhao M., Wohlin C. Interval Estimation in Software Reliability Analysis. *Proceedings of the 4th International Conference «Applied Statistics in Industry — 1997»*. Kansas City, Missouri, USA, 1997, pp. 105–112.
21. Krymsky V.G. Computing Interval Bounds for Statistical Characteristics Under Expert-Provided Bounds on Probability Density Functions. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, Vol. 3732, pp. 151–160.
22. Kozine I.O., Krymsky V.G. Computing Interval-Valued Statistical Characteristics: What is the Stumbling Block for Reliability Applications. *International Journal of General Systems*, 2009, Vol. 38, Issue 5, pp. 547–565. DOI: 10.1080/03081070802187798.
23. Kozine I., Krymsky V. Bounded Densities and Their Derivatives: Extension to Other Domains. *Journal of Statistical Theory and Practice*, 2009, Vol. 3, Issue 1, pp. 25–38. DOI: 10.1080/15598608.2009.10411909.
24. Kozine I., Krymsky V. An Interval-Valued Reliability Model with Bounded Failure Rates. *International Journal of General Systems*, 2012, Vol. 41, Issue 8, pp. 760–773. DOI: 10.1080/03081079.2012.721201.
25. Krymsky V.G. Control Theory Based Uncertainty Model in Reliability Applications, *International Journal of Performability Engineering*, 2014, Vol. 10, No. 5, pp. 477–486.
26. Kozine I., Krymsky V. Computing Interval-Valued Reliability Measures: Application of Optimal Control Methods. *International Journal of General Systems*, 2017, Vol. 46, No. 2, pp. 144–157. DOI: 10.1080/03081079.2017.1294167.



**Дмитриев А. А.**  
**Dmitriev A. A.**

кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Автомобильный транспорт,  
строительные и дорожные машины»,  
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный  
университет»,  
г. Тюмень, Российская Федерация



**Герасимов В. Е.**  
**Gerasimov V. E.**

ассистент кафедры  
«Электроэнергетика», ФГБОУ  
ВО «Тюменский индустриальный  
университет»,  
г. Тюмень, Российская Федерация

УДК 621.311.1

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-70-76

## **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА**

В данной статье описаны инструменты, применяемые для перехода объектов электросетевого комплекса в цифровой формат, такие как система сбора, обработки, хранения и передачи данных, система предиктивной диагностики оборудования, отдельно выделена система технологического видеонаблюдения, указано ее отличие от традиционно применяемой системы охранного видеонаблюдения. Приводится описание процессов, для которых должна использоваться система технологического видеонаблюдения, таких как визуальный контроль за техническим состоянием основного силового электрооборудования, рабочим положением его частей, положением в момент коммутации и после нее, контроль за перемещениями оперативного персонала по объекту, выполняемыми им действиями, контроль за негативными погодными факторами, проникновением животных и птиц. В статье приведены планы расположения камер системы технологического видеонаблюдения на территории открытых и закрытых распределительных устройств, приведен типовой узел их установки. Даны требования к техническим параметрам видеокамер с учетом мест их размещения, важности получаемой с них первичной информации, особое внимание уделено важности соблюдения мер по кибернетической безопасности. Предложена требуемая категория по надежности электроснабжения рассматриваемой системы, указано на необходимость выполнения мер по молниезащите, защитному заземлению, защите от заноса высокого потенциала на оборудование. В данной статье приведены требования к событиям, на которые должен реагировать логический и аналитический модуль системы технологического видеонаблюдения (пожар, утечка вещества, сопровождающееся выделением белого пара, изменение нормального звукового режима работы оборудования, изменение штатного кадра нормальной работы оборудования и другие). Проведен анализ передовых зарубежных разработок в этом направлении, определено направление, в котором необходимо продолжать совершенствование аналитического модуля (анализ мимики обслуживающего персонала, наличие усталости, рассеивания внимания) для снижения человеческого фактора при обслуживании электроустановок.

**Ключевые слова:** электроснабжение, технологическое видеонаблюдение, видеокамера, безопасность, оперативные переключения, силовое электрооборудование.

## ANALYSIS OF OPPORTUNITIES AND PROSPECTS FOR APPLICATION OF THE SYSTEM OF TECHNOLOGICAL VIDEO SURVEILLANCE AT THE OBJECTS OF THE POWER GRID COMPLEX

This article describes the tools used for the transition of objects of the power grid complex in a digital format, such as the system of collection, processing, storage and transmission of data, the system of predictive diagnostics of equipment, a separate system of technological video surveillance, its difference from the traditionally used system of video surveillance. The article describes the processes for which the technological video surveillance system should be used, such as visual control over the technical condition of the main power electrical equipment, the working position of its parts, the position at the time of switching and after it, control over the movements of operational personnel on the object, their actions, control over negative weather factors, the penetration of animals and birds. The article presents the plans for the location of cameras of the technological video surveillance system on the territory of open and closed switchgear, a typical node of their installation. Requirements to technical parameters of video cameras taking into account places of their placement, importance of the primary information received from them are given, special attention is paid to importance of observance of measures on cybernetic safety. Proposed desired category of power supply reliability of the system, indicated the need for implementation of measures on lightning protection, protective grounding, protection from the introduction of high capacity equipment. This article provides requirements for events, which must respond in a logical and analytical module of the system of technological surveillance (fire, leakage of substances, accompanied by the release of white vapor, a change in the normal audio mode of operation of the equipment, the change of standard frame normal operation) and others. The analysis of advanced foreign developments in this direction is carried out, the direction in which it is necessary to continue improving the analytical module (analysis of facial expressions of the staff, the presence of fatigue, distraction) to reduce the human factor in the maintenance of electrical installations is determined.

**Key words:** power supply, technological video surveillance, video camera, security, operational switching, power electrical equipment.

В рамках развития и модернизации энергосистемы, электросетевых комплексов, что является одной из приоритетных национальных задач, важным направлением является ее цифровизация, т.е. внедрение «умных» технологий, позволяющих управлять процессом производства и распределения электроэнергии, адаптироваться под меняющиеся графики нагрузок, обеспечивать при этом нормируемое качество электроэнергии, безопасность процесса и его режимную управляемость, надежность и экономичность. Есть большое количество решений, предлагаемых для достижения этих целей, таких как внедрение комплексной системы сбора, обработки, хранения и передачи данных (E-SCADA), внедрение систем предиктивной диагностики основного энергетического оборудования, позволяющее проводить его ремонт не по регламенту, а по текущему состоянию, предугадывая его внезапный выход из строя и развитие аварийной

ситуации. Внедрение современных систем релейной защиты и автоматики, обменивающихся параметрическими и диагностическими сигналами между собой на горизонтальном уровне, оптических датчиков тока и напряжения, обвязка полевого оборудования оптическими линиями связи, применение систем постоянной диагностики состава масла в силовых трансформаторах высокого класса напряжения — все это позволяет добиваться существенных результатов в части повышения управляемости, долговечности и надежности энергосистемы.

Среди этих инструментов отдельно хотелось бы выделить организацию технологического видеонаблюдения на электросетевых объектах как средство, позволяющее минимизировать влияние человеческой ошибки на риск возникновения и развития аварии, исключить человеческие жертвы из числа оперативного персонала при возникновении внезапной внештатной ситуации.

На особенно ответственных объектах уже существует система охранного видеонаблюдения, предназначенная для контроля за проникновением за периметр подстанции, осуществляющая контроль за входами, въездами на территорию, направленная на недопущение несанкционированного проникновения на электросетевой объект посторонних лиц.

Система технологического видеонаблюдения является отдельной системой и предназначена для выполнения следующих функций:

- визуальный контроль за положением коммутационных аппаратов и их текущим внешним состоянием;
  - контроль за работой вентиляторов системы охлаждения мощных силовых трансформаторов;
  - проверка успешности выполнения технологических операций (отключение выключателя, соединение контактов заземляющих ножей, переключение устройства РПН);
  - проверка наличия снега, гололеда, птиц, животных в зоне установки силового электрооборудования;
  - контроль за срабатыванием системы автоматического пожаротушения;
  - осуществление функции удаленного допуска к проведению работ;
  - общий осмотр оборудования на месте непосредственно перед началом переключений (напрямую установлено СТО 59012820.29.020.005-2011 [1]);
  - контроль за ходом выполнения оперативных переключений и ремонтных работ, более быстрая помощь в случае необходимости принятия решений;
  - удаленный контроль за соблюдением правил безопасности и правил по охране труда при эксплуатации электроустановок [2].
- Технически реализация данных мероприятий представляет собой оснащение камерами видеонаблюдения открытых и закрытых распределительных устройств, камер с силовыми трансформаторами, дугогасящими реакторами и другим силовым оборудованием, установку на каждом объекте сервера видеорегистрации, сетевого оборудования для подключения видеокамер, выделение

логической подсети, настройку и наладку всего оборудования.

Пример расположения камер на территории открытого распределительного устройства (ОРУ) ПС 220/10 кВ приведен на рисунке 1, на рисунке 2 — типовой узел размещения камеры системы технологического видеонаблюдения.

Для устойчивой, корректной и долговременной работы с выполнением всех необходимых функций видеокамеры должны обладать следующими характеристиками:

- объектив 4,5–135 мм, F1.6–F4.4, 30-кратный оптический трансфокатор;
- матрица с прогрессивной разверткой 1/2,8";
- основной поток со скоростью передачи до 50/60 кадров в секунду;
- второй и третий потоки со скоростью передачи до 25/30 кадров в секунду;
- электронная стабилизация изображения (EIS);
- широкий динамический диапазон (WDR) 120 дБ;
- прочный корпус со степенью защиты от вандализма IK10, допускающий установку камеры на улице;
- водонепроницаемый корпус с классом защиты IP67;
- встроенные возможности для обеспечения кибербезопасности (цифровая подпись);
- web-интерфейс для удаленного конфигурирования, просмотра видеоизображения и управления;
- рабочая температура: от минус 10 °С до 60 °С (холодный старт);
- режимы фокусировки: ручной / автоматический / автофокусировка при использовании функции PTZ / автофокусировка при управлении трансфокатором;
- диапазон панорамирования: 360° (непрерывно);
- диапазон наклона: 0°... 90°, автоматический переворот изображения на 180°;
- автовключение после отключения электропитания;
- отслеживание движущегося объекта, автоматическое сопровождение;
- обнаружение звуков.

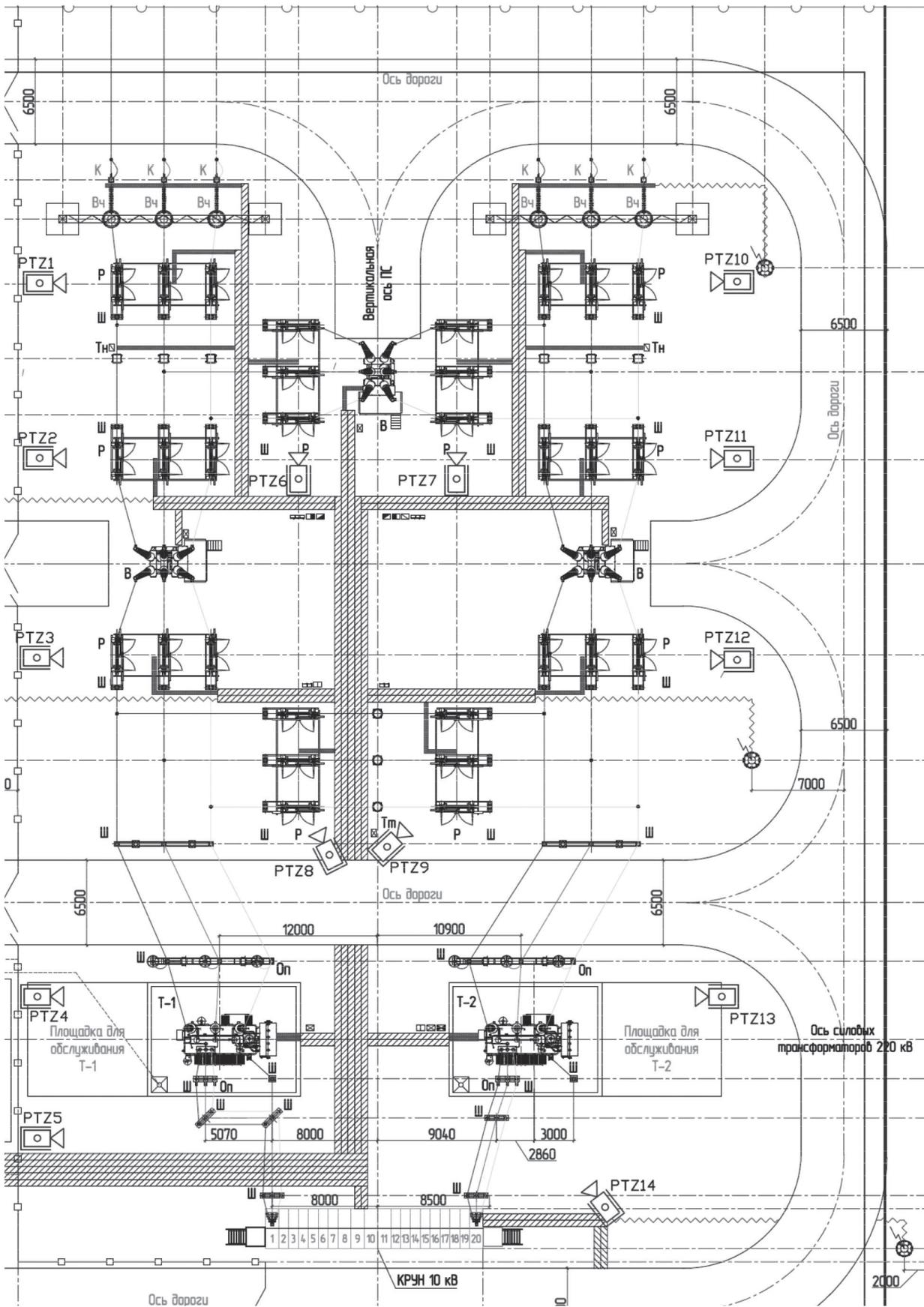


Рисунок 1. Размещение камер на территории ОРУ ПС 220/10 кВ



Рисунок 2. Типовой узел размещения камеры [3]

Вопрос кибербезопасности является также крайне важным на объекте с высоким уровнем цифровизации, поэтому камеры технологического видеонаблюдения, сети передачи, обработки и хранения данных должны иметь несколько уровней доступа пользователей с усиленной политикой паролей, IP-фильтрацию, IEEE 802.1x, дайджест-аутентификацию доступа, перенаправление на HTTPS только с защищенным протоколом TLS1.2 и алгоритм AES-256 с высокой степенью защиты, отключение связи SSH/Telnet и FTP для уменьшения площади атаки, соответствие требованиям PCI-DSS, встроенный набор микросхем для обеспечения кибербезопасности.

Для обеспечения совместной работы с другим оборудованием, возможности развития системы должна быть обеспечена универсальность компонентов системы технологического видеонаблюдения, обеспечиваемая в том числе широким спектром поддерживаемых рабочих протоколов: IPv4/v6, TCP/IP, UDP, RTP, RTSP, HTTP, HTTPS, SSL, ICMP, FTP, SMTP, DHCP, PPPoE, UPnP, IGMP, SNMP, Bonjour, DNS, DDNS, IEEE 802.1x, QoS, NTP, IP Filter, ONVIF и др.

Электропитание системы технического видеонаблюдения должно осуществляться по I категории надежности согласно ПУЭ. Для реализации бестоковой паузы в качестве второго независимого источника питания должен выступать ИБП. Для видеокамер и магистральных линий, расположенных на открытом воздухе, необходимо предусматривать устройства защиты от прямых ударов молнии, а также от заноса высоких потенциалов по цепям питания и цепям передачи данных путем установки УЗИП. Система видеонаблюдения должна быть связана с системами охранной и пожарной сигнализации.

Камеры технологического видеонаблюдения, устанавливаемые в закрытых распределительных устройствах (ЗРУ), допускается использовать с более низкими техническими характеристиками, достаточность которых должна определяться при комплексной проработке и компоновке ЗРУ. При размещении необходимо ориентироваться на возможности камер по оптической трансфокации, диапазону панорамирования и наклона, геометрию помещения и схему расположения ячеек, выполняя требование по визуальному охвату всех ячеек. Пример расположения камер приведен на рисунке 3.

ЗРУ должно компоноваться камерами видеонаблюдения исходя из принципа достаточной разумности визуального контроля за состоянием коммутационных аппаратов и состоянием ячейки. Текущее состояние всех коммутационных аппаратов ячейки должно отображаться на лицевой панели ячейки для обеспечения возможности их считывания с помощью видеокамеры.

Основная часть разработки системы технологического видеонаблюдения — выполнение программного логического модуля, обрабатывающего поступающую информацию и выдающего информирующие или управляющие сигналы дежурному оперативному персоналу, либо конечному силовому электрооборудованию.

Должно выполняться распознавание аналитической системой следующих событий:

- для всего основного вращающегося оборудования, испытывающего динамиче-

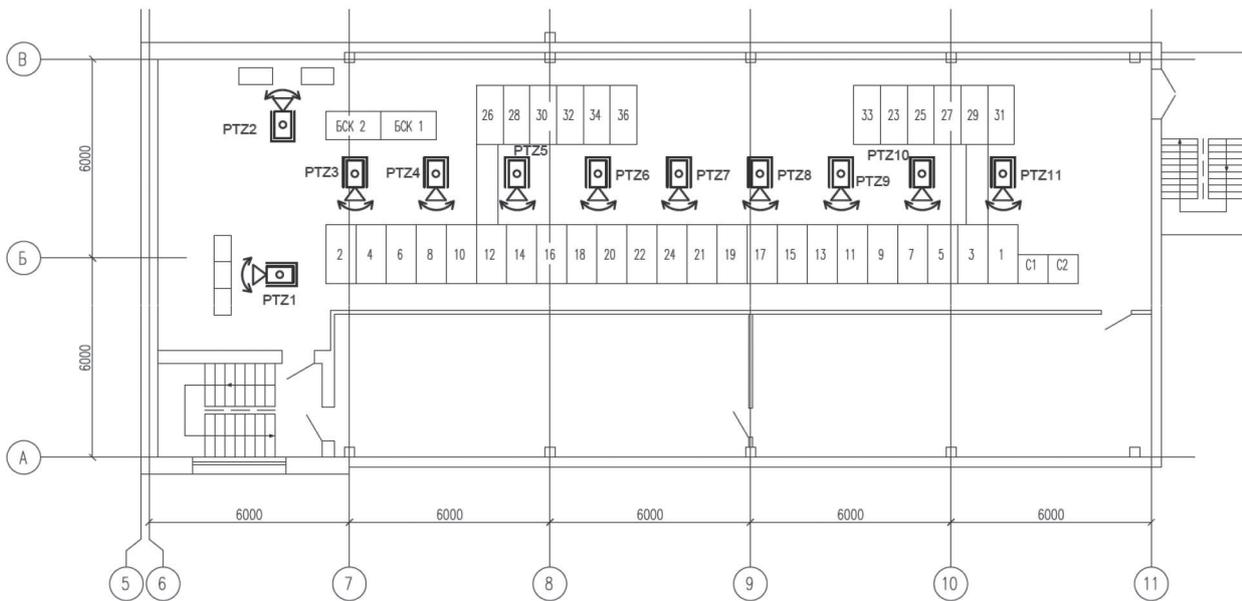


Рисунок 3. Пример расположения камер в ЗРУ

ские нагрузки (пожар, утечка вещества, сопровождающееся выделением белого пара, изменение нормального звукового режима работы оборудования, изменение штатного кадра нормальной работы оборудования (нарушение изоляции и т.п.));

— для статичного оборудования (пожар, утечка вещества, сопровождающееся выделением белого пара, изменение нормального звукового режима работы оборудования, изменение штатного кадра нормальной работы оборудования (нарушение изоляции и т.п.));

— для подходов к технологическому оборудованию и проходам между отдельными модулями (наличие человека в зоне технологической установки (PTZ), пожар, утечка вещества, сопровождающееся выделением белого пара).

Локально должна быть предусмотрена возможность интеграции с системами пожарной сигнализации и противоаварийной защиты для обеспечения автоматической активации камер из зоны обнаружения нештатной ситуации.

В качестве перспективной функции необходимо обеспечить распознавание лиц с помощью камер технологического наблюдения. Так, можно будет не только осуществлять допуск к проведению работ ограниченного, заранее утвержденного круга лиц, но и отследить эмоциональное, психологическое

состояние человека, усталость, отсутствие внимания и концентрации при выполнении работ, что поможет исключить человеческий фактор и снизить риск возникновения аварийной ситуации. Есть пример реализованных решений подобного рода в Китае, на предприятиях социального сектора [4].

#### Вывод

Приведены планы расположения камер системы технологического видеонаблюдения на территории открытых и закрытых распределительных устройств, приведен типовой узел их установки. Даны требования к техническим параметрам видеокамер с учетом мест их размещения, важности получаемой с них первичной информации, особое внимание уделено важности соблюдения мер по кибернетической безопасности. Предложена требуемая категория по надежности электропитания рассматриваемой системы, указано на необходимость выполнения мер по молниезащите, защитному заземлению, защите от заноса высокого потенциала на оборудование. Приведены требования к событиям, на которые должен реагировать логический и аналитический модуль системы технологического видеонаблюдения (пожар, утечка вещества, сопровождающееся выделением белого пара, изменение нормального звукового режима работы оборудования, изменение штатного кадра нормальной работы оборудования и другие).

### Список литературы

1. СТО 59012820.29.020.005-2011. Стандарт организации. Правила переключений в электроустановках. М.: ОАО «СО ЕЭС», 2011. 111 с.
2. Требование к видеонаблюдению на ПС 750 кВ Ленинградская // Energy Solutions. URL: <http://belenergetics.ru/ps-110-220/trebovanie-k-videonablyudeniyu-na-ps-750-kv-leningradskaya/> (дата обращения: 07.09.2019).
3. Системы видеонаблюдения электрических подстанций (СВН ПС). Решения ООО «Хартэп» // Хартэп. URL: [http://khartep.com/images/users/SVN\(2\).pdf](http://khartep.com/images/users/SVN(2).pdf) (дата обращения: 07.09.2019).
4. Григорьева Т. Следи за мимикой: система распознавания лиц не позволит школьникам в Китае мечтать на уроках // Nation News. 19.05.2018. URL: <https://nation-news.ru/367409-sledi-za-mimikoi-sistema-raspoznavaniya-lic-ne-pozvolit-shkolnikam-v-kitae-mechtat-na-urokakh> (дата обращения: 07.09.2019).

### References

1. *STO 59012820.29.020.005-2011. Standard organizatsii. Pravila pereklyuchenii v elektroustanovkakh* [STO 59012820.29.020.005-

2011. Standard of Organization. The Rules of Switching in Electrical Installations]. Moscow, ОАО «SO EES» Publ., 2011. 111 p. [in Russian].

2. Trebovanie k videonablyudeniyu na PS 750 kV Leningradskaya [Requirement for Video Surveillance at 750 kV Leningradskaya Substation]. *Energy Solutions*. Available at: <http://belenergetics.ru/ps-110-220/trebovanie-k-videonablyudeniyu-na-ps-750-kv-leningradskaya/> (accessed 07.09.2019). [in Russian].

3. Sistemy videonablyudeniya elektricheskikh podstantsii (SVN PS). Resheniya ООО «Khartep» [Video Surveillance Systems of Electrical Substations (SVN PS). Solutions of Khartep LLC]. *Khartep*. Available at: [http://khartep.com/images/users/SVN\(2\).pdf](http://khartep.com/images/users/SVN(2).pdf) (accessed 07.09.2019). [in Russian].

4. Grigoreva T. Sledi za mimikoi: sistema raspoznavaniya lits ne pozvolit shkol'nikam v Kitae mechat' na urokakh [Watch Your Facial Expressions: Facial Recognition System will not Allow Students in China to Dream in the Classroom]. *Nation News*. 19.05.2018. Available at: <https://nation-news.ru/367409-sledi-za-mimikoi-sistema-raspoznavaniya-lic-ne-pozvolit-shkolnikam-v-kitae-mechtat-na-urokakh> (accessed 07.09.2019). [in Russian].



**Шарипов М. И.**

**Sharipov M. I.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Автоматизированные технологические  
и информационные системы»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной  
технический университет», филиал,  
г. Стерлитамак, Российская Федерация

УДК 62.52

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-77-84

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОБЫЧИ НЕФТИ НА НЕФТЯНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ С ПОМОЩЬЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Главной особенностью нейронных сетей является способность к самообучению, имеется также ряд других сопутствующих достоинств, таких как гибкость структуры, быстрый алгоритм самообучения, эффективное выстраивание нелинейных отображений, возможность работы с независимыми переменными и множество других, позволяющих решать широкий круг сложных задач прогноза, классификации и диагностики. С помощью метода нейронных сетей можно решать несколько задач одновременно на едином наборе входных сигналов, имея при этом некоторое количество выходов. Данный метод позволяет построить универсальные промежуточные концепции и вследствие этого повысить точность решения многих задач. В статье представлена разработанная система управления кустом нефтяных скважин с использованием нейронных сетей. Объектом управления является совокупность нефтедобывающих скважин. Поставлена задача усовершенствования управления процессом добычи нефти с помощью использования нейронных сетей для учета параметров нефтедобычи из всех скважин куста. Для управления двигателями насосов с учетом взаимного влияния параметров всех скважин была разработана нейронная сеть, управляющая процессом нефтедобычи с куста с шестью скважинами, имеющая восемнадцать входных и двенадцать выходных параметров. Нейронная сеть способна регулировать частоту вращения добывающего и нагнетательного насосов, на основе показаний датчиков, контролирующего затрубное, пластовое и буферное давление. Если пластовое давление станет низким, система управления выдаст управляющее воздействие для повышения скорости вращения нагнетательного насоса, оставив частоту вращения добывающего неизменной. При повышении затрубного давления частота вращения добывающего насоса понизится (тем самым будет предотвращено появление аварийной ситуации), также уменьшится частота вращения нагнетательного насоса. При увеличении буферного давления частота вращения добывающего насоса снизится, а частота вращения нагнетательного насоса останется неизменной.

**Ключевые слова:** куст скважин, добывающий насос, нагнетательный насос, частота вращения, система управления, разработка системы управления.

## CONTROL SYSTEM FOR INCREASING OIL PRODUCTION RATE AT AN OIL FIELD WITH THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

The main feature of neural networks is its self-learning ability, and a number of other related advantages, such as structure flexibility, fast self-learning algorithm, efficient alignment of non-linear mappings, the ability to work with independent variables, and many others, allowing to solve a wide range of complex problems for forecasting, classification and diagnosis. It is able to solve several problems simultaneously on a single set of input signals, while having a certain number of outputs. This method allows you to build multipurpose intermediate concepts and as a

result allows increasing the accuracy of solving many problems. A control system for oil wells cluster using neural networks is developed in this article. The control object is a oil wells cluster. The goal was set to improve the control of the oil production process using neural networks in order to take into consideration the oil production parameters from all wells in the cluster. To control the current frequency, taking into account also the mutual influence of the parameters of all wells, a neural network was developed that controls the process of oil production from a cluster of six wells, which has eighteen input and twelve output parameters. The neural network is able to control the rotation speed of the production and injection pumps, based on the readings of sensors monitoring the annular, reservoir and buffer pressure. If the reservoir pressure decreases, the control system will give a control action to increase the speed of the injection pump, leaving the rotation speed of the production pump unchanged. With an increase in annular pressure, the rotation speed of the production pump will decrease (thereby preventing an emergency), and the rotation speed of the injection pump will also decrease. As the buffer pressure increases, the speed of the production pump decreases, and the speed of the pressure pump remains unchanged.

**Key words:** cluster of wells, production pump, injection pump, rotation speed, control system, development of a control system.

В последнее время в нефтедобыче актуальна проблема истощения нефтедобывающих пластов, вследствие чего появился ряд задач:

- как сократить простои скважин;
- как увеличить коэффициент эксплуатации оборудования;
- как улучшить вытеснение нефти;
- как учитывать взаимное влияние параметров во время нефтедобычи.

С целью решения этих вопросов предлагается комплексная интеллектуализация нефтяного месторождения с помощью использования искусственного интеллекта для управления процессом добычи нефти [1].

Одной из попыток решения указанных задач является разработка системы управления кустом скважин интеллектуального месторождения с помощью нейронной сети (НС).

#### *Разработка нейронной сети для интеллектуального управления процессом добычи нефти*

Для реализации интеллектуальной системы управления (ИСУ) с использованием НС необходимо собрать данные для ее обучения. Обучающий набор данных представляет собой набор значений входных и выходных переменных объекта, необходимый для ее обучения.

Перед тем, как создать таблицу с обучающим набором выборки, определим, какие входные переменные оказывают влияние на процесс нефтедобычи, а также взаимное влияние.

В многосвязной системе данного процесса необходимо учесть входные и выходные переменные для управления процессом нефтедобычи, которые приведены в таблицах 1 и 2.

**Таблица 1.** Входные переменные

Входные переменные	Допустимые значения, МПа	Значения нормального технологического режима, МПа
Давление в затрубном пространстве	9–20	8–18
Пластовое давление	8–17	7–16
Буферное давление	5–15	4–15

**Таблица 2.** Выходные переменные

Выходные переменные	Значение, Гц
Частота тока частотного преобразователя нагнетательной установки	35–60
Частота тока частотного преобразователя добывающей установки	35–60

Для определения частоты тока частотного преобразователя нагнетательной и добывающей установок нам необходимо знать: давление в затрубном пространстве (РТ001), пластовое (РТ003) и буферное дав-

ление (РТ002). Для этого в систему управления необходимо подать сигналы с датчиков давления, расположенных на устье скважины (РТ001 и РТ002) и на забое (РТ003) (рисунок 1).

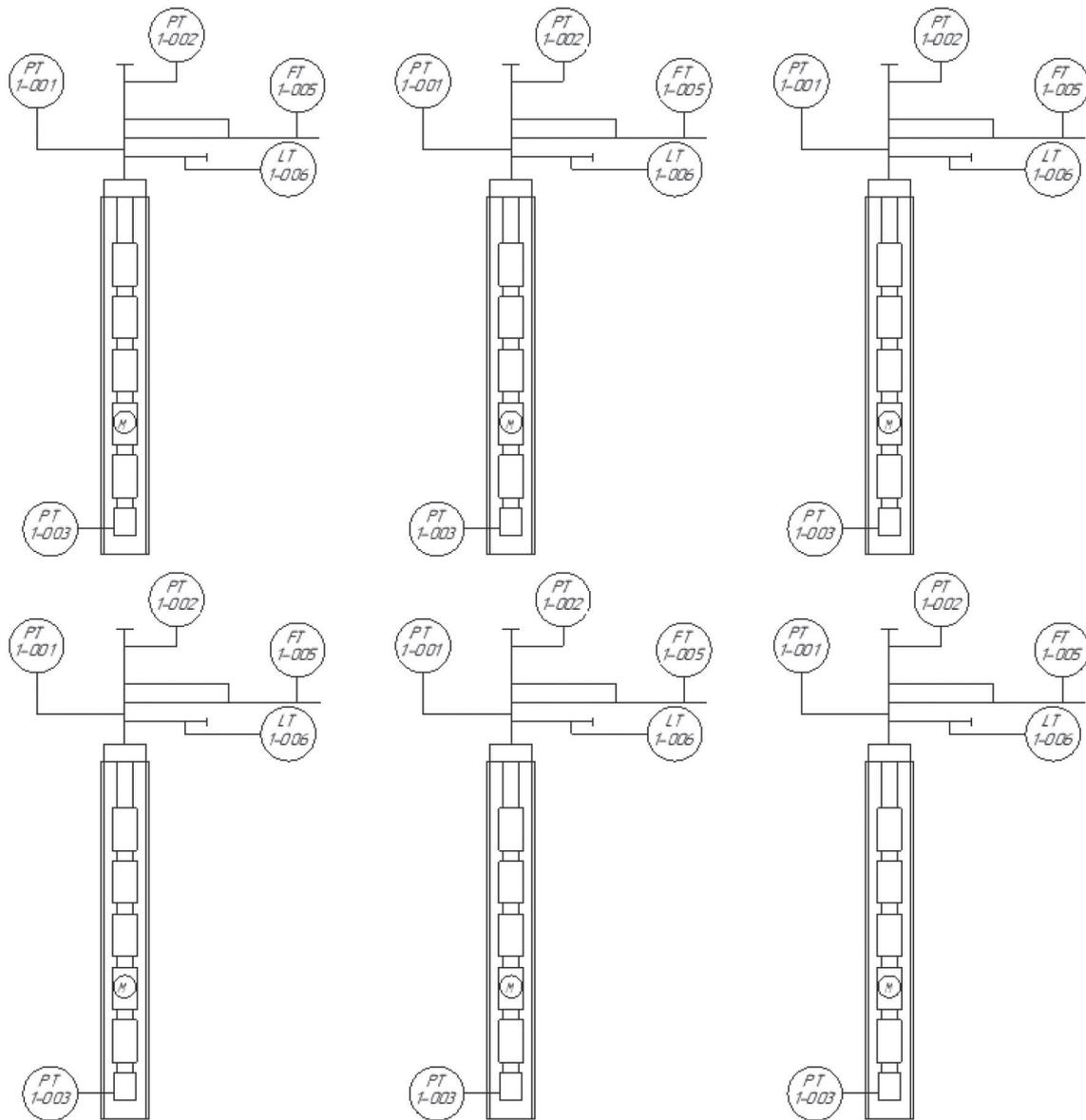


Рисунок 1. Скважины с датчиками

Учитывая данную взаимосвязь параметров, сформируем обучающую выборку для разработки, обучения и тестирования НС.

На рисунке 1 показано расположение скважин на одном нефтедобывающем кусте. Каждая скважина имеет по 3 входных (таблица 1) и по 2 выходных переменных (таблица 2). Учитывая, что на пласте расположено 6 скважин, то общее число входных переменных будет равно 18, а выходных — 12 [2]. ИСУ на основе НС будет управлять добычей сразу из 6 скважин куста, учитывая параметры каждой скважины.

На вход НС подаются по 3 значения на каждой из 6 добывающих и нагнетательных насосов. Таким образом, на выход НС влияют 18 переменных.

Сформируем обучающую выборку для НС. Запишем полученные данные в таблицу, которая состоит из 17433 примеров и учитывает все переменные, оказывающие влияние на процесс нефтедобычи и задействованные в процессе добычи.

После создания обучающей выборки приступим непосредственно к разработке НС. Для этого выберем тип и архитектуру НС, наиболее подходящие для решения задачи.

*Выбор типа и архитектуры нейронных сетей*

На основе экспериментальных результатов обучения установлено необходимое число нейронов в скрытом слое, оно равно 50. Нейронная сеть состоит из двух слоев: 1 — скрытый слой, 2 — выходной слой (рисунок 2).

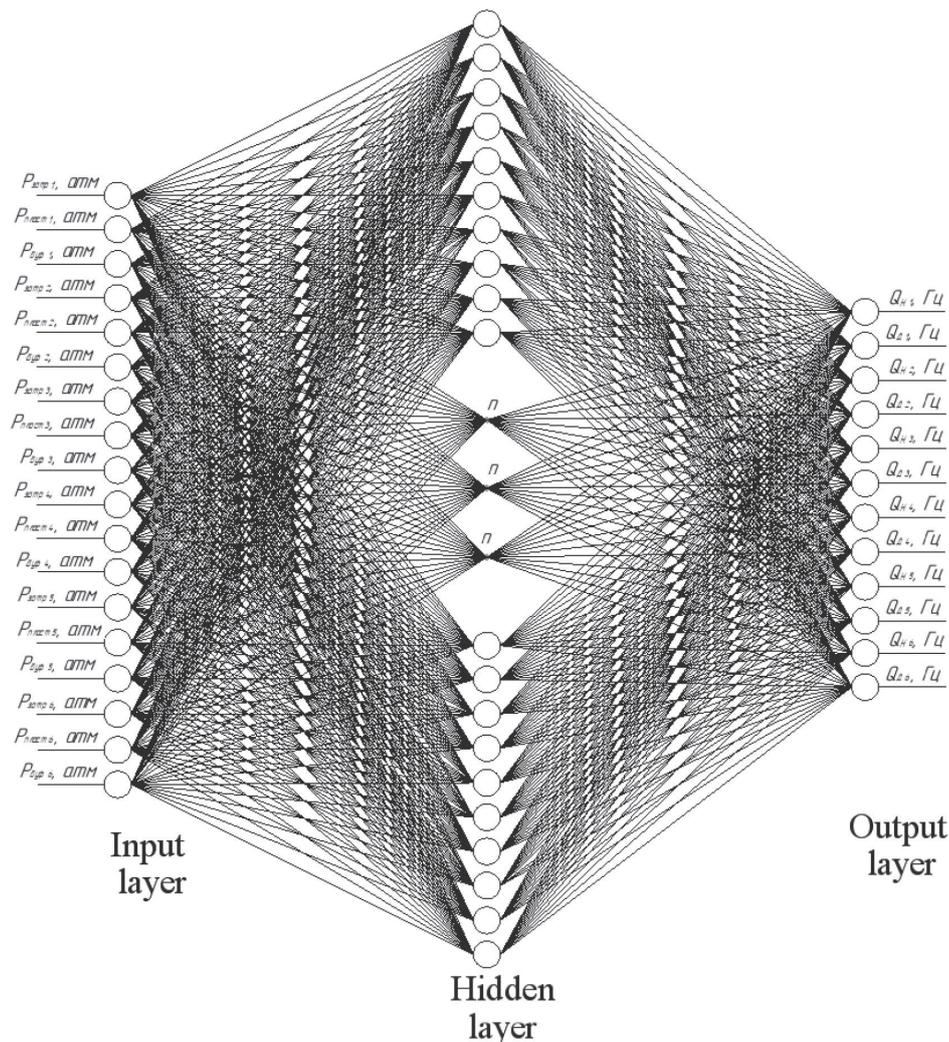


Рисунок 2. Структурная схема нейронной сети

Структурная схема нейронной сети (рисунок 2) включает в себя 18 входных переменных (таблица 3) и 12 выходных (таблица 4).

Обучение НС будет происходить в соответствии с алгоритмом оптимизации Левенберга-Марквардта. Данный алгоритм минимизирует комбинации квадратов ошибок и весов, затем определяется скорректированная комбинация, которая обеспечивает улучшение обучающей способности сети.

После выбора архитектуры нейронной сети приступим к ее построению и обучению с использованием обучающей выборки.

Структура НС включает в себя 18 входов, 12 выходов и скрытые слои (Hidden и Output), где происходит линейное преобразование «весовой» матрицы.

График Gradient показывает, как изменялся градиент функционала ошибки обучения по весам нейронной сети. Веса сети рассматриваются как аргументы функции, где с

целью поиска минимума происходит последовательное продвижение во все более низкие точки в пространстве поиска.

График Gradient наглядно показывает скачки поиска наилучшего решения для корректировки значений обучающей выборки [3]. Значение градиента 149,5881 — это сумма всех корректировок для переменных, которые превысили норму заданной ошибки.

График Mu (рисунок 3) показывает, как изменялись переменные регуляризации ( $\mu$ ) выбранного нами метода Левенберга-Марквардта. Регуляризация представляет собой диапазон числовых значений, необходимый для корректировки значений обучающей выборки и переобучения нейронной сети. На полученном графике Mu (рисунок 3) видно, что такие числа находятся в диапазоне  $[10^{-6}; 10^{-3}]$ , и так как величина значений в диапазоне незначительна, следовательно, этими значениями можно пренебречь.

Таблица 3. Входные переменные

Переменная	Параметр
$P_{\text{буф1}}$	Буферное давление в первой скважине
$P_{\text{буф2}}$	Буферное давление во второй скважине
$P_{\text{буф3}}$	Буферное давление в третьей скважине
$P_{\text{буф4}}$	Буферное давление в четвертой скважине
$P_{\text{буф5}}$	Буферное давление в пятой скважине
$P_{\text{буф6}}$	Буферное давление в шестой скважине
$P_{\text{пласт1}}$	Пластовое давление в первой скважине
$P_{\text{пласт2}}$	Пластовое давление во второй скважине
$P_{\text{пласт3}}$	Пластовое давление в третьей скважине
$P_{\text{пласт4}}$	Пластовое давление в четвертой скважине
$P_{\text{пласт5}}$	Пластовое давление в пятой скважине
$P_{\text{пласт6}}$	Пластовое давление в шестой скважине
$P_{\text{затр1}}$	Затрубное давление в первой скважине
$P_{\text{затр2}}$	Затрубное давление во второй скважине
$P_{\text{затр3}}$	Затрубное давление в третьей скважине
$P_{\text{затр4}}$	Затрубное давление в четвертой скважине
$P_{\text{затр5}}$	Затрубное давление в пятой скважине
$P_{\text{затр6}}$	Затрубное давление в шестой скважине

Таблица 4. Выходные переменные

Переменная	Параметр
$Q_{\text{д1}}$	Частота тока частотного преобразователя в первой добывающей скважине
$Q_{\text{д2}}$	Частота тока частотного преобразователя во второй добывающей скважине
$Q_{\text{д3}}$	Частота тока частотного преобразователя в третьей добывающей скважине
$Q_{\text{д4}}$	Частота тока частотного преобразователя в четвертой добывающей скважине
$Q_{\text{д5}}$	Частота тока частотного преобразователя в пятой добывающей скважине
$Q_{\text{д6}}$	Частота тока частотного преобразователя в шестой добывающей скважине
$Q_{\text{н1}}$	Частота тока частотного преобразователя в первой нагнетающей скважине
$Q_{\text{н2}}$	Частота тока частотного преобразователя во второй нагнетающей скважине
$Q_{\text{н3}}$	Частота тока частотного преобразователя в третьей нагнетающей скважине
$Q_{\text{н4}}$	Частота тока частотного преобразователя в четвертой нагнетающей скважине
$Q_{\text{н5}}$	Частота тока частотного преобразователя в пятой нагнетающей скважине
$Q_{\text{н6}}$	Частота тока частотного преобразователя в шестой нагнетающей скважине

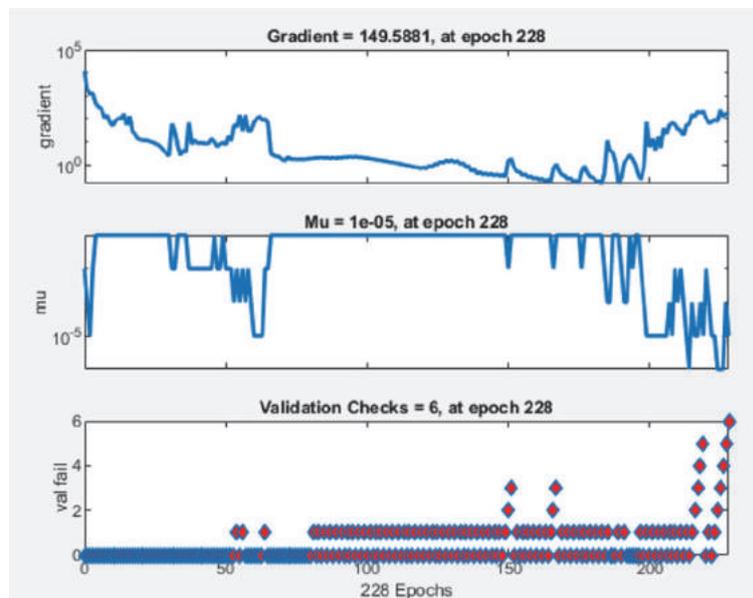


Рисунок 3. Графики обучения нейронной сети

На графике Validation checks (рисунок 3) показана частота отклонений полученных значений от заданной ошибки.

Из рисунка 3 следует:

- на 52 и 53 эпохах обучения частота отклонений увеличивается до 2, после чего на 54 эпохе нейронная сеть научилась устранять данные отклонения;

- на 60 эпохе обучения частота отклонений снова возрастает до 2, после чего в следующей эпохе нейронная сеть устранила отклонения;

- на 72 эпохе обучения частота отклонений вновь увеличивается до 2 и продолжается до 150 эпохи, после которой частота отклонений увеличивается до 4;

— на 151 эпохе обучения нейронная сеть устраняет 2 отклонения, и процесс обучения продолжается с 2 отклонениями;

— на 159 эпохе обучения частота отклонений снова увеличивается до 4. В следующей эпохе нейронная сеть устраняет 2 отклонения, и процесс обучения продолжается с оставшимися двумя;

— на 188 эпохе обучения нейронная сеть сводит частоту отклонений к 0 и так продолжается до 195 эпохи, после которой частота отклонений вновь возрастает до 2;

— на 228 эпохе обучения частота отклонений увеличивается с 2 до 6, и нейронная сеть прекращает свое обучение.

Проанализировав график Validation checks, сделаем вывод, что процесс обучения нейронной сети целесообразно остановить в период с 188 по 195 эпоху. В этот период нейронная сеть обучилась устранять ранее появившиеся отклонения и свела их частоту к 0.

Значение 6, присвоенное графику Validation checks, указывает последнюю частоту отклонения от заданной ошибки, после которой прекратилось обучение нейронной сети.

На рисунке 4 показана гистограмма ошибок. Она отображает, на каком числе примеров нейронная сеть дает ту или иную погрешность. Эта погрешность вычисляется как разность между целевым значением и выходом нейронной сети. На графике видно, что ошибки лежат в диапазоне  $[-12,85; 13,62]$ , при первоначальных  $\approx 20$  значениях. Далее диапазон ошибок изменился с  $[-12,85; 3,62]$  до  $[7,558; 8,328]$ , когда число значений достигло  $\approx 700$ . После  $\approx 700$  значений диапазон ошибок изменился с  $[-7,558; 8,328]$  до  $[-2,263; 3,033]$ . Из данной гистограммы видно, что нейронная сеть с увеличением набора обучающих данных способна к уменьшению погрешности значений. Конечный диапазон погрешности ошибок не превышает заданную ошибку.

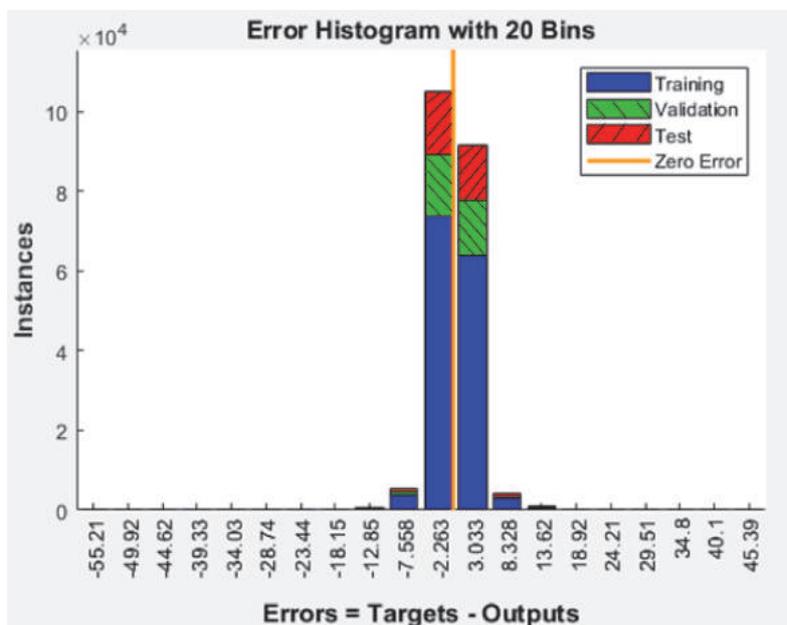


Рисунок 4. Гистограмма ошибок

#### Тестирование нейронной сети

В результате обучения была получена нейронная сеть, которая без перенастройки весов связей формирует требуемую погрешность выходной переменной при подаче на вход нейронной сети любого набора входных переменных из обучающего множества [4, 5]. У полученной нейронной сети «Neural fitting», обученной за 228 эпох, минимальная средняя квадратичная ошибка равна 0,089892

на 50 эпохе. Это означает, что разработанная нейронная сеть обладает высокой точностью регулирования частоты вращения двигателей насосов.

Для проверки результатов обучения НС необходимо ввести команду: `sim (net, [P_буф1, P_пласт1, P_затр1, P_буф2, P_пласт2, P_затр2, P_буф3, P_пласт3, P_затр3, P_буф4, P_пласт4, P_затр4, P_буф5, P_пласт5, P_затр5, P_буф6, P_пласт6, P_затр6])`.

Данные входных параметров вносятся в соответствии с выбранной строкой обучающей выборки.

Выходные параметры выводятся в следующем виде:

```
>> nnstart
>> sim(net, [[10.8533486318641;1.46743276976889;7.18013161630401;

ans =

    4.0874
   62.0784
   46.3992
   57.3033
   58.7309
   57.7927
   56.8904
   58.1015
   57.3212
   58.4438
   56.1422
   58.8663

>> sim(net, [[10.8533486318641;1.46743276976889;7.18013161630401;

ans =

    4.7936
   62.1304
   47.0097
   57.2200
   54.8303
   58.6128
   56.1092
   58.5922
   46.1589
   58.1116
    4.6422
   62.8288
```

**Рисунок 5.** Результат проверки, когда пластовое давление критически низкое на одной скважине и критически низкое на двух скважинах

### Выводы

Разработана, обучена и протестирована искусственная нейронная сеть для управления кустом скважин нефтяного месторождения, учитывающая взаимное влияние параметров каждой скважины. Разработка нейронной сети произведена в программе Matlab с применением пакета Matlab Neural Network Toolbox. Искусственная нейронная сеть обучена, проверена и протестирована на 17433 примерах.

В результате обучения получена нейронная сеть, которая формирует выходные сиг-

ans= $Q_{д1}, Q_{Н1}, Q_{д2}, Q_{Н2}, Q_{д3}, Q_{Н3}, Q_{д4}, Q_{Н4}, Q_{д5}, Q_{Н5}, Q_{д6}, Q_{Н6}$ .

На рисунке 5 показаны результаты проверки при различных значениях пластового давления.

налы с минимальной погрешностью при подаче на вход сети любого набора входных данных из обучающего множества. Полученная нейронная сеть имеет минимальную среднюю квадратичную ошибку, равную 0,089892, полученную за 228 эпох.

В результате тестирования нейронной сети были получены выходные значения, которые имеют максимальную абсолютную погрешность  $\pm 2,2$  Гц и приведенную относительную погрешность, равную 0,08187 %, что меньше заданной 0,9666 %.

## Список литературы

1. Федотьев Н.Н., Алабышев А.Ф., Рогинян А.Л., Вячеславов Н.М., Животинский П.Б., Гальнбек А.А. Прикладная электрохимия. Л.: Госхимиздат, 1961. 640 с.
2. Muravyova E.A., Bogdanov A.V. Software Implementation of the Accurate Regulators a Three-Dimensional Object: Heating Chamber Evaporator Heater Steam Boiler // *Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) — 2018: Materials of International Multi-Conference*. Vladivostok, Russia. 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602917> (accessed 10.09.2019). DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602917.
3. Muravyova E.A., Sharipov M.I., Bondarev A.V. Method for Increasing the Speed and Reducing the Error of Multidimensional Precise Logic Controller // *Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) — 2018: Materials of International Multi-Conference*. Vladivostok, Russia. 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602643> (accessed 11.09.2019). DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602643.
4. Muravyova E.A., Gabitov R.F. Economic Features to Optimize the Catalyst Calcinations Process // *Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) — 2018: Materials of International Multi-Conference*. Vladivostok, Russia. 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602535> (accessed 10.09.2019). DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602535.
5. Muravyova E.A., Sharipov M.I. SCADA-System Based on Multidimensional Precise Logic Controller for the Control of a Cement Kiln // *Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) — 2018: Materials of International Multi-Conference*. Vladivostok, Russia. 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602589> (accessed 09.09.2019). DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602589.

## References

1. Fedotev N.N., Alabyshev A.F., Roginyan A.L., Vyacheslavov N.M., Zhitovinskii P.B., Galnbek A.A. *Prikladnaya elektrokimiya [Applied Electrochemistry]*. Leningrad, Goskhimizdat Publ., 1961. 640 p. [in Russian].
2. Muravyova E.A., Bogdanov A.V. Software Implementation of the Accurate Regulators a Three-Dimensional Object: Heating Chamber Evaporator Heater Steam Boiler. *Materials of International Multi-Conference «Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) — 2018»*. Vladivostok, Russia, 2018. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602917> (accessed 10.09.2019). DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602917.
3. Muravyova E.A., Sharipov M.I., Bondarev A.V. Method for Increasing the Speed and Reducing the Error of Multidimensional Precise Logic Controller. *Materials of International Multi-Conference «Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) — 2018»*. Vladivostok, Russia, 2018. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602643> (accessed 11.09.2019). DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602643.
4. Muravyova E.A., Gabitov R.F. Economic Features to Optimize the Catalyst Calcinations Process. *Materials of International Multi-Conference «Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) — 2018»*. Vladivostok, Russia, 2018. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602535> (accessed 10.09.2019). DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602535.
5. Muravyova E.A., Sharipov M.I. SCADA-System Based on Multidimensional Precise Logic Controller for the Control of a Cement Kiln. *Materials of International Multi-Conference «Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) — 2018»*. Vladivostok, Russia, 2018. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602589> (accessed 09.09.2019). DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602589.



**Спиридонов О. Б.**  
**Spiridonov O. B.**

кандидат технических наук, директор  
Научно-конструкторского бюро  
моделирующих и управляющих систем,  
ФГАОУ ВО «Южный федеральный  
университет»,  
г. Таганрог, Российская Федерация



**Кумова Д. М.**  
**Kumova D. M.**

аспирант кафедры  
электрогидроакустической и медицинской  
техники,  
ФГАОУ ВО «Южный федеральный  
университет»,  
г. Таганрог, Российская Федерация



**Луночкина И. М.**  
**Lunochkina I. M.**

начальник сектора Научно-  
конструкторского бюро моделирующих и  
управляющих систем,  
ФГАОУ ВО «Южный федеральный  
университет»,  
г. Таганрог, Российская Федерация



**Сироткин С. Л.**  
**Sirotkin S. L.**

кандидат технических наук, ведущий  
инженер-конструктор Научно-  
конструкторского бюро моделирующих и  
управляющих систем,  
ФГАОУ ВО «Южный федеральный  
университет»,  
г. Таганрог, Российская Федерация

УДК 681.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-85-91

## ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ СО СРЕДСТВАМИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И НАВИГАЦИОННЫМ ПРИЕМНИКОМ

В статье дается обзор особенностей реализации пульта управления удаленным объектом. Пульт управления является комплексом, состоящим из управляющего устройства, равноценного по функциям компьютеру со встроенным навигационным приемником, блока автоматике и соединительного жгута длиной 50 м. Управление объектом выполняется человеком-оператором. Блок автоматике обеспечивает надежную передачу цифровой информации удаленному объекту и выдачу объекту электрических параметров.

Приводится анализ выбора аппаратных средств пульта управления, который показывает, что оптимальным вариантом по срокам создания пульта управления является устройство, в состав которого будут входить готовые покупные модули и разработанные модули, учитывающие конкретные требования проекта. В качестве управляющего устройства пульта управления используется готовый одноплатный компьютер, который имеет все компоненты для требуемой функциональности. Для компьютера пульта управления обязательны: наличие дисплея и клавиатуры, установка в компьютер модуля заданного навигационного

приемника и возможность подключения интерфейсного модуля по ГОСТ Р 52070-2003 для связи с блоком автоматики. Компьютер пульта управления помещается в защищенный от влаги и пыли корпус. Поскольку характеристики блока автоматики определяются особенностями конкретного объекта управления, то блок автоматики является оригинальным изделием. Обе части пульта управления соединены жгутом, обмен информацией между ними выполняется по заданному интерфейсу (по ГОСТ Р 52070-2003). Подход при разработке, когда используются высоконадежные покупные модули требуемой функциональности и модули и блоки собственной разработки, позволяет выпустить изделие в сжатые сроки. Преимуществом использования продукции отечественного производства в современных условиях является упрощение решения вопросов, связанных с поставкой компонент, получением технических консультаций при разработке устройств, что способствует улучшению технических и весогабаритных характеристик выпускаемого устройства.

**Ключевые слова:** пульт управления, управляющий компьютер, блок автоматики, процессорный модуль, организация обмена информацией, интерфейс по ГОСТ Р 52070-2003, защищенный компьютер, система управления удаленным объектом.

## CONTROL PANEL WITH VISUALIZATION DEVICES AND NAVIGATION RECEIVER

The article provides an overview of the features of object remote control implementation. The control panel is a complex consisting of a control device, equivalent in function to a computer with a built-in navigation receiver, an automation unit and a connecting cable 50 m long. The control of the object is performed by a human operator. The automation unit ensures reliable transfer of digital information to a remote object and the output of electrical parameters to the object.

An analysis of the choice of control panel hardware is given, which shows that the best option in terms of creating the control panel is a device that will include ready-made purchased modules and developed modules that take into account the project specific requirements. A ready-made single board computer is used as a control unit for the control panel, which has all the components for the required functionality. The following are mandatory for the computer of the control panel: the presence of a display and a keyboard, the installation of a specified navigation receiver in the computer and the ability to connect an interface module according to GOST R 52070-2003 for communication with the automation unit. The control panel computer is placed in a housing protected from moisture and dust. Since automation unit characteristics are determined by the particular control object characteristics, the automation unit is an original product. Both parts of the control panel are connected by a harness, information is exchanged between them using a given interface (according to GOST R 52070-2003). The development approach, when highly reliable purchased modules of the required functionality and modules and blocks of our own design are used, allows to release the product in a short time. The advantage of using domestic production in modern conditions is to simplify issues related to the supply of components, obtaining technical advice in the devices development, which contributes to the improvement of the technical and weight-dimensional characteristics of the manufactured device.

**Key words:** control panel, control computer, automation unit, processor module, organization of information exchange, interface in accordance with GOST 52070-2003, protected computer, remote object control system.

### *Введение*

Одной из перспективных областей управления удаленными объектами человеком-оператором является создание пультов управления в виде комплексов, состоящих из устройства приема потока входных данных и формирования информации для удаленного объекта и устройства, обеспечивающего надежную передачу информации удаленному

объекту с одновременной выдачей объекту определенных электрических параметров. Устройство приема потока данных и формирования передаваемой информации — ядро пульта управления. По своим функциям это устройство — полноценный компьютер с широкими возможностями коммуникаций, удобным для оператора интерфейсом и навигационным приемником для решения задач

геолокации. Он обеспечивает прием радиосигналов СНС ГЛОНАСС и GPS, формирование первичной навигационной информации, функционирование специального программного обеспечения, информационный обмен. Важными характеристиками компьютера пульта управления являются низкое энергопотребление, небольшие вес и габариты для удобства работы оператора.

Вторая часть пульта управления — блок автоматики, который выполняет передачу информации непосредственно объекту. Блок автоматики подключен к объекту по заданному интерфейсу (в данном проекте по ГОСТ Р 52070-2003), имеет также линии для передачи электрических параметров объекту.

Обе части пульта соединены жгутом, подключены по заданному интерфейсу (по ГОСТ Р 52070-2003).

Для работы вне помещений пульт управления должен иметь автономный источник питания, быть защищенным от влаги и пыли, работать при заданной температуре (например от минус 30 °С до 50 °С). Также при изготовлении устройства необходимо учесть отказ от использования дисковой подсистемы для HDD для компьютера пульта управления, так как такие подсистемы снижают виброустойчивость (все компоненты должны быть либо напаяны, либо жестко фиксированы винтами на плате), использование определенных операционных систем.

Поскольку характеристики блока автоматики определяются особенностями конкретного объекта, то блок автоматики, как правило, является оригинальным изделием. В качестве же компьютера пульта управления могут быть использованы как готовые промышленные компьютеры или защищенные ноутбуки, так и изделия, созданные на базе компьютерных платформ, изделия, созданные из готовых покупных модулей и модулей собственной разработки, компьютер собственной разработки.

Основные преимущества использования готовых изделий или модулей — это сокращение сроков разработки (разработка одноплатного компьютера занимает от 9 до 18 мес.), возможность разрабатывать программное обеспечение уже на начальном

этапе работы над проектом и уменьшение стоимости разработки в целом.

#### *Анализ возможности использования готовых промышленных компьютеров*

Особенности готовых промышленных компьютеров можно рассмотреть на примерах продукции российской компании Fastwel [1]. Промышленные компьютеры условно делят на две основные категории: панельные и защищенные. Компьютеры, которые имеют средства визуализации и средства ввода (обычно это набор самых необходимых клавиш для ввода и управления, размещенных на лицевой панели защищенного исполнения), называются панельными. Защищенными называются компьютеры, которые не имеют встроенного дисплея и клавиатуры, но имеют хорошо защищенный корпус.

Защищенный компьютер — это помещенный в защищенный корпус набор промышленных модулей, соединенных между собой в соответствии с определенным стандартом. Защищенное исполнение достигается либо путем использования защищенного шасси с пассивной объединительной платой, либо соединением модулей друг с другом через соединители, на которые выведена объединительная шина. Для защиты от пыли и влаги используются также герметизированные интерфейсные разъемы.

Рассмотрим защищенный компьютер МК 308 фирмы Fastwel [2]. МК 308 является базовой компьютерной платформой для создания специализированных вычислителей, построен на базе модулей в форм-факторе PC/104+. Имеет надежное конструктивное исполнение, возможность модификации изделия. Но так как в состав пульта управления должны входить дисплей, клавиатура, то при использовании готовых защищенных компьютеров необходимо предусмотреть конструктивное подключение защищенного дисплея и защищенной клавиатуры, что создаст необходимость в разработке защищенного корпуса для дисплея и клавиатуры.

Как пример готового панельного компьютера рассмотрим бортовой панельный компьютер ВМ301-02 фирмы Fastwel. Он имеет набор клавиш ввода и управления, клавиши размещаются по контуру дисплея. При частом

использовании оператором функций ввода такое расположение клавиш менее удобно по сравнению с компактной клавиатурой.

В качестве компьютера пульта управления может быть использован защищенный ноутбук, например Getac X500. Модель позиционируется как полностью защищённая, с широкими возможностями расширения, поставляется с модулем GPS/ГЛОНАСС и может быть доукомплектована модулем мобильной связи. Данная модель способна работать при температуре окружающей среды от минус 20 °С до 60 °С. Такой температурный режим для нашей страны, где могут быть требования работы при более низкой температуре, не подходит. К тому же, могут быть ограничения при выборе навигационного приемника, поэтому желательно иметь возможность установки внутрь компьютера пульта управления заданного навигационного приемника. Для используемого в проекте навигационного приемника NV08C-RTK требуется корпус для защиты от влаги и пыли или установка внутрь корпуса компьютера. Но для удобства дальнейшего сопровождения пульта управления предпочтительнее реализация навигационного приемника в едином блоке с компьютером.

В настоящее время имеются также полностью защищенные планшеты производства иностранных фирм (Panasonic, Getac и т.д.), например планшеты FZ-G1, FZ-A2, Getac ZX70 [3]. Планшеты предназначены для использования вне помещений, оснащены модульной системой расширения дополнительных функций, но выпускаются в модификациях под операционными системами Windows, Android, что может не удовлетворять требованию об использовании другой операционной системы.

Проведенный анализ показал, что оптимальным вариантом по срокам создания компьютера пульта управления является устройство, в состав которого будут входить готовые покупные модули и разработанные модули, учитывающие конкретные требования.

#### *Решения для аппаратных средств компьютера пульта управления*

Для компьютера пульта управления, как отмечено выше, обязательно наличие дис-

плея и клавиатуры, установка в компьютер модуля заданного навигационного приемника и возможность подключения интерфейсного модуля по ГОСТ Р 52070-2003 для обмена информацией с блоком автоматики.

В качестве основы компьютера пульта управления может быть использован одноплатный компьютер, который представляет собой законченное решение и имеет все компоненты для требуемой функциональности: процессор, оперативную память и набор системной логики, поддерживающей последовательные порты (RS-232, USB), стандартные шины расширения. Модели одноплатных компьютеров с расширенным функционалом могут содержать встроенную дисковую подсистему, слот для карт памяти, графическую подсистему, широкий набор интерфейсов, аналоговые и цифровые порты ввода-вывода.

Таким образом, состав компьютера пульта управления: одноплатный компьютер, интерфейсная плата для обмена информацией с блоком автоматики, плата источника питания, навигационный приемник, дисплей, клавиатура, автономный источник питания. В настоящее время большое количество компаний предлагают совместимое между собой оборудование, что служит основой для построения высоконадежных систем с длительным сроком доступности.

Встраиваемые одноплатные компьютеры производства российской фирмы Fastwel формата PC/104-Plus (PCI 32-bit и ISA 16-bit) оптимизированы соотношением производительности и тепловой мощности. При заданной тактовой частоте процессора не менее 500 МГц подходит модуль CPC308 с интегрированной графикой и широким набором интерфейсов, который создан на базе процессоров Intel Atom. Расчетное энергопотребление модуля составляет от 12 до 17 Вт в зависимости от модификации, а система теплоотвода позволяет применять как воздушную, так и кондуктивную схему его охлаждения. Все компоненты питаются на плату, образуя устойчивую к ударам / вибрации конструкцию, эффективность влагозащиты повышается при применении покрытия. Диапазон рабочих температур компьютера — от минус 40 °С до 85 °С.

Работает CPC308 под управлением операционных систем FreeDOS, Windows XPe, Linux 2.6, QNX v.6.5.

Одноплатный компьютер CPC308 хорошо зарекомендовал себя также под управлением российской операционной системы «Astra Linux Special Edition».

Еще одним важным требованием является использование конкретного интерфейса для передачи информации объекту. В данном проекте определен интерфейс по ГОСТ Р 52070-2003. На сегодняшний день широко известна АО «Электронная компания «ЭЛКУС»», которая занимается разработкой и производством специализированной элементной базы и устройств сопряжения с интерфейсами, в том числе и устройств сопряжения с интерфейсом по ГОСТ Р 52070-2003. На сайте компании отмечено, что выпускаемые предприятием платы полностью соответствуют международным стандартам по интерфейсам, надежности и качеству [4]. Изделия поддерживаются программным обеспечением в средах: DOS, QNX, Linux, Windows.

Фирма «ЭЛКУС» поставляет несколько типов одноплатных компьютеров [5] и платы сопряжения с интерфейсом по ГОСТ Р 52070-2003. Тактовая частота работы процессоров для таких компьютеров (например ZFX86) не более 128 МГц (у CPC308 частота работы 500 МГц). Платы сопряжения с интерфейсом по ГОСТ Р 52070-2003 используют различные шины для связи с процессорной платой. В конструктивном исполнении поддерживаются спецификации PC 104, PC/104-Plus, PCI Express x1, Евромеханика 3U и другие. Для CPC308 по конструктиву исполнения подходит интерфейсный модуль TA-104PCI, имеющий компактные размеры и высокую механическую прочность. Устройство содержит резервированный приемопередатчик, двухпортовое ОЗУ 64Кx16, схемы, реализующие функции управления необходимыми режимами.

Использование в качестве покупных модулей продукции фирмы FASTWEL (CPC-308) и фирмы «ЭЛКУС» (TA-104PCI), т.е. продукции отечественного производства, в современных условиях упрощает решение вопро-

сов, связанных с поставкой, получением технических консультаций, гарантирует наличие документации на русском языке.

Применяемые операционные системы, класс решаемых задач определяют набор клавиш ввода данных и управления для клавиатуры пульта управления. Клавиатура может быть встроенной в корпус или выносной. Условия эксплуатации накладывают требование герметичности, определяют необходимый класс защиты от пыли, влаги. Клавиатура может быть отсоединяемой, но иметь систему жёсткого соединения и фиксации. Также клавиатуры отличаются технологией изготовления и материалом клавиш: резиновые, мембранные (плёночные) и силиконовые клавиатуры, они выполняются в пластмассовых или металлических корпусах. Если предъявляются повышенные требования к герметичности, то используются мембранные клавиатуры или мембранный купол для клавиш. Достоинством данной технологии служит то, что такие устройства изготовлены без отдельных механических движущихся частей и выполнены в виде плоской, обычно гибкой поверхности с нанесённым на неё рисунком клавиш. Клавиатуры этого типа имеют низкую стоимость, высокую надёжность, степень защиты IP65. В чистом виде данные клавиатуры не имеют выраженного тактильного эффекта, что создаёт неудобства в работе оператора. Однако производители усовершенствовали эту технологию, в том числе и за счёт наращивания количества слоёв, вставки между мембранами тонких металлических прослоек в форме купола [6]. Следовательно, при требовании ограничения весовых характеристик вариант встроенной в защищенный корпус компьютера клавиатуры мембранного типа является оптимальным, так как в этом случае клавиатура будет иметь небольшой вес и удовлетворять требованиям герметичности.

Дисплей компьютера пульта управления должен иметь не только достаточную яркость, разрешение и размеры экрана, но и соответствовать предельным температурам работы устройства. С учетом ограничения весовых характеристик предпочтительнее вариант встроенного в защищенный корпус

компьютера дисплея, который может быть закрыт защитным стеклом.

Модуль источника питания для компьютера пульта управления должен иметь достаточную мощность и удовлетворять диапазону выходных напряжений. Например, рассмотрим характеристики модуля источника питания PS352 фирмы Fastwel, который представляет собой плату форм-фактора Stack PC-PCI. Он имеет выходную мощность 75 Вт, диапазон входных напряжений от 9 до 36 В. Модуль PS352 имеет большой набор функций: защита от перегрузок и перегрева, функция источника бесперебойного питания, управление внешним вентилятором в зависимости от температуры, встроенный WDT-таймер, интегрированный температурный датчик, встроенные часы реального времени и другие. Для использования в рассматриваемом пульте управления модуль имеет избыточную функциональность. Поэтому с целью снижения веса компьютера пульта разработан аналог модуля, который удовлетворяет предъявляемым требованиям по диапазону входных и выходных напряжений и мощности, но не имеет неиспользуемой функциональности, что позволяет снизить вес компьютера.

По требованиям проекта автономный источник питания должен обеспечивать не менее 5 ч непрерывной работы компьютера пульта управления при температуре окружающей среды 0 °С и не менее 3 ч непрерывной работы при температуре окружающей среды минус 30 °С. Требованиями температурного диапазона работы удовлетворяют перезаряжаемые литий-ионные аккумуляторы фирмы SAFT. Отличительной особенностью аккумуляторов производства SAFT является способность заряжаться при температуре от минус 20 °С до 60 °С. Аккумуляторы серии INT (MP176065 Int) способны заряжаться при температуре окружающей среды до минус 20 °С, а разряжаться в диапазоне от минус 50 °С до 60 °С. Аккумуляторы обладают увеличенным количеством циклов заряд-разряд и повышенной надёжностью. Автономный источник питания пульта управления реализован на основе литий-ионного аккумулятора серии int MP176065, типоразмера призма с номинальным напряжением

3,7 В, ёмкостью 6,8 Ач. (Батарея перезаряжаемая литий-ионная INT 176065 XC BL FL).

*Выбор аппаратных средств блока автоматики*

По требованиям проекта блок автоматики пульта управления обеспечивает информационный обмен с компьютером пульта управления и с удаленным объектом по интерфейсу по ГОСТ Р 52070-2003. Блок автоматики также формирует и выдает напряжение 27 В с током нагрузки до 2,2 А для объекта, производит согласование линии передачи данных с объектом, выполняет блокировку и разблокировку подачи питающего напряжения 27 В, в процессе эксплуатации информирует оператора о своей исправности / неисправности, о блокировке / разблокировке выдачи питающего напряжения в объект управления. Работает блок автоматики от стандартной сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 220 В или от источника постоянного тока с выходным напряжением от 10,6 до 32,0 В. Функционально блок автоматики имеет модуль управления, модуль питания и элементы индикации.

С целью снижения веса блока автоматики предпочтительнее собственная разработка блока, это позволяет выполнить требования по диапазону выходных параметров и не заложит лишней функциональности.

*Результаты*

Для проверки правильности выбранных технических решений проводилось макетирование с использованием аппаратно-программного комплекса, в состав которого включены аппаратно-программные средства, обеспечивающие информационный обмен компьютера пульта управления и блока автоматики, а также блока автоматики и имитатора удаленного объекта, в роли которого выступил персональный компьютер с дополнительно установленной платой обмена по заданному интерфейсу (по ГОСТ Р 52070-2003). Работоспособность компьютера пульта управления контролируется с помощью программы проверки подсистем и интерфейсов компьютера пульта управления. Программа проверки подсистем и интерфейсов выполняет:

- отображение параметров процессора;
- стресс-тестирование процессора;

- отображение параметров памяти;
- проверку геометрии экрана;
- проверку работоспособности всех клавиш клавиатуры;
- прием / передачу тестового трафика по USB интерфейсу;
- прием / передачу тестового трафика по последовательному интерфейсу RS-232.

### Выводы

Выбранный комбинированный подход при разработке пульта управления удаленным

объектом, когда использовались высоконадежные покупные модули требуемой функциональности и модули и блоки собственной разработки, позволил выпустить изделие в сжатые сроки и добиться выполнения требований проекта о низком энергопотреблении компьютера пульта управления и весогабаритных характеристиках.

### Список литературы

1. Медведев А. Встраиваемые промышленные компьютеры Fastwel: надежные решения для широкого круга задач // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2016. № 2 (152). С. 78–82.
2. Медведев А. Сделано в России. Защищенные встраиваемые компьютеры Fastwel // *Современные технологии автоматизации*. 2015. № 4. С. 12–14.
3. Гуров И., Кабачник Д., Медведев А. Современные защищенные планшеты // *Control Engineering Россия*. 2018. № 2 (74). С. 19–21.
4. АО «Элкус» — 25 лет! // Элкус. URL: <http://www.elcus.ru/index.php?ID=about> (дата обращения: 08.09.2019).
5. Каталог плат // Элкус. URL: <http://www.elcus.ru/boards.php?ID=startb#> (дата обращения: 08.09.2019).
6. Толокнов А. Мы особенные: устройства ввода информации для промышленного применения // *Современные технологии автоматизации*. 2010. № 3. С. 26–33.

*Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes — Electronics: Science, Technology, Business*, 2016, No. 2 (152), pp. 78–82. [in Russian].

2. Medvedev A. Sdelano v Rossii. Zashchishchennyye vstraivaemye komp'yutery Fastwel [Made in Russia. Fastwel Secure Embedded Computers]. *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii — Contemporary Technologies in Automation*, 2015, No. 4, pp. 12–14. [in Russian].

3. Gurov I., Kabachnik D., Medvedev A. Sovremennyye zashchishchennyye planshety [Modern Secure Tablets]. *Control Engineering Rossiya — Control Engineering Russia*, 2018, No. 2 (74), pp. 19–21. [in Russian].

4. АО «Elkus» — 25 let! [JSC «Elkus» — 25 Years!]. Elkus. Available at: <http://www.elcus.ru/index.php?ID=about> (accessed 08.09.2019). [in Russian].

5. Katalog plat [Board Catalog]. Elkus. Available at: <http://www.elcus.ru/boards.php?ID=startb#> (accessed 08.09.2019). [in Russian].

6. Toloknov A. My osobennyye: ustroystva vvoda informatsii dlya promyshlennogo primeneniya [We are Special: Data Entry Devices for Industrial Application]. *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii — Contemporary Technologies in Automation*, 2010, No. 3, pp. 26–33. [in Russian].

### References

1. Medvedev A. Vstraivaemye promyshlennyye komp'yutery Fastwel: nadezhnyye resheniya dlya shirokogo kruga zadach [Fastwel Embedded Industrial Computers: Reliable Solutions for a Wide Range of Tasks].



**Дашевский В. П.**  
**Dashevsky V. P.**

*кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
руководитель отдела прототипирования  
робототехнических и встраиваемых  
систем,  
Санкт-Петербургский институт  
информатики и автоматизации  
Российской академии наук,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*



**Будков В. Ю.**  
**Budkov V. Yu.**

*кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
руководитель лаборатории технологий  
больших данных киберфизических систем,  
Санкт-Петербургский институт  
информатики и автоматизации  
Российской академии наук,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*

УДК 004.031.43

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-92-100

## СПЕКТРОСКОПИЯ ЗАДЕРЖЕК В СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

В сложных системах реального времени (СРВ), в которых происходит взаимосвязанная обработка сигналов от внешних источников данных, применяются специализированные операционные системы реального времени (ОСРВ), которые гарантируют синхронное выполнение этой обработки с процессами в реальном мире. Одной из важнейших характеристик СРВ является время реакции на внешние события, зависящие от характеристик как аппаратной, так и программной части, поэтому задача определения реальных задержек переносится на конечных разработчиков СРВ. Эта задача зачастую требует внесения модификаций в программный код ОСРВ, доступа к управлению внешними выводами процессора, что не всегда возможно. Данная работа рассматривает возможность применения статистического подхода для решения задачи по измерению различных задержек в СРВ. В статье описаны задержки, связанные с выполнением базовых системных примитивов, возникающие в операционных системах реального времени, способы их измерения и модели их образования на примере ОСРВ с вытесняющей многозадачностью и отдельными стеками процессов. Рассмотрены модель образования задержек реакции на прерывание, модель формирования задержки при планировании и переключении контекста процессов для случаев пробуждения процесса с более высоким и низкими приоритетами. Описан способ измерения квантов времени, выделяемых на выполнение задач с одинаковым приоритетом. Предложен метод измерения задержек, основанный на сравнительном анализе спектров задержек, получаемых в разных режимах работы СРВ. Основное его преимущество заключается в том, что метод доступен для прикладного программного обеспечения с обычным уровнем привилегий, не требует модификации системных программ или ядра операционной системы. Единственным условием для его успешного применения является наличие в процессоре счетчика тактов или любого иного системного счетчика с высокой частотой изменений, обеспечивающего достаточную разрешающую способность по времени.

**Ключевые слова:** система реального времени, операционная система реального времени, спектроскопия, время задержки, вытесняющая многозадачность, обработка прерываний, спектр задержек, таймер задержек, метод измерения задержек, модель системных задержек.

## DELAY SPECTROSCOPY IN REAL-TIME SYSTEMS

In complex real-time systems (RTS), where occurs interdependent processing of incoming signals from external data sources, specialized real-time operating systems (RTOS) are employed, which ensure synchronization of such processing with real-world events. One of the most important characteristics of RTS is the response time to external events, depending as on hardware, as on software implementations. Therefore, the problem of determination of actual delay times should be solved by the RTS developers. This task often requires modifications of RTOS source code, access to processor output and control of its output, what is not always feasible. This paper considers possible application of a statistical approach to this problem, including measurement of various delays in RTS. This paper describes delays, related to execution of basic system primitives, arising in real-time operating systems, ways of their measurement and how they can be established in terms of RTOS with preemptive multitasking and isolated process stacks. An interrupt response delay model was elaborated, as well model of delay establishment during process context planning and switching for waking of higher-priority and lower-priority processes. A time slice measurement approach is proposed, where time slices are allocated for execution of equal-priority tasks. A delay measurement method is proposed, based on comparative analysis of delay spectra, arising in such modes of RTS operation. The main advantage of this method is that it is applicable with general-purpose software with usual priority level, and it requires no modifications of system programs or operating system kernel. The only prerequisite for successful implementation of it is a provision of a CPU cycle counter or any other counter with high frequency of modification registration, enabling enough precise timing resolution.

**Key words:** real-time system, real-time operating system, spectroscopy, delay time, preemptive multitasking, interrupt handling, delay spectrum, delay timer, delay measurement method, system delay model.

### *Введение*

Системы реального времени (СРВ), основанные на микропроцессорах, являются наиболее распространенным видом подобных систем. В сложных системах, где имеется необходимость выполнения в реальном времени сразу нескольких взаимосвязанных процессов, применяются специализированные операционные системы реального времени (ОСРВ) [1–4]. Такие операционные системы, помимо прочих функций, присущих всем операционным системам, позволяют гарантировать выполнение процессов синхронно с внешними процессами в реальном времени.

Для более ясного изложения в данной работе будет использоваться модель операционной системы с вытесняющей многозадачностью и отдельными стеками процессов. Тем не менее, сама методика исследований может быть обобщена и на другие случаи.

Важнейшими характеристиками ОСРВ являются задержки, связанные с выполнением базовых системных примитивов:

- время реакции на прерывание;
- время переключения потока;

- время переключения контекста процесса;
- время планирования группы процессов;
- время захвата и освобождения ресурса;
- время выполнения системного вызова.

На практике разработчики всегда сталкиваются с трудностями при определении значений задержек [5–7]. Это связано с тем, что времена зависят как от аппаратной части системы, так и от программной части — реализации ОСРВ. Производители микропроцессоров сообщают времена, относящиеся к аппаратуре, например, период тактовой частоты процессора, количество тактов на выполнение каждой команды, количество тактов на регистрацию сигнала прерывания и вызов обработчика и т.п. Поскольку они ничего не знают про особенности реализации ОСРВ, то они не могут сообщить всех временных характеристик, интересных конечному разработчику прикладного программного обеспечения. Разработчики ОСРВ также не могут указать реальные задержки, поскольку они зависят от характеристик аппаратной платформы, таких как тактовая

частота ядер процессора, кэш-память, внешняя память, объём памяти, настройки контроллеров внешних шин и интерфейсов и т.д. Таким образом, задача определения реальных задержек падает на конечного разработчика всей СРВ, который определился с выбором как аппаратной части, так и всех программных компонентов ОСРВ.

Сбор такого большого количества данных о системе всегда затруднителен для конечного разработчика. Обычно пользователю доступны измерения производительности системы на уровне прикладных процессов (benchmarks) [8, 9].

Такие тесты измеряют производительность различных операций. Обычно подразумевается, что измеряемые характеристики подвержены минимальному влиянию случайных факторов и отражают усредненные значения производительности, которые будут воспроизводиться в условиях работы целевых программ. Измерение внутренних задержек аппаратуры и базовых примитивов ОСРВ недоступно для прямого измерения на уровне прикладных программ. Прямое измерение системных задержек требует внедрения в код операционной системы механизмов фиксации и вывода информации о прохождении определенных контрольных точек.

В простейшем случае это может быть управление внешними выводами процессора (например, GPIO [6, 10, 11]). Такой подход возможен, если пользователю доступно внесение изменений в системные функции ядра ОСРВ и настройка выводов процессора, связанных с измерениями. Преимущество подхода — в простоте и небольшом расходе производительности и памяти на организацию измерений. Недостаток в том, что для коммерческих ОСРВ внесение изменений невозможно.

Альтернативный подход заключается в наличии в системе таймера высокого разрешения, в идеале работающего на тактовой частоте процессора, показания которого заносятся в журнал контрольных точек системных функций ядра и драйверов операционной системы (ОС). Анализируя журнал работы ядра ОСРВ, можно вычислить задержки на выполнение ключевых опера-

ций [6, 7, 12]. Достоинство метода в том, что он не требует конфигурировать выводы процессора для выдачи контрольных сигналов. Недостатки в том, что для коммерческих ОСРВ внесение изменений невозможно, и требуется больше ресурсов процессора и памяти для записи журнала событий на низком уровне. Кроме того, такой параметр, как время реакции на прерывание не может быть получен таким методом, так как момент возникновения сигнала прерывания не фиксируется в журнале первичных событий.

Ниже приводится описание предлагаемого метода построения спектров задержек, который лишен данных недостатков и позволяет исследовать задержки СРВ с помощью небольшого приложения прикладного уровня, которое может работать в системе с самым низким приоритетом и не мешать остальным приложениям работать в реальном времени.

#### *Модель образования задержек*

Спектры задержек позволяют измерять характерные для внутренних процессов временные интервалы. Однако измеряемые величины могут в действительности являться суммой нескольких базовых задержек, поэтому непосредственные результаты измерений требуют обработки для получения базовых временных характеристик. Для правильной обработки результатов необходимо сформировать модель образования задержек и их влияние на измеряемые времена.

Модель задержек в общем случае зависит от реализации ядра конкретной ОСРВ и выходит за рамки данной работы. Для упрощения изложения в рамках данной статьи остановимся на одном из наиболее популярных случаев ОСРВ с вытесняющей многозадачностью, системой фиксированных приоритетов задач на основе контроллера прерываний [13].

#### *Задержка реакции на прерывание*

Реакция на прерывание представляет собой один из наиболее сложных случаев для прямого измерения задержки, поскольку в момент возникновения исходного события система может быть занята, прерывания заблокированы, поэтому определение задержки возможно косвенным способом.

Обработка прерывания происходит следующим образом:

1. возникает внешний сигнал прерывания;
2. сигнал прерывания фиксируется контроллером прерываний;
3. контроллер прерывания формирует прерывание центрального процессора;
4. центральный процессор заканчивает работу в режиме запрещенных прерываний (опционально);
5. центральный процессор получает информацию от контроллера прерываний и переходит к обработчику прерываний, запрещая при этом прерывания;
6. обработчик прерываний ОСРВ производит первичную обработку прерываний, пробуждая процессы драйверов либо запуская прикладные обработчики прерываний в драйверах;

7. обработчик прерываний включает разрешение прерываний и выходит.

Традиционно задержка реакции на прерывание (interrupt latency) определяется как время между шагами 1 и 6 (рисунок 1). Измерение этого времени сложно, поскольку требует синхронизации с внешним сигналом прерывания, которая недоступна внутри ОСРВ. Однако стоит заметить, что шаг 4 в действительности может являться окончанием обработчика 7 предыдущего прерывания (выделено серым цветом на рисунке 1). По этой причине задержка реакции на прерывания фактически равна времени выполнения пустого обработчика прерывания, который не делает ничего, а сразу выходит. А этот интервал доступен к измерению по спектру задержек, так как это фактически минимальное время, на которое может быть прерван процесс построения спектра задержек.

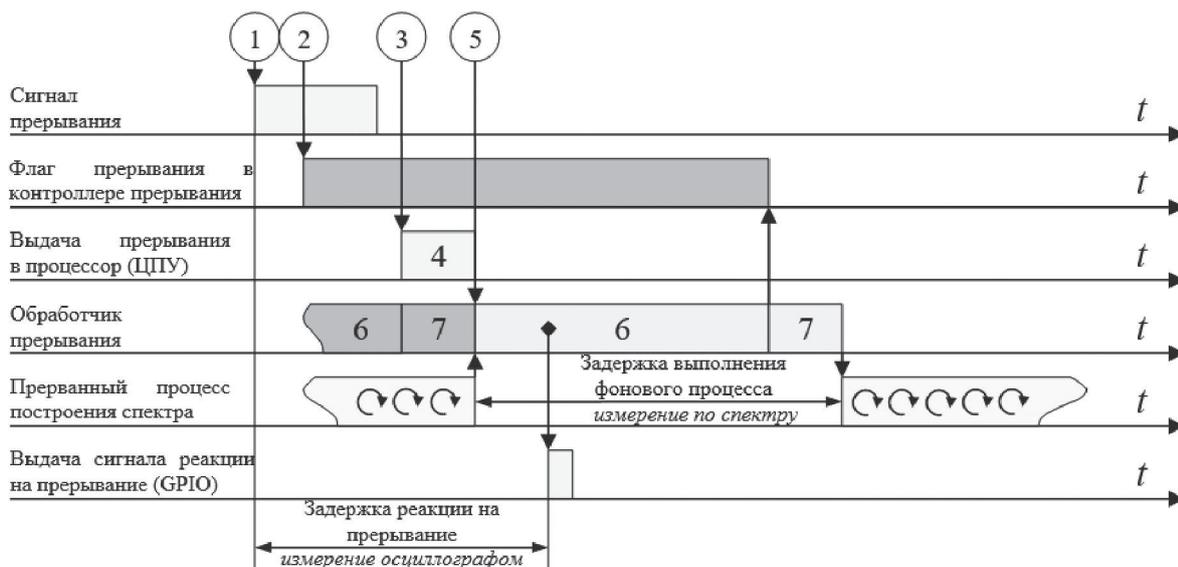


Рисунок 1. Этапы вызова обработчика и задержка реакции на сигнал прерывания

В общем случае обработчики прерываний могут быть вложенными. Вероятность образования вложенных прерываний обычно ниже, чем одиночных, и поэтому это отразится на статистике измеряемых задержек.

В простейшем случае обработка прерывания заканчивается регистрацией данных в драйвере и остается в контексте процесса, строящего спектр задержек. Поэтому самые маленькие времена в спектре задержек естественно относить к выполнению обработчиков прерываний. В более сложных случаях следствием обработки прерываний будет

переключение контекста процесса, и задержка вырастет.

*Задержка планирования и переключения контекста*

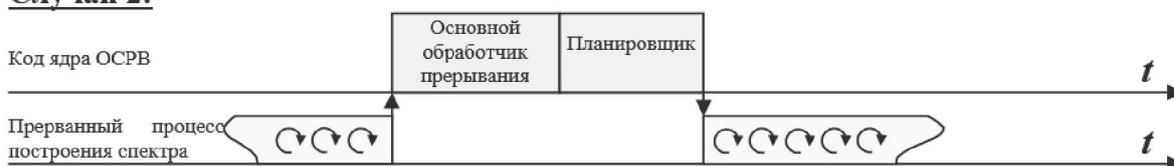
В ОСРВ с вытесняющей многозадачностью обработка прерываний завершается одним из трех способов:

1. простой возврат в прерванный процесс;
2. пробуждение процесса, приоритет которого ниже, чем у текущего процесса;
3. пробуждение процесса, приоритет которого выше, чем у текущего процесса.

В первом случае время вытеснения измерительного процесса определяется временем работы обработчика прерывания, как показано на рисунке 1. Второй и третий случаи похожи тем, что изменяется множество активных процессов, в результате чего запускается планировщик, задача которого определить, какой из активных процессов в данный момент имеет наивысший приоритет. Если после работы планировщика выясняется, что текущий процесс и есть самый приоритетный (случай 2 на рисунке 2), то ко времени работы простого обработчика

прерывания добавляется время работы планировщика (точнее, его «холостой ветви»). Если же среди активных процессов появляется более приоритетный процесс (случай 3), то события развиваются более сложным образом. Во-первых, в системе появляются переключения контекстов процессов, во-вторых, появляется время работы процессов с более высоким приоритетом, в-третьих, появляется время работы планировщика при выбывании процесса (рисунок 2, случай 3). И все эти ветки могут найти свое отражение в измеряемой статистике.

### Случай 2:



### Случай 3:



Рисунок 2. Схема возникновения задержек на планирование и переключение контекста

Для исследования задержек такого типа удобно сделать специализированный процесс, который будет пробуждаться по событию от обработчика прерывания таймера и сразу засыпать снова. В этом случае вытеснение фонового процесса будет происходить за время, равное двум временам переключения контекста, и время работы планировщика.

#### *Квант выполнения процессов одного приоритета*

В некоторых ОСРВ планировщик выполняет процессы с одинаковым приоритетом по алгоритму round robin, чтобы обеспечить квазипараллельность их выполнения. Квант времени выбирается обычно порядка 10 мс, чтобы обеспечить оптимальное соотношение между потерей времени на переключения контекстов и скоростью реакции при взаимодействии с человеком (как правило, ввод и вывод на консоль). Величина кванта времени может оказаться важной, если процессы

состоят не только из вычислений, но и занимаются последовательным вводом-выводом, поэтому представляет интерес измерение этих величин.

Для оценки кванта времени можно запустить два измерительных процесса на одном уровне приоритета, как показано на рисунке 3. В этом случае у них возникает биение с периодом, равным кванту времени. Квант времени обычно в сотни и тысячи раз больше времен работы планировщика и переключения контекста, поэтому ими можно пренебречь и считать максимальную задержку выполнения этих процессов квантом времени планировщика.

#### *Метод измерения задержек*

Измерение задержек основано на сравнительном анализе спектров задержек, получаемых в разных режимах работы СРВ. Принцип измерения основан на том, что программа с самым низким приоритетом постоянно в цикле опрашивает показания счетчика тай-

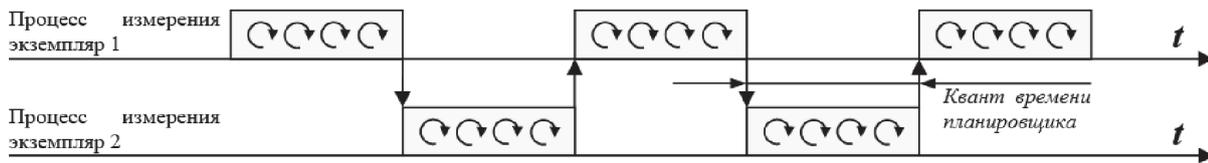


Рисунок 3. Переключение процессов на одном уровне приоритета

мера высокого разрешения и сравнивает их с порогом. Показания ниже порога считаются вариациями времени выполнения одной итерации цикла и не вносятся в статистику, а показания выше порога связаны с вытеснением программы различными системными операциями (обработкой прерываний, переключением контекста и т. п.) и используются для построения спектра задержек. Анализ спектра позволяет выделить характерные времена, связанные с внутренними процессами в ОС. Умышленно подвергая СРВ воздействию,

которое вызывает вытеснение измерительного процесса определенным видом активности (обработкой прерываний, переключением контекстов, планированием группы задач и т.п.), разработчики могут наблюдать накопление в статистике времён, связанных с этой активностью и тем самым идентифицировать задержки, создаваемые ей.

*Алгоритм измерительного процесса*

Кратко ядро алгоритма запишем на языке Си (рисунок 4).

```
typedef long long ts_t; // в соответствии с разрядностью таймера

int main()
{
    ts_t prev_ts = read_timestamp();

    // инициализируем массивы и т.п.
    // ...

    while(loop) {
        ts_t this_ts = read_timestamp();
        ts_t time = this_ts - prev_ts;

        if (time > TS_THRESHOLD)
            update_statistics(time); // собираем статистику
    }

    // выводим статистику для обработки
}
```

Рисунок 4. Алгоритм работы измерительного процесса

Функция `read_timestamp()` осуществляет чтение аппаратного счетчика таймера высокого разрешения (подробнее см. ниже). Функция `update_statistics()` занимается тем,

что сохраняет значение задержки в массиве. В простейшем случае вид этой функции может быть таким (рисунок 5).

```
unsigned long ts_statistics[TS_BINS];

void update_statistics(ts_t time)
{
    const int TS_GRANULARITY = 1000; // приемлемая разрешающая способность

    ts_t bin = time / TS_GRANULARITY;

    if (bin < TS_BINS)
        ts_statistics[bin]++;
}
```

Рисунок 5. Функция обновления статистики с фиксированным интервалом (простейший случай)

*Таймер высокого разрешения*

Для измерения задержек достаточно иметь какой-либо таймер высокого разрешения, чтение счётчика которого возможно на уровне прикладных программ. Для упрощения изложения будем считать, что счётчик таймера имеет разрядность  $N$  бит и считает последовательно циклически от 0 до  $2^N-1$ . В таком случае разность показаний счётчика таймера, полученных в последовательные моменты времени (предполагается, что нас интересуют достаточно близкие события, интервал между которыми не превышает периода переполнения счетчика таймера), будет равна интервалу времени между событиями.

В идеальном случае таймер должен считать на тактовой частоте процессора, чтобы его показания менялись с каждой выполненной инструкцией процессора. Для современных процессоров с тактовыми частотами порядка 1–2 ГГц период переполнения даже 32-битного счетчика таймера составит 2–4 с, что вполне достаточно для однозначного измерения основных задержек СРВ, которые исчисляются микро- и миллисекундами.

*Спектр задержек*

Спектром задержек будем считать гистограмму распределения задержек в некоторой сетке интервалов. Спектр задержек представляет собой массив целых чисел, каждое из которых равно частоте возникновения определенной задержки цикла в заданном интервале значений. В простейшем случае функция `update_statistics()` может собирать статистику с фиксированным размером интервала (рисунок 5). В этом случае точность измерения задержек будет высокой, но для их регистрации может потребоваться значительный объем памяти. Например, при регистрации задержек до 20 мс с величиной интервала в 100 нс потребуется 200 тысяч интервалов, или 800 килобайт для 32-битных значений частот. В небольших СРВ такой объем памяти может быть значительным. Поэтому на практике разумно применять подход с переменным размером интервала гистограммы, величина которого растет с

увеличением задержек, сохраняя приемлемой относительную погрешность их измерения.

После работы алгоритма измерительного процесса в течение определенного времени необходимо профильтровать спектр, убрав оттуда величины задержек, которые не связаны с измеряемыми величинами, чтобы нормировать спектр для сравнения между несколькими запусками. Далее нужно построить нормированный спектр, вычислив отношение значений каждого интервала к сумме значений по всем интервалам. Сравнивая нормированные спектры, можно определить интервалы, в которых произошло изменение числа событий, и через их номера определить соответствующую задержку и время реакции СРВ на эти события.

**Выводы**

Предлагаемая в статье спектроскопия задержек является методом косвенного измерения временных характеристик СРВ. Достоинством метода является то, что он позволяет избежать модификации системного программного обеспечения (ПО): ядра и драйверов ОСРВ. Более того, при наличии доступа на чтение к таймеру с высоким временным разрешением реализация метода может проводиться на уровне прикладного ПО без прав суперпользователя.

Статистический характер собираемой информации сам по себе не дает возможности проводить прямые измерения задержек. Однако пользователь может анализировать спектры задержек, подвергая свою систему различным нагрузкам. Сравнивая спектры задержек под различными нагрузками и без них, можно определять характерные времена конкретной системы реального времени.

Предложенный метод носит общий характер, его можно применять не только к системам с вытесняющей многозадачностью, но и к любым другим. Основная задача пользователя — правильно описать модель задержек в своей системе и на её основе правильно провести сравнительный анализ спектров задержек.

### Список литературы

1. Nandana V., Jithendran A., Shreelekshmi R. Survey on RTOS: Evolution, Types and Current Research // *International Journal of Computer Applications*. 2015. Vol. 121. No. 21. P. 28-31. DOI: 10.5120/21825-5077.
2. Wang S.H., Cheng S.W., Huang C.C.J. Puyuma: Linux-Based RTOS Experimental Platform for Constructing Self-driving Miniature Vehicles // *Computing Conference — 2018: Proceedings of Science and Information Conference*. Cham, Switzerland. 2018. Vol. 858. P. 985-994. DOI: 10.1007/978-3-030-01174-1\_75.
3. Garre C., Mundo D., Gubitosa M., Toso A. Real-Time and Real-Fast Performance of General-Purpose and Real-Time Operating Systems in Multithreaded Physical Simulation of Complex Mechanical Systems // *Mathematical Problems in Engineering*. 2014. Vol. 2014. URL: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2014/945850> (accessed 16.06.2019). DOI: 10.1155/2014/945850.
4. Raja B., Firdous A., Ishak A.M., Anand M. Design and Implementation of Health Care Video Monitoring System Based on RTOS // *Indian Journal of Public Health Research and Development*. 2019. Vol. 10. No. 4. P. 1260–1265.
5. Lee S.C., Ong S.E., Ali N.B.Z. Test Methodology for Real-Time Operating System // *Bulletin of Networking, Computing, Systems, and Software*. 2014. Vol. 3. No. 1. P. 10–12.
6. Hillary N. Measuring Performance for Real-Time Systems. Chandler: Freescale Semiconductor, 2005. 14 p. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/white-paper/CWPERFORMWP.pdf> (accessed 15.06.2019).
7. Herzog B., Gerhorst L., Heinloth B., Reif S., Hönig T., Schröder-Preikschat W. INTspect: Interrupt Latencies in the Linux Kernel // *Computing Systems Engineering (SBESC) — 2018: Materials of VIII Brazilian Symposium*. Salvador, Bahia, Brazil. 2018. P. 83-90. DOI: 10.1109/SBESC.2018.00021.
8. Tan S.L., Nguyen B.A.T. Survey and Performance Evaluation of Real-Time Operating Systems (RTOS) for Small Microcontrollers // *IEEE Micro*. 2009. Vol. 99. Issue 99. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5210078> (accessed 18.06.2019). DOI: 10.1109/MM.2009.56.
9. Parikh H., Shah R., Shah U., Deshmukh S. Performance Parameters of RTOSs; Comparison of Open Source RTOSs and Benchmarking Techniques // *Advances in Technology and Engineering — 2013: Materials of International Conference*. Mumbai, India. 2013. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6524742> (accessed 12.06.2019). DOI: 10.1109/ICAdTE.2013.6524742.
10. Nisar S.K., Ahmed M., Ayub H., Baig I. Operating System Performance Analyzer for Low-End Embedded Systems // *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*. 2011. Vol. 8. Issue 6. No. 3. P. 341–348.
11. Abdulganiyu A., Rabiun I. Comparative Analysis of Real-Time Operating System (RTOS) of Some Selected OS Using External Signal Generator and Oscilloscope // *International Journal of Science and Engineering Investigations*. 2017. Vol. 6. No. 63. P. 47–53.
12. Koker K. Embedded RTOS: Performance Analysis with High Precision Counters // *Autonomous Robots and Agents: Article in the Book*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. P. 171-179. DOI: 10.1007/978-3-540-73424-6\_20.
13. Reddy B.M.K., Satyanarayana G.S.R., Seetaramanjaneyulu B. Scheduling Latency Comparison of Two Open-Source RTOSs on CORTEX-M3 // *Embedded Systems — 2014: Materials of International Conference*. Coimbatore, India. 2014. P. 59-62. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6953051> (accessed 14.06.2019). DOI: 10.1109/EmbeddedSys.2014.6953051.

### References

1. Nandana V., Jithendran A., Shreelekshmi R. Survey on RTOS: Evolution, Types and Current Research. *International Journal of Computer Applications*, 2015, Vol. 121, No. 21, pp. 28-31. DOI: 10.5120/21825-5077.
2. Wang S.H., Cheng S.W., Huang C.C.J. Puyuma: Linux-Based RTOS Experimental Platform for Constructing Self-driving Miniature Vehicles. *Proceedings of Science and Information Conference «Computing Conference — 2018»*. Cham, Switzerland, 2018, Vol. 858, pp. 985-994. DOI: 10.1007/978-3-030-01174-1\_75.
3. Garre C., Mundo D., Gubitosa M., Toso A. Real-Time and Real-Fast Performance

- of General-Purpose and Real-Time Operating Systems in Multithreaded Physical Simulation of Complex Mechanical Systems. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, Vol. 2014. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2014/945850> (accessed 16.06.2019). DOI: 10.1155/2014/945850.
4. Raja B., Firdous A., Ishak A.M., Anand M. Design and Implementation of Health Care Video Monitoring System Based on RTOS. *Indian Journal of Public Health Research and Development*, 2019, Vol. 10, No. 4, pp. 1260–1265.
  5. Lee S.C., Ong S.E., Ali N.B.Z. Test Methodology for Real-Time Operating System. *Bulletin of Networking, Computing, Systems, and Software*, 2014, Vol. 3, No. 1, pp. 10–12.
  6. Hillary N. Measuring Performance for Real-Time Systems. Chandler, Freescale Semiconductor, 2005. 14 p. Available at: <https://www.nxp.com/docs/en/white-paper/CWPERFORMWP.pdf> (accessed 15.06.2019).
  7. Herzog B., Gerhorst L., Heinloth B., Reif S., Hönig T., Schröder-Preikschat W. INTspect: Interrupt Latencies in the Linux Kernel. *Materials of VIII Brazilian Symposium «Computing Systems Engineering (SBESC) — 2018»*. Salvador, Bahia, Brazil, 2018, pp. 83–90. DOI: 10.1109/SBESC.2018.00021.
  8. Tan S.L., Nguyen B.A.T. Survey and Performance Evaluation of Real-Time Operating Systems (RTOS) for Small Microcontrollers. *IEEE Micro*, 2009, Vol. 99, Issue 99. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5210078> (accessed 18.06.2019). DOI: 10.1109/MM.2009.56.
  9. Parikh H., Shah R., Shah U., Deshmukh S. Performance Parameters of RTOSs; Comparison of Open Source RTOSs and Benchmarking Techniques. *Materials of International Conference «Advances in Technology and Engineering — 2013»*. Mumbai, India, 2013. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6524742> (accessed 12.06.2019). DOI: 10.1109/ICAdTE.2013.6524742.
  10. Nisar S.K., Ahmed M., Ayub H., Baig I. Operating System Performance Analyzer for Low-End Embedded Systems. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 2011, Vol. 8, Issue 6, No. 3, pp. 341–348.
  11. Abdulganiyu A., Rabiou I. Comparative Analysis of Real-Time Operating System (RTOS) of Some Selected OS Using External Signal Generator and Oscilloscope. *International Journal of Science and Engineering Investigations*, 2017, Vol. 6, No. 63, pp. 47–53.
  12. Koker K. Embedded RTOS: Performance Analysis with High Precision Counters. Article in the Book «Autonomous Robots and Agents». Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. pp. 171-179. DOI: 10.1007/978-3-540-73424-6-20.
  13. Reddy B.M.K., Satyanarayana G.S.R., Seetaramanjaneyulu B. Scheduling Latency Comparison of Two Open-Source RTOSs on CORTEX-M3. *Materials of International Conference «Embedded Systems — 2014»*. Coimbatore, India, 2014, pp. 59-62. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6953051> (accessed 14.06.2019). DOI: 10.1109/EmbeddedSys.2014.6953051.



**Мисбахов Р. Ш.**  
**Misbakhov R. Sh.**

кандидат технических наук,  
доцент,  
директор Инжинирингового  
центра «Компьютерное  
моделирование и  
инжиниринг  
в области энергетики  
и энергетического  
машиностроения»,  
ФГБОУ ВО «Казанский  
государственный  
энергетический  
университет»,  
г. Казань,  
Российская Федерация



**Васёв А. Н.**  
**Vasev A. N.**

начальник службы связи  
средств диспетчерского  
технологического  
управления,  
филиал ОАО «Сетевая  
Компания»,  
Набережночелнинские  
электрические сети,  
г. Набережные Челны,  
Российская Федерация



**Сахабутдинов А. Ж.**  
**Sakhabutdinov A. Zh.**

доктор технических наук,  
доцент кафедры  
радиофотоники и  
микроволновых технологий,  
ФГБОУ ВО «Казанский  
национальный  
исследовательский  
технический университет  
им. А.Н. Туполева — КАИ»,  
г. Казань,  
Российская Федерация



**Нуреев И. И.**  
**Nureev I. I.**

доктор технических наук,  
доцент,  
доцент кафедры  
радиофотоники и  
микроволновых технологий,  
ФГБОУ ВО «Казанский  
национальный  
исследовательский  
технический университет  
им. А.Н. Туполева — КАИ»,  
г. Казань,  
Российская Федерация



**Морозов О. Г.**  
**Morozov O. G.**

доктор технических наук,  
профессор,  
заведующий кафедрой  
радиофотоники и  
микроволновых технологий,  
ФГБОУ ВО «Казанский  
национальный  
исследовательский  
технический университет  
им. А.Н. Туполева — КАИ»,  
г. Казань,  
Российская Федерация



**Липатников К. А.**  
**Lipatnikov K. A.**

бакалавр техники и  
технологий,  
инженер научно-  
исследовательского  
института  
прикладной  
электродинамики,  
фотоники и живых систем,  
ФГБОУ ВО «Казанский  
национальный  
исследовательский  
технический университет  
им. А.Н. Туполева — КАИ»,  
г. Казань,  
Российская Федерация

## АДРЕСНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК АКУСТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЧАСТИЧНОГО РАЗРЯДА В КОМПЛЕКТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

В работе представлен датчик обнаружения частичного разряда в комплектных распределительных устройствах (КРУ) и обсуждены перспективы его реализации с использованием новых технологий построения акустических сенсоров на адресных волоконных брэгговских структурах (АВБС).

В электротехнической системе частичный разряд (ЧР) определяется как локальный электрический разряд, который лишь частично нарушает изоляцию между проводниками. ЧР обеспечивает раннюю индикацию повреждения изоляции, и поэтому мониторинг ЧР может стать важным инструментом для оценки состояния любого электрооборудования. Хотя измерение ЧР в основном выполняется в ходе технического обслуживания оборудования высокого напряжения, непрерывный мониторинг ЧР становится все более актуальным.

В ходе производства, эксплуатации или технического обслуживания поверхности проводников в КРУ могут оказаться увлажненными, загрязненными или даже поврежденными. Это будет негативно влиять на качество изоляции, что можно будет впоследствии обнаружить путем измерения интенсивности и числа частичных разрядов.

В последнее время датчики на основе волоконных брэгговских структур (ВБС) оказались полезными в различных областях науки и техники. В данной работе рассматривается сдвиг длины волны Брэгга ВБС, вызванный импульсным акустическим давлением, генерируемым во время ЧР в герметичном КРУ. При этом используется адресная ВБС (АВБС), которая при наличии нескольких датчиков, установленных в КРУ, может указывать на зону возникновения ЧР и его интенсивность, которые определяются, в отличие от многих известных устройств, в радиочастотной области. Кроме того, АВБС свободны от влияния электро- и радиотехнических помех в силу оптической природы датчика.

Разработка датчика осуществлялась в рамках концепции «Smart Grids Plus» для слоя диагностического мониторинга на основе пассивной волоконно-оптической сенсорной сети гибридной структуры с радиофотонной обработкой сигналов.

**Ключевые слова:** диагностический мониторинг, оборудование высокого напряжения, комплектное распределительное устройство, частичный разряд, датчик акустической эмиссии, адресная волоконная брэгговская решетка, микроволновая фотоника.

## ADDRESS FIBER OPTICAL SENSOR FOR ACOUSTIC DETECTION OF A PARTIAL DISCHARGE IN A SWITCHGEAR

The paper presents a sensor for detecting a partial discharge in switchgear (SG) and discusses the prospects for its implementation using new technologies for building acoustic sensors on address fiber Bragg structures (AFBS).

In an electrical system, a partial discharge (PD) is defined as a local electrical discharge that only partially breaks the insulation between conductors. PD provides an early indication of insulation damage, and therefore monitoring of the PD can be an important tool for assessing the state of any electrical equipment. Although PD measurement is mainly performed during the maintenance of high voltage equipment, continuous PD monitoring is becoming increasingly relevant.

During production, operation, or maintenance, the surface of the conductors in SG may be humidified, contaminated, or even damaged. This will negatively affect the quality of the insulation, which can be subsequently detected by measuring the intensity and the number of PD.

Recently, sensors based on fiber Bragg structures (FBS) have proven to be useful in various fields of science and technology. In this paper, we consider the FBS Bragg wavelength shift caused by the pulsed acoustic pressure generated during the PD in an airtight switchgear. It uses

the address FBS, which, if there are several sensors installed in the SG, may indicate the zone of occurrence of the PD and its intensity, which are determined, unlike many known devices, in the microwave frequency domain. In addition, AFBS free from the influence of electrical and radio interference due to the optical nature of the sensor.

The sensor was developed within the framework of the «Smart Grids Plus» concept for a diagnostic monitoring layer based on the passive fiber-optic sensor network of a hybrid structure with radio-photon signal processing.

**Key words:** diagnostic monitoring, high voltage equipment, complete switchgear, partial discharge, acoustic emission sensor, address fiber Bragg grating, microwave photonics.

### *Введение*

Частичные разряды являются причиной и признаком деградации системы изоляции, а мониторинг их активности используется в качестве инструмента для оценки состояния изоляции в различных высоковольтных устройствах и системах, включая комплектные распределительные устройства КРУ [1].

Среди множества методов мониторинга обнаружение ультразвуковой акустической эмиссии (УАЭ) обладает наибольшими преимуществами, так как обеспечивает возможность мониторинга в реальном режиме времени и определение местоположения частичного разряда (ЧР), что существенно в больших и относительно больших тестовых объектах, таких как силовые трансформаторы и КРУ [2]. Обнаружение и определение местоположения ЧР с использованием методов УАЭ обычно выполняются с помощью внешних пьезоэлектрических ультразвуковых датчиков, установленных на стенках КРУ, работающих в узкой полосе частот в диапазоне 150 кГц. Для развития методов УАЭ необходимо иметь датчики, которые могут быть размещены внутри КРУ, в зонах возможного возникновения ЧР, лишенных указанных недостатков.

Для решения этой задачи недавно были разработаны волоконно-оптические датчики акустического обнаружения (ВОДАО) ЧР, которые основаны на использовании внутри волоконных интерферометров Фабри-Перо (ВИФП) [3] и волоконных брэгговских решеток (ВБР) [4]. Однако эти датчики обладают умеренной чувствительностью, которая зависит от технологии их интеграции в зоны КРУ и, главное, безадресностью. При волновом или временном мультиплексировании указанных датчиков в рамках одного или нескольких КРУ, т.е. формировании услов-

ной адресности, стоимость системы их интеррогации достигает сотен тысяч рублей. Более чувствительные интерферометрические ВОДАО ЧР [5] конструктивно сложнее, имеют сверхузкополосную частотную характеристику, но, самое главное, также безадресны.

В данной работе рассматривается ВОДАО ЧР, основанные на контроле сдвига длины волны Брэгга волоконной брэгговской структуры (ВБС), вызванного импульсным акустическим давлением, генерируемым во время ЧР. При этом используется адресная ВБС (АВБС) [6], которая при наличии нескольких датчиков, установленных в КРУ, может указывать на зону возникновения ЧР и его интенсивность, которые определяются, в отличие от многих известных устройств, в радиочастотной области. Кроме того, АВБС свободны от влияния электро- и радиотехнических помех в силу оптической природы датчика.

Разработка датчика осуществлялась в рамках концепции «Smart Grids Plus» [7] для слоя диагностического мониторинга состояния элементов КРУ на основе пассивной волоконно-оптической сенсорной сети гибридной структуры с радиофотонной обработкой сигналов.

### *Принцип работы адресного ВОДАО ЧР*

В герметичном КРУ ЧР генерируется в присутствии высокого напряжения и слабой изоляции, что приводит к генерации акустического импульса короткой длительности с частотой от 30 до 300 кГц [8]. В результате возникает достаточный уровень давления внутри закрытого объема, вызывающий переменное изменение натяжения АВБС. Не рассматривая на данном этапе свойства адресности АВБС (в целом при внешних воздействиях она ведет себя как обычная ВБР),

можно сказать, что сдвиг  $\Delta\lambda_B$  ее центральной длины волны  $\lambda_B$  при воздействии малого конечного изменения давления  $\Delta P$  будет описываться следующим выражением:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left[ \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial P} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial P} \right] \Delta P, \quad (1)$$

где

$$\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial P} = -\frac{(1-2\nu)}{E}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial P} = \frac{n^2}{2E} (1-2\nu)(2\rho_{12} + \rho_{11})$$

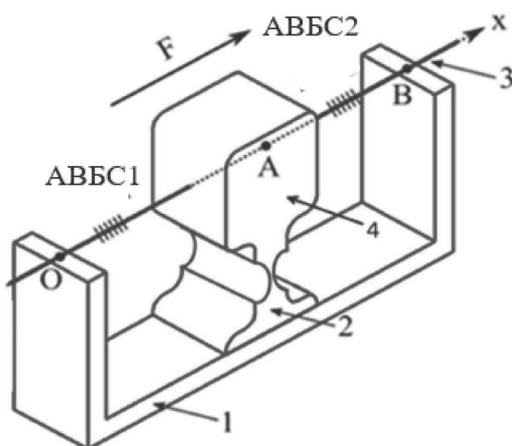
а в результате получим

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left[ -\frac{(1-2\nu)}{E} + \frac{n^2}{2E} (1-2\nu)(2\rho_{12} + \rho_{11}) \right] \Delta P, \quad (3)$$

где упругие свойства волокна описываются модулем Юнга  $E$  волокна ( $E=70$  ГПа), коэффициентом Пуассона  $\nu$  ( $\nu=0,16$ ) и волочно-оптическими коэффициентами  $\rho_{11}=0,121$  и  $\rho_{12}=0,216$  при эффективном  $n=1,46$ .

ЧР внутри КРУ генерирует акустическую волну импульсного характера, следовательно, регистрация сдвига длины волны ВБР (3) и ее величины позволит получить информацию о характере ЧР.

Применение АВБС характеризуется двумя преимуществами. Первое — точное определение места установки данной решетки. Второе — возможность проведения обработки информации о  $\Delta\lambda_B$  в радиочастотном



1 — жесткая основа; 2 — демпфирующий элемент; 3 — волокно; 4 — чувствительный элемент

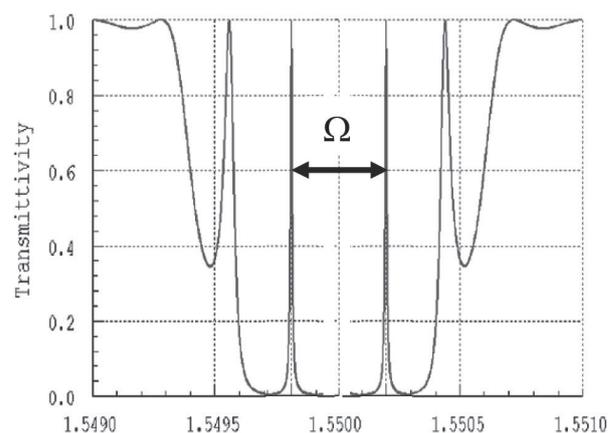
**Рисунок 1.** Конструкция адресного ВОДАО ЧР

Воздействие УАЭ измеряется вдоль оси ОХ при условии, что есть проекция эффективной силы, создаваемой акустическим давлением через чувствительный элемент 4 на

диапазоне, не оптическом, что однозначно свидетельствует о возможности повышения разрешающей способности, точности и чувствительности измерений.

В известных работах [8, 9] сдвиг напрямую связан с интенсивностью ЧР и лежит в диапазоне 10–300 пм. При этом ВОДАО ЧР изготавливался на пленке из тефлона [8] с установкой на ней двух пар встречно включенных ВБР, и в виде ВБР, установленной в натяженном состоянии в окне пластины из плексигласа [9]. Конструктивно более высокая чувствительность при решении близких задач была получена в Научно-исследовательском институте прикладной электродинамики, фотоники и живых систем ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ» (НИИ ПРЭФЖС КНИТУ — КАИ им. А.Н. Туполева) при создании датчика вибраций «Виб-А» [10] и акселерометра на двух АВБС [11]. Для реализации адресного ВОДАО ЧР было выбрано решение, аналогичное акселерометрическому.

На рисунке 1 показана конструкция адресного ВОДАО ЧР. На рисунке 2 показана спектральная характеристика АВБС на основе ВБР с двумя дискретными фазовыми  $\pi$ -сдвигами и разностной частотой между ними  $\Omega$ , которая уникальна для каждой структуры.



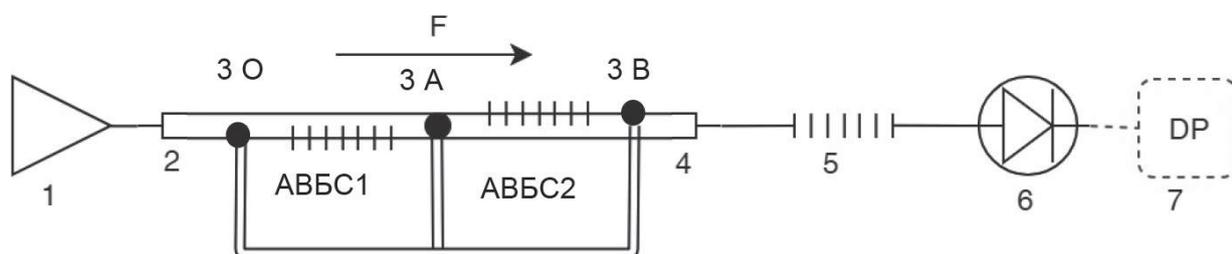
**Рисунок 2.** Спектральная характеристика АВБС на основе ВБР с двумя дискретными фазовыми  $\pi$ -сдвигами

ось волокна 3 ОХ, закрепленных на жесткой основе 1 ВОДАО через демпфирующий элемент 2, формирующий направление колебаний.

На оптическом волокне 3 формируются две АВБС: АВБС1 — на первой секции волокна и АВБС2 на другой секции волокна. Они имеют одинаковую центральную длину волны 1550 нм. Различие между ними заключается в спектральной ширине провала  $\Omega$  между двумя окнами прозрачности (рисунок 2). Рабочие участки оптического волокна с предварительным натяжением жестко закреплены по бокам основы и на чувствительном элементе ВОДАО в точках О, А и В, чтобы обеспечить равенство длин сечений АО и АВ и одинаковое натяжение участков волокон для АВБС1 и для АВБС2. Под действием УАЭ в направлении F чувствительный эле-

мент отклоняется от положения равновесия. Отклонение включает в себя растяжение участка волокна АВБС1, и одновременно снижается предварительное натяжение волоконной секции АВБС2. В то же время длина волны Брэгга АВБС1 увеличивается, а длина волны Брэгга АВБС2 уменьшается на такую же величину. Таким образом, суммарно получаемый эффект от воздействия УАЭ в 2 раза превышает эффект, описанный в [3], что свидетельствует и об увеличении чувствительности разрабатываемого ВОДАО ЧР.

На рисунке 3 показана функциональная оптоэлектронная схема адресного ВОДАО ЧР.



1 — широкополосный лазерный источник; 2 — оптоволоконный делитель; 3 — точки крепления О, А, В; 4 — оптоволоконный сумматор; 5 — амплитудно-частотный фильтр с линейной наклонной характеристикой; 6 — фотоприемник; 7 — цифровой процессор

**Рисунок 3.** Функциональная опто-электронная схема ВОДАО ЧР

Широкополосный лазерный источник 1 генерирует непрерывное лазерное излучение, которое поступает в волокно. Каждая из двух секций волокна содержит по одной АВБС. Внешнее давление УАЭ F воздействует в направлении оптоволоконка. Под действием проекции F чувствительный элемент 3 движется и воздействует на волокно, так что АВБС1 растягивается (сжимается), а АВБС2 одновременно сжимается (растягивается). Оптическое излучение, проходя через АВБС, передается на линейный фильтр 5 с наклонной амплитудно-частотной характеристикой, проходит его и далее поступает на фотоприемник 6.

Следовательно, фотоприемник принимает 2 двухчастотных лазерных излучения, генерируемых частотными характеристиками АВБС1 и АВБС2, с асимметричными амплитудами относительно их центральных частот, определяемые характеристиками фильтра и положением АВБС относительно его спектральной характеристики. Данные с фото-

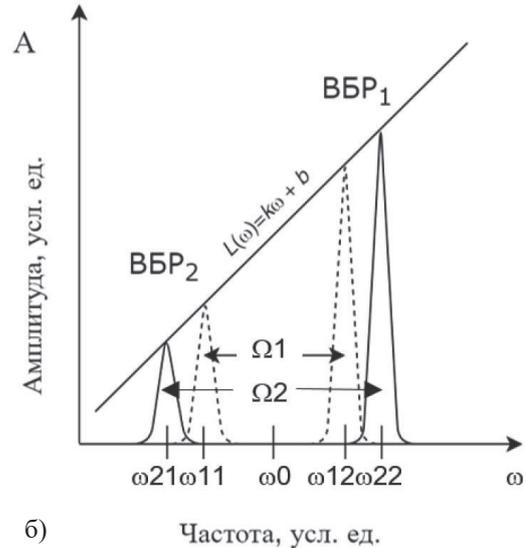
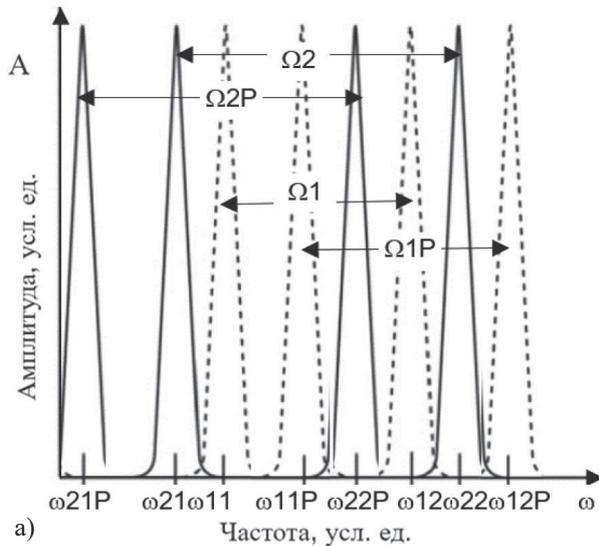
приемника поступают на устройство цифровой обработки сигналов, где предварительно выделяются в фильтрах разностных частот  $\Omega$ , обеспечивая высокий уровень отношения сигнал / шум измерения в области минимальных шумов фотоприемника, затем анализируются с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ) для вычисления коэффициентов амплитудной модуляции биений между составляющими окон прозрачности АВБС и далее расшифровываются в режиме реального времени для фиксации и определения характеристик ЧР.

*Принципы опроса и калибровки ВОДАО ЧР*

Поскольку далее речь пойдет об обработке в радиочастотном диапазоне, а значения для линейных частот всех разностных  $\Omega$  лежат в области 10–30 ГГц, перейдем на рисунках к обозначениям в частотах.

На рисунке 4, а схематически показана амплитудно-частотная характеристика спектрального отклика двух АВБС в невозмущен-

ном состоянии  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  и под воздействием давления, вызванного УАЭ,  $\Omega_{1P}$  и  $\Omega_{2P}$ . При этом следует учесть, что  $\Omega_1 = \Omega_{1P}$ ,  $\Omega_2 = \Omega_{2P}$ , но центральные длины волн АВБС1 и АВБС2 сместились соответственно в область низких и высоких длин волн. Параметры угла наклона и смещения линейного наклонного фильтра выбираются, исходя из параметров измерительной системы, и считаются известными. На фотоприемнике будут происходить биения частотных составляющих, сформированных окнами прозрачности АВБС1 и АВБС2.



а) невозмущенное и возмущенное состояние до фильтра; б) невозмущенное состояние после фильтра

**Рисунок 4.** Составляющие лазерного излучения на частотах окон прозрачности АВБС1 (штриховая линия) и АВБС2 (сплошная линия)

Определим коэффициент модуляции для составляющих лазерного излучения одной из решеток, прошедших наклонный фильтр:

$$M = \frac{2 \cdot A_1 \cdot A_2}{A_1^2 + A_2^2}, \quad (4)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  — амплитуды соответственно нижней и верхней составляющих излучения, прошедших через окна прозрачности.

Спектральную характеристику линейного наклонного фильтра зададим в виде линейной зависимости:

$$L(\omega) = k \cdot \omega + b, \quad (5)$$

где  $k$  и  $b$  — параметры прямой, описывающей амплитудно-частотную характеристику линейного наклонного фильтра.

Амплитуды  $A_1$  и  $A_2$  спектральных откликов АВБС1 и АВБС2 после прохождения линейного наклонного фильтра изменятся:

На основе анализа формы и характеристик параметров огибающей кривой этих биений можно вывести зависимость центральной длины волны  $\lambda_B$  АВБС от коэффициента модуляции результирующих биений. Схема, поясняющая процесс измерения коэффициента модуляции двух АВБС, прошедших через наклонный фильтр с линейной амплитудно-частотной характеристикой, приведена на рисунке 4, б для стадии калибровки и невозмущенного состояния АВБС.

$$\begin{aligned} A_1 &= A_1(\omega_{11}) = L(\omega_{11}) = \\ &= k \cdot \omega_{11} + b = k \cdot (\omega_0 - \Omega_1 / 2) + b, \\ A_2 &= A_2(\omega_{12}) = L(\omega_{12}) = \\ &= k \cdot \omega_{12} + b = k \cdot (\omega_0 + \Omega_1 / 2) + b, \end{aligned} \quad (6)$$

где переменные  $\omega$  и  $\Omega$  определены невозмущенным состоянием АВБС. Подставив (6) в (4), получим выражение для коэффициента модуляции, связывающее среднюю частоту АВБС1 и АВБС2,  $\omega_0 = (\omega_{11} + \omega_{12})/2$ , соответствующую их  $\Delta\lambda_B$ , параметры линейного наклонного фильтра  $k$  и  $b$  и разностную частоту  $\Omega = (\omega_{11} - \omega_{12})/2$ :

$$M(\Omega) = \frac{(k \cdot \omega_0 + b)^2 - k^2 \cdot \Omega^2}{(k \cdot \omega_0 + b)^2 + k^2 \cdot \Omega^2}. \quad (7)$$

Величина разностной частоты  $\Omega$  меняется в диапазоне  $(0, \Omega_{\max})$ , где  $\Omega_{\max} = \max(\omega_1 - \omega_2) \forall \omega_1, \omega_2$ , которая определяется параметрами

системы. При этом  $\Omega_{\max} \ll \omega$ , а значит числитель выражения (7) всегда положителен, следовательно, значения функции  $M(\Omega)$  принадлежат интервалу  $(1, 0)$ , а сама функция  $M(\Omega)$  является монотонно убывающей ( $M(\Omega) < 0 \forall \Omega > 0$ ), при  $\Omega \in (0, \Omega_{\max})$ . Монотонность коэффициента модуляции  $M(\Omega)$  при  $\Omega \in (0 \text{ до } \Omega_{\max})$ , позволяет однозначно связать разностную частоту  $\Omega$  с величиной коэффициента модуляции. Отметим, что задача определения коэффициента модуляции в общем случае не требует определения разностной частоты  $\Omega$ , а величина коэффициента модуляции сама содержит полную информацию, необходимую для определения разностной частоты  $\Omega$ .

При решении задач калибровки, определив величину коэффициента модуляции результирующего колебания  $M(\Omega)$ , можно решить задачу поиска разностной частоты  $\Omega$ . Вместе с тем, учитывая монотонную зависимость коэффициента модуляции  $M(\Omega)$  от разностной частоты  $\Omega$ , можно пропустить промежуточные вычисления и построить функциональную зависимость действующего в направлении оси  $Ox$  акустического давления  $F$  (рисунок 1) от величины коэффициента модуляции:

$$F(M(\Omega)) = \sum_{k=0}^K c_k M^k(\Omega), \quad (8)$$

где  $c_k$  — коэффициенты аппроксимирующего полинома;

$K$  — его степень.

Поиск коэффициентов зависимости (8) ведется методом наименьших квадратов, для чего на испытательном стенде проводится серия  $N$  измерений, формируется набор значений заданного акустического давления  $F_i$  и измеренных значений коэффициента модуляции  $M_i(\Omega)$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ . После чего, найдя минимум функционала:

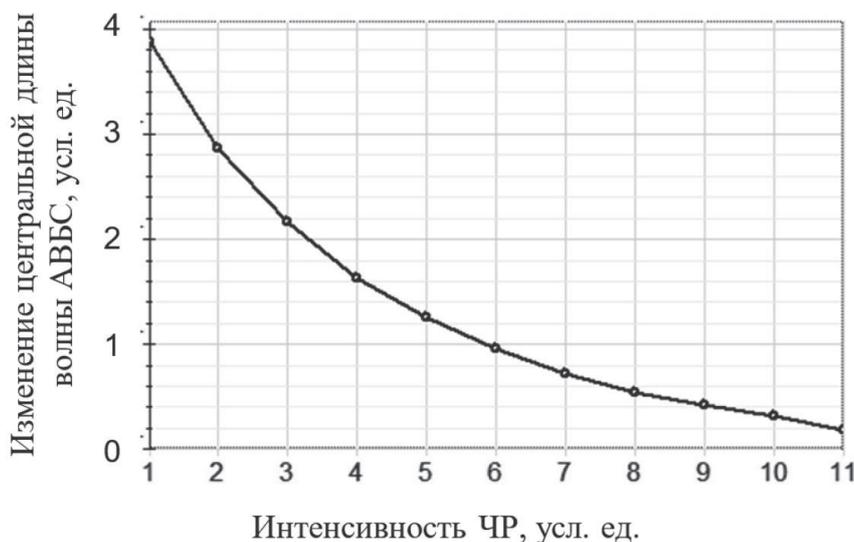
$$\Psi(c_0, c_1, \dots, c_n) = \sum_{i=1}^N \left( F_i - \sum_{k=0}^K c_k M_i^k(\Omega) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

получим искомое выражение зависимости действующего давления от величины  $M(\Omega)$ . Для того чтобы обеспечить максимальную точность аппроксимации, измерения проводятся для всего диапазона изменения акустического давления как функции интенсивности ЧР. Поиск степени  $K$  зависимости (9) ведется путем постепенного увеличения значения  $K$  до тех пор, пока коэффициент при старшей степени  $c_K$  не станет близким к нулю (заведомо меньше наперед заданного значения  $\epsilon$ ).

#### Модельный эксперимент

Интегральная измерительная характеристика представлена как зависимость нормированного изменения центральных длин волн АВБС1 и АВБС2 от интенсивности ЧР, выраженных в условных единицах, и приведена на рисунке 5.

Как можно заметить, указанная зависимость является монотонной функцией и обеспечивает возможность однозначного опре-



**Рисунок 5.** Зависимость нормированного изменения центральных длин волн АВБС1 и АВБС2 от интенсивности ЧР, выраженных в условных единицах (для интенсивности ЧР, равной 1, — максимальное значение; для интенсивности ЧР, равной 11, — минимальное)

деления характеристик ЧР. По характеру поведения функция нелинейная и определяется кривизной частотного наклонного фильтра в амплитудно-частотной плоскости. Данная зависимость определяет общую функцию преобразования интенсивности ЧР в выходной сигнал, вследствие чего подлежит паспортизации для каждого образца датчика.

### Выводы

Адресный ВОДАО на основе двух АВБС разработан и смоделирован для мониторинга ЧР в КРУ. Наблюдается, что акустическая волна, генерируемая ЧР внутри КРУ, вызывает сдвиги длин волн Брэгга указанных решеток, которые регистрируются радиочастотным интеррогатором. Разработанный датчик невосприимчив к электромагнитным и электротехническим помехам, имеет высокий потенциал для внедрения в проектирование оперативной системы мониторинга ЧР в рамках концепции «Smart Grids Plus». Это экономически эффективный, без сложных оптико-электронных интеррогаторов и специальных каналов опроса инструмент для

оперативного мониторинга КРУ, который может быть использован для контроля других энергетических генерирующих, распределительных и преобразовательных устройств и просто встроено в слой диагностического мониторинга на основе пассивной волоконно-оптической сенсорной сети.

Учитывая возможности АВБС [6], на их основе могут быть построены мультисенсорные системы для распределенного акустического анализа внутри линейки КРУ или системы типа ММО с разной ориентацией датчиков внутри одного устройства. Оба варианта вполне эффективно позволяют локализовать место возникновения ЧР, даже если сами ВОДАО установлены не вблизи конкретного высоковольтного оборудования. Хотя существуют и некоторые другие факторы, такие как статическое давление, температура, акустический шум, которые могут вызвать сдвиг центральной длины волны АВБС, их вариации существенно отличаются от акустического характера ЧР, форма волны которого представляет собой короткий и мощный импульс в указанном сдвиге.

### Список литературы

1. Саушев А.В., Шерстнев Д.А., Широков Н.В. Анализ методов диагностики аппаратов высокого напряжения // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 5. С. 1073-1085. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1073-1085.
2. Fu C., Si W., Li H., Li D., Yuan P., Yu Y. A Novel High-Performance Beam-Supported Membrane Structure with Enhanced Design Flexibility for Partial Discharge Detection // Sensors. 2017. Vol. 17. Issue 3. P. 593–603. DOI: 10.3390/s17030593.
3. Zhang T., Pang F., Liu H., Cheng J., Lv L., Zhang X., Chen N., Wang T. A Fiber-Optic Sensor for Acoustic Emission Detection in a High Voltage Cable System // Sensors. 2016. Vol. 16. Issue 12. P. 2026-2036. DOI: 10.3390/s16122026.
4. Ghorat M., Gharehpetian G.B., Latifi H., Hejazi M.A., Layeghi A. Partial Discharge Acoustic Emission Detector Using Mandrel-Connected Fiber Bragg Grating Sensor // Optical Engineering. 2018. Vol. 57. Issue 7. URL:

<https://www.spiedigitallibrary.org/journals/Optical-Engineering/volume-57/issue-7/074107/Partial-discharge-acoustic-emission-detector-using-mandrel-connected-fiber-Bragg/10.1117/1.OE.57.7.074107.short?SSO=1> (accessed 24.06.2019). DOI: 10.1117/1.OE.57.7.074107.

5. Posada-Roman J., Garcia-Souto J.A., Rubio-Serrano J. Fiber Optic Sensor for Acoustic Detection of Partial Discharges in Oil-Paper Insulated Electrical Systems // Sensors. 2012. Vol. 12. Issue 4. P. 4793-4802. DOI: 10.3390/s120404793.

6. Сахабутдинов А.Ж., Мисбахов Р.Ш., Мисбахов Р.Ш., Морозов О.Г., Нуреев И.И., Кузнецов А.А., Артемьев В.И., Куревин В.В., Пуртов В.В. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2017. № 3. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343> (дата обращения: 22.06.2019).

7. Маскевич К.В., Мисбахов Р.Ш., Морозов О.Г., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж. Волоконно-оптическая парадигма диагностического мониторинга цифровой энергетики. Основа концепции «Smart Grids Plus» // Фотон-экспресс. 2018. № 4. С. 18-25.

8. Sarkar B., Mishra D.K., Koley C., Roy N.K., Biswas P. Intensity Modulated Fiber Bragg Grating Sensor for Detection of Partial Discharges Inside High Voltage Apparatus // IEEE Sensor Journal. 2016. Vol. 16. Issue 22. P. 7950-7957. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2608743.

9. Sarkar B., Roy N., Koley C., Kumbhakar P. A Fiber Optic Sensor for the Detection of Partial Discharge within the High Voltage Power Transformer // Frontiers in Computer, Communication and Electrical Engineering: Article in the Book. London: Taylor & Francis Group, 2016. P. 177–181.

10. Липатников К.А., Сахабутдинов А.Ж., Нуреев И.И., Кузнецов А.А., Морозов О.Г., Феофилактов С.В. Волоконно-оптический датчик вибрации «Виб-А» // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2018. № 4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2018/5207](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2018/5207) (дата обращения: 22.06.2019).

11. Sakhabutdinov A.Zh., Chistyakov V.V., Morozov O.G., Nureev I.I., Kuznetsov A.A., Faskhutdinov L.M., Nosikov M.V. Fiber-Optic Acceleration Sensor on Duplex Fiber Bragg Structures // Journal of Computational and Engineering Mathematics. 2018. Vol. 5. Issue 4. P. 16-32. DOI: 10.14529/jcem180402.

## References

1. Saushev A.V., Sherstnev D.A., Shirokov N.V. Analiz metodov diagnostiki apparatov vysokogo napryazheniya [Analysis of Methods of Diagnostics of High Voltage Apparatus]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova — Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S.O. Makarova*, 2017, Vol. 9, No. 5, pp. 1073-1085. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1073-1085. [in Russian].

2. Fu C., Si W., Li H., Li D., Yuan P., Yu Y. A Novel High-Performance Beam-Supported Membrane Structure with Enhanced Design Flexibility for Partial Discharge Detection.

*Sensors*, 2017, Vol. 17, Issue 3, pp. 593-603. DOI: 10.3390/s17030593.

3. Zhang T., Pang F., Liu H., Cheng J., Lv L., Zhang X., Chen N., Wang T. A Fiber-Optic Sensor for Acoustic Emission Detection in a High Voltage Cable System. *Sensors*, 2016, Vol. 16, Issue 12, pp. 2026–2036. DOI: 10.3390/s16122026.

4. Ghorat M., Gharehpetian G.B., Lati-fi H., Hejazi M.A., Layeghi A. Partial Discharge Acoustic Emission Detector Using Mandrel-Connected Fiber Bragg Grating Sensor. *Optical Engineering*, 2018, Vol. 57, Issue 7, Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/Optical-Engineering/volume-57/issue-7/074107/Partial-discharge-acoustic-emission-detector-using-mandrel-connected-fiber-Bragg/10.1117/1.OE.57.7.074107.short?SSO=1> (accessed 24.06.2019). DOI: 10.1117/1.OE.57.7.074107.

5. Posada-Roman J., Garcia-Souto J.A., Rubio-Serrano J. Fiber Optic Sensor for Acoustic Detection of Partial Discharges in Oil-Paper Insulated Electrical Systems. *Sensors*, 2012, Vol. 12, Issue 4, pp. 4793-4802. DOI: 10.3390/s120404793.

6. Sakhabutdinov A.Zh., Misbakhov R.Sh., Misbakhov R.Sh., Morozov O.G., Nureev I.I., Kuznetsov A.A., Artemev V.I., Kurevin V.V., Purtov V.V. Volokonnye breggovskie reshetki s dvumya fazovymi sdvigami kak chuvstvitel'nyi element i instrument mul'tipleksirovaniya sensornykh setei [Fiber Bragg Gratings with Two Phase Shifts as a Sensing Element and a Multiplexing Tool for Sensor Networks]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Inzhenernyi vestnik Dona» — Electronic Scientific Journal «Engineering Journal of Don»*, 2017, No. 3. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/N3y2017/4343> (accessed 22.06.2019). [in Russian].

7. Maskevich K.V., Misbakhov R.Sh., Morozov O.G., Nureev I.I., Sakhabutdinov A.Zh. Volokonno-opticheskaya paradi-gma diagnosticheskogo monitoringa tsifrovoy energetiki. Osnova kontseptsii «Smart Grids Plus» [Fiber-Optic Paradigm of Diagnostic Monitoring of Digital Energy. The Basis of the Concept «Smart Grids Plus»]. *Foton-ekspress — Photon Express*, 2018, No. 4, pp. 18–25. [in Russian].

8. Sarkar B., Mishra D.K., Koley C., Roy N.K., Biswas P. Intensity Modulated Fiber Bragg Grating Sensor for Detection of Partial Discharges Inside High Voltage Apparatus. *IEEE Sensor Journal*, 2016, Vol. 16, Issue 22, pp. 7950-7957. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2608743.
9. Sarkar B., Roy N., Koley C., Kumbhakar P. A Fiber Optic Sensor for the Detection of Partial Discharge within the High Voltage Power Transformer. *Article in the Book «Frontiers in Computer, Communication and Electrical Engineering»*. London, Taylor & Francis Group, 2016. pp. 177–181.
10. Lipatnikov K.A., Sakhabutdinov A.Zh., Nureev I.I., Kuznetsov A.A., Morozov O.G., Feofilaktov S.V. Volokonno-opticheskiy datchik vibratsii «Vib-A» [Fiber-Optical Vibration Sensor «VIB-A»]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Inzhenernyi vestnik Dona» — Electronic Scientific Journal «Engineering Journal of Don»*, 2018, No. 4. Available at: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5207](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5207) (accessed 22.06.2019). [in Russian].
11. Sakhabutdinov A.Zh., Chistyakov V.V., Morozov O.G., Nureev I.I., Kuznetsov A.A., Faskhutdinov L.M., Nosikov M.V. Fiber-Optic Acceleration Sensor on Duplex Fiber Bragg Structures. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*, 2018, Vol. 5, Issue 4, pp. 16-32. DOI: 10.14529/jcem180402.



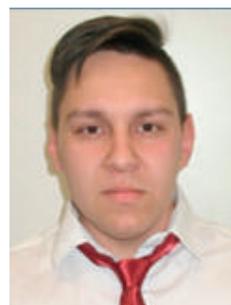
**Варганова А. В.**  
**Varganova A. V.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
электрооборудования  
промышленных  
предприятий,  
ФГБОУ ВО  
«Магнитогорский  
государственный  
технический университет  
им. Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск,  
Российская Федерация



**Панова Е. А.**  
**Panova E. A.**

кандидат технических наук,  
доцент, доцент кафедры  
электрооборудования  
промышленных  
предприятий,  
ФГБОУ ВО  
«Магнитогорский  
государственный  
технический университет  
им. Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск,  
Российская Федерация



**Кушмил О. Е.**  
**Kushmil O. E.**

студент кафедры  
электрооборудования  
промышленных  
предприятий,  
ФГБОУ ВО  
«Магнитогорский  
государственный  
технический университет  
им. Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск,  
Российская Федерация



**Анисимова Н. А.**  
**Anisimova N. A.**

аспирант кафедры электрооборудования  
промышленных предприятий  
ФГБОУ ВО «Магнитогорский  
государственный технический  
университет им. Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск, Российская Федерация



**Хатюшина Т. В.**  
**Hatyushina T. V.**

магистрант кафедры электрооборудования  
промышленных предприятий  
ФГБОУ ВО «Магнитогорский  
государственный технический  
университет им. Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск, Российская Федерация

УДК 621.31

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-111-117

## АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА И РАССТАНОВКИ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ В ЦЕПЯХ ОБОРУДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ В САПР «ОРУ САД»

Современные темпы строительства и реконструкции промышленных, жилых и других объектов увеличивают объемы и скорость проектирования. В связи с этим все чаще проектировщики допускают опечатки, неточности и ошибки при разработке проектной документации на заданный объект. При проектировании электроустановок необходимо знать и раз-

бираться в значительном объеме нормативно-технической документации, которая имеет свойство меняться. Поэтому разработка автоматизированных систем проектирования объектов электроэнергетики является актуальной задачей, которая позволит сократить число ошибок при проектировании, ускорить темпы разработки проекта и избавить инженера-проектировщика от рутинной работы, освободив время для развития его квалификационных навыков в новых областях. Кроме того, ввод в эксплуатацию новых промышленных и гражданских зданий требует строительства новых подстанций, поэтому в данной работе рассматриваются вопросы разработки системы автоматизированного проектирования распределительных устройств подстанций с высшим напряжением 35–220 кВ. В статье представлена разработка алгоритма автоматизированной расстановки приборов на основных присоединениях распределительных устройств низкого и высокого напряжения. При разработке основное внимание было уделено нормативно-технической документации, требующей обязательную установку приборов в электроустановках. Алгоритмы адаптированы к условиям системы автоматизированного проектирования «ОРУ САД», позволяющей разрабатывать проектную документацию по электрической части подстанций, включая спецификации и формирование пояснительных записок, отличающуюся возможностью технико-экономической оценки вариантов возможных схем распределительных устройств с учетом фактора надежности. Основные исходные данные для проектирования хранятся в специально разработанной базе данных электрооборудования, содержащей технико-экономические показатели, разработанной в MS SQL Server, позволяющей дополнять новые и изменять данные существующего оборудования и токоведущих частей. Результаты работы выгружаются в графический редактор КОМПАС. На любом этапе проектирования разработчик может вносить коррективы, если это требуется заказчиком и не противоречит нормативным документам.

Работа выполняется при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых-кандидатов наук МК-939.2019.8.

**Ключевые слова:** контрольно-измерительные приборы, распределительное устройство, присоединение, подстанция, напряжение, элемент, нормативно-техническая документация, САПР, алгоритм, программное обеспечение.

## ALGORITHM FOR AUTOMATED SELECTION AND INSTALLATION OF CONTROL AND MEASURING INSTRUMENTS IN CHAINS OF HIGH VOLTAGE DISTRIBUTION DEVICES IN ORU CAD

Modern rates of construction and reconstruction of industrial, residential and other objects increase the design volume and speed. In this regard, more and more often designers make typos, inaccuracies and errors in the development of project documentation for a given object. When designing electrical installations, it is necessary to know and understand a significant amount of regulatory and technical documentation that tends to change. Therefore, the development of automated systems for designing electric power facilities is an urgent task that will reduce the number of design errors, accelerate the pace of project development and relieve the engineer from routine work, freeing up time to develop his qualifications in new areas. In addition, the commissioning of new industrial and civil buildings requires the construction of new substations, so this paper addresses the development of a computer-aided design of switchgear for substations with a higher voltage of 35–220 kV. The paper considers the task of developing an algorithm for automated devices placement at the main connections of low and high voltage switchgears. During the development, the main attention was paid to the regulatory and technical documentation that requires the mandatory devices in electrical installations. The algorithms are adapted to the conditions of computer-aided design of the «open switchgear CAD», which allows developing design documentation for the electrical part of substations, including specifications and the formation of explanatory notes, characterized by the technical and economic evaluation possibility for possible switchgear based on the reliability factor. The main source data for the design is stored in a specially developed electrical equipment database containing technical and economic indicators and developed in MS SQL Server, and allowing to add new and modify data of existing equipment and current-carrying parts. The work results are uploaded to the graphic editor

КОМПАС. At any design stage, the developer can make adjustments if this is required by the customer and does not contradict the regulations. The work is supported by a grant from the President of the Russian Federation for young scientists-candidates of sciences МК-939.201.8.

**Key words:** instrumentation, switchgear, connection, substation, voltage, element, regulatory and technical documentation, CAD, algorithm, software.

*Введение*

Внедрение систем автоматизированного проектирования для решения задач в области электроэнергетики получило широкое распространение. В [1] рассматривается САПР для проектирования и расчета освещения. Большая часть работ посвящена проектированию систем электроснабжения [2], выбору и проверке токоведущих частей [3] и аппаратов [4].

Существует большое число программных продуктов, позволяющих осуществлять вышеперечисленные возможности, однако в области проектирования распределительных устройств подстанций отсутствует комплексный подход, позволяющий на основе технического задания осуществить разработку пакета проектной документации с возможностью автоматизированного построения однолинейных схем, планов, компоновки, выбора и проверки электрооборудования, расчета токов короткого замыкания и осуществления технико-экономического сравнения вариантов распределительных устройств с учетом возможного перерыва электроснабжения.

Данная задача является актуальной, и ее решение позволит проектным институтам повысить производительность и качество проектирования подстанций.

*Описание алгоритма*

*автоматизированной расстановки контрольно-измерительных приборов*

В системе автоматизированного проектирования «ОРУ САД» [5] реализованы алгоритмы построения однолинейных схем [6]. Для доработки данного алгоритма необходимо осуществить разработку автоматизированных выбора и расстановки контрольно-измерительных приборов с возможностью вывода результатов работы в графический редактор КОМПАС.

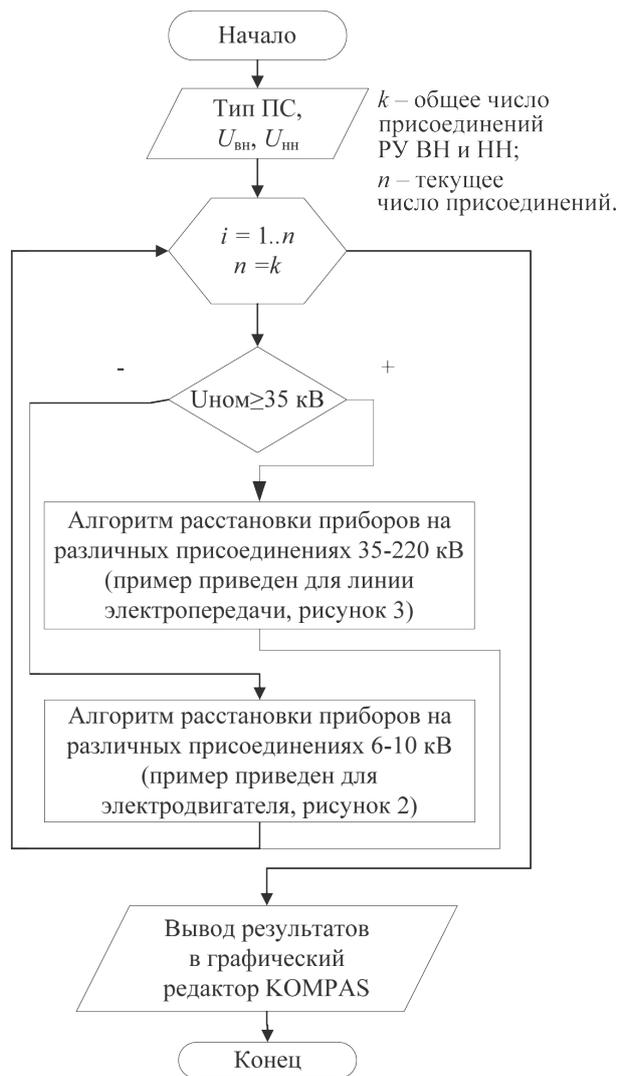
Перечень контрольно-измерительных приборов определен в соответствии с Правилами устройства электроустановок [7] и для некоторых присоединений приведен в таблице 1.

При разработке алгоритма применен метод декомпозиции общей задачи: алгоритмы расстановки контрольно-измерительных приборов на распределительных устройствах высокого и низкого напряжения разделены с целью ускорения процесса проектирования.

Обобщенный алгоритм расстановки контрольно-измерительных приборов приведен на рисунке 1.

**Таблица 1.** Необходимые контрольно-измерительные приборы

Цепь	РУ	Перечень приборов	Примечания
Линии 35 кВ	ВН	амперметр, расчетные счетчики активной и реактивной энергии на тупиковых потребительских линиях	Если не ведется коммерческий учет по реактивной энергии, расчетные счетчики не устанавливаются.
Линии 110-220 кВ	ВН	амперметр, ваттметр, варметр, расчетные счетчики активной и реактивной энергии на тупиковых потребительских линиях	Для ВЛ с пофазным управлением ставят три амперметра. На ВЛ с двусторонним питанием — ваттметр и варметр с двусторонней шкалой, два счетчика активной энергии со стопорами.
Электродвигатели	НН	амперметр, счетчики активной и реактивной энергии	–



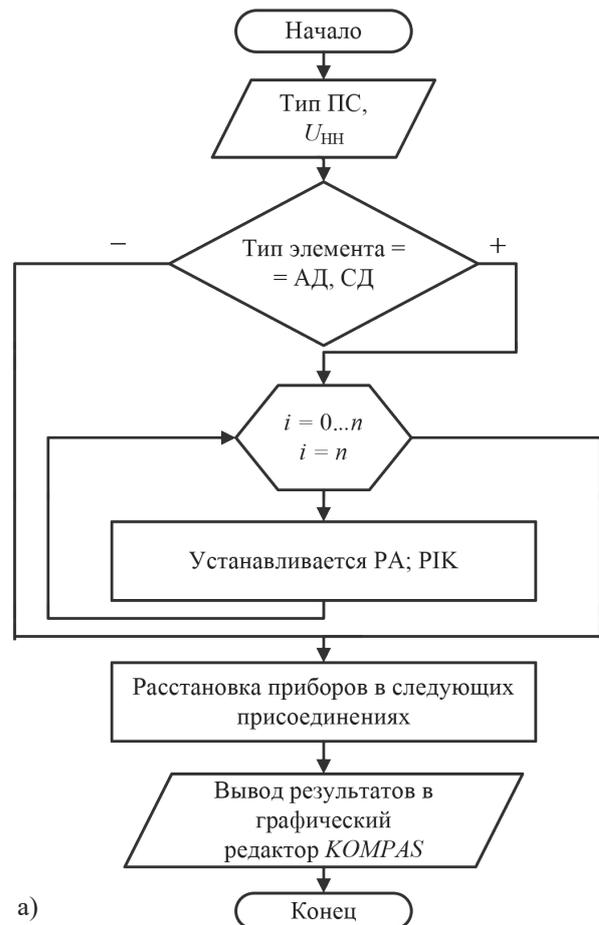
**Рисунок 1.** Блок-схема алгоритма расстановки контрольно-измерительных приборов на присоединения распределительных устройств низкого и высокого напряжения

На рисунке 2 в качестве примера приведен алгоритм расстановки приборов в цепи электродвигателей 6–10 кВ, на рисунке 3 — для линий электропередачи 35 кВ и выше.

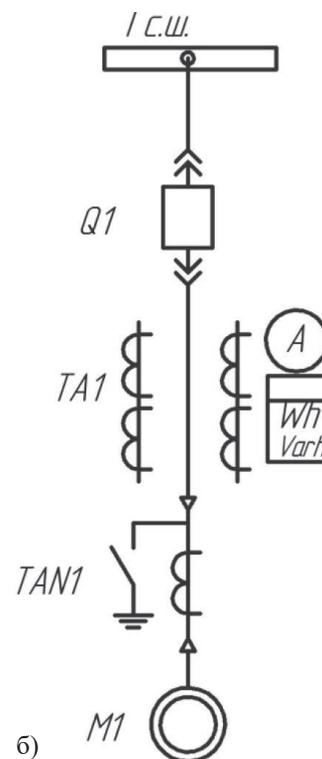
Для создания алгоритма была разработана библиотека приборов в КОМПАС в соответствии со следующими нормативными документами:

— ГОСТ Р 56303-2014 «Оперативно-диспетчерское управление. Нормальные схемы электрических соединений объектов электроэнергетики. Общие требования к графическому исполнению»;

— ГОСТ 2.721-74 «ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Обозначения общего применения»;



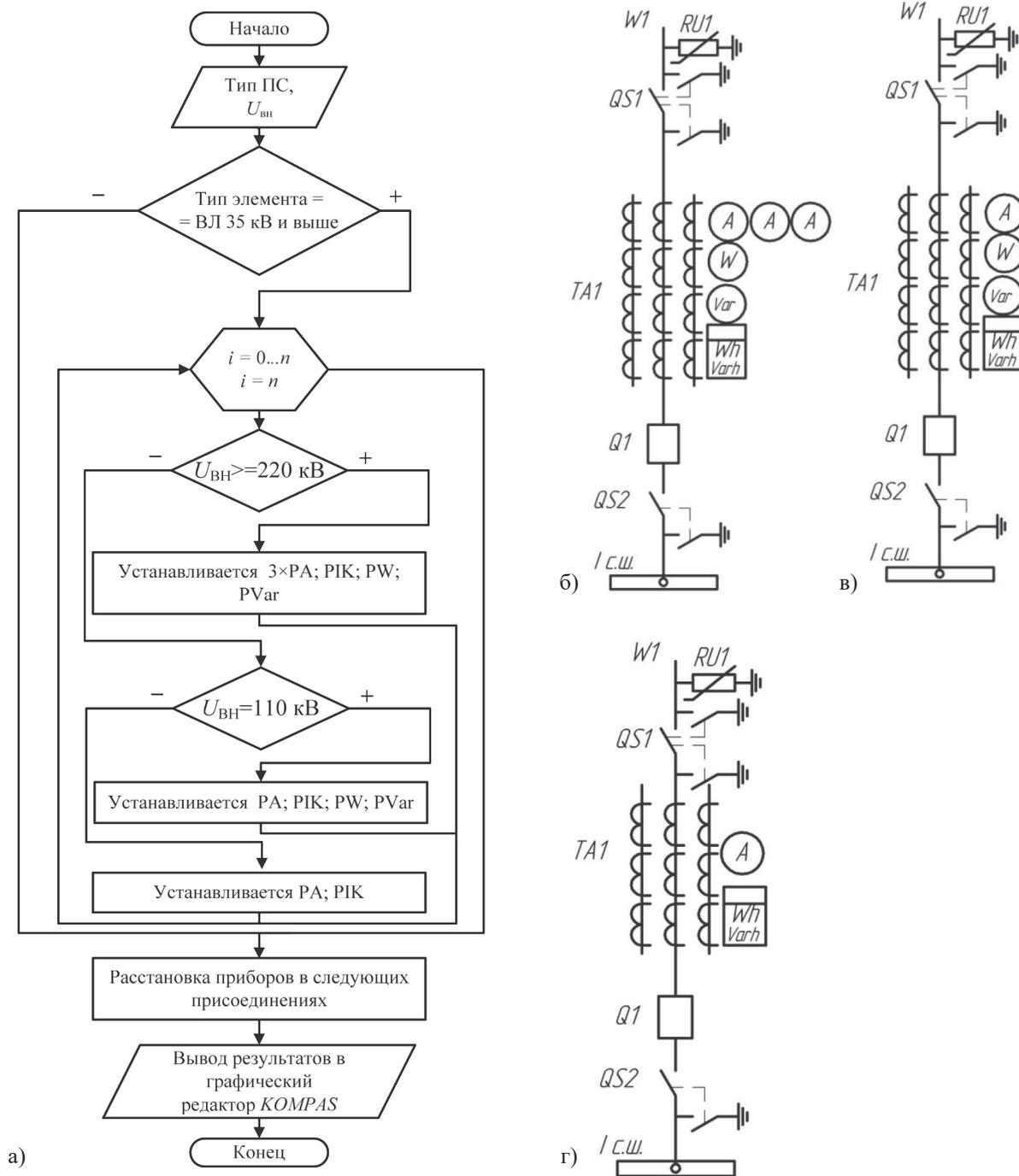
а)



б)

а) блок-схема алгоритма формирования контрольно-измерительной приборной базы в цепях электродвигателей; б) фрагменты однолинейных схем электродвигателей

**Рисунок 2.** Расстановка приборов в цепи электродвигателей



а) блок-схема алгоритма формирования контрольно-измерительной приборной базы в цепях линии 35-220 кВ; б) фрагменты однолинейных схем для присоединения линии 220 кВ; в) фрагменты однолинейных схем для присоединения линии 110 кВ; г) фрагменты однолинейных схем для присоединения линии 35 кВ

**Рисунок 3.** Расстановка приборов в цепи линии электропередачи 35–220 кВ

— ГОСТ 2.722-68 «ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Машины электрические»;

— ГОСТ 2.723-68 «ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители».

Разработанная библиотека присоединена к базе данных электрооборудования [8, 9], содержащей технико-экономические показатели, графическое отображение, вспомогательные библиотеки для проектирования распределительных устройств подстанций.

## Выводы

Разработанный подход адаптирован к условиям САПР «ОРУ САД» и позволяет на основании данных о присоединении (номинальное напряжение и тип присоединения) осуществить расстановку контрольно-измерительных приборов в соответствии с действующими нормативными документами, исключая ошибки в результате действий проектировщика. Разработанный программный продукт предназначен для электротехнических отделов проектных институтов.

## Список литературы

1. Ковалев А.А., Головин А.А. Применение САПР для расчета освещенности // Электронный научно-практический журнал «Современные научные исследования и инновации». 2014. № 6-1 (38). URL: <http://web.snauka.ru/issues/2014/06/36002> (дата обращения: 23.08.2019).
2. Бершадский И.А., Ковалев А.П., Згарбул А.В. Разработка САПР для проектирования электроснабжения цеха на напряжении 0,4 кВ // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2015. № 4. С. 47–52
3. Елисеев Д.С. Алгоритмы САПР для выбора проводов и кабелей. Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2012. 184 с.
4. Шоглев Д.Г. Оценка эффективности и сокращения временных затрат при использовании САПР Eplan на всех этапах создания шкафов РЗА // Диагностика энергооборудования: матер. XXXVIII сессии Всеросс. науч. семинара. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2016. С. 210–213.
5. А.с. 2018660517 Российская Федерация. ОРУ САД / Варганова А.В., Панова Е.А., Хатюшина Т.В., Кононенко В.С., Багаева Х.М.; заявитель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2018618175; заявл. 30.07.2018; опубл. 23.08.2018.
6. Панова Е.А., Варганова А.В. Алгоритм автоматизированного выбора схем электрических соединений открытых распределительных устройств напряжением 35-750 кВ в САПР «ОРУ САД» // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18. № 3. С. 52-60. DOI: 10.14529/power180307.
7. Правила устройства электроустановок: Все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. 9-й выпуск. Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2010. 464 с.

рительных приборов в соответствии с действующими нормативными документами, исключая ошибки в результате действий проектировщика. Разработанный программный продукт предназначен для электротехнических отделов проектных институтов.

8. А.с. 2018621358 РФ. Электрооборудование распределительных устройств 35-220 кВ к САПР «ОРУ САД» / Варганова А.В., Панова Е.А., Хатюшина Т.В., Кононенко В.С., Багаева Х.М., Ирихов А.С. № 2018621358; заявл. 30.07.2018; опубл. 23.08.2018.
9. Варганова А.В., Панова Е.А., Хатюшина Т.В., Кононенко В.С., Багаева Х.М. Разработка базы данных электрооборудования 35-220 кВ для САПР «ОРУ САД» // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 2 (39). С. 28-33. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-2(39)-28-33.

## References

1. Kovalev A.A., Golovin A.A. Primenenie SAPR dlya rascheta osveshchennosti [Application for CAD Lighting Calculations]. *Elektronnyi nauchno-prakticheskii zhurnal «Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii» — Electronic Scientific & Practical Journal «Modern Scientific Researches and Innovations»*, 2014, No. 6-1 (38). Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2014/06/36002> (accessed 23.08.2019). [in Russian].
2. Bershadskii I.A., Kovalev A.P., Zgarbul A.V. Razrabotka SAPR dlya proektirovaniya elektrosnabzheniya tsekha na napryazhenii 0,4 kV [Development of CAD for Design of Power Supply of Shop on Voltage of 0,4 kV]. *Elektro. Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost' — Electro. Electrical Engineering, Electric Power Industry, Electrical Industry*, 2015, No. 4, pp. 47–52 [in Russian].
3. Eliseev D.S. *Algoritmy SAPR dlya vybora provodov i kabelei* [CAD Algorithms for Wire and Cable Selection]. Volgograd, Volgogradskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet Publ., 2012. 184 p. [in Russian].
4. Shoglev D.G. Otsenka effektivnosti i sokrashcheniya vremennykh zatrat pri ispol'zovanii SAPR Eplan na vseh etapakh

sozdaniya shkafov RZA [Evaluation of Efficiency and Reduction of Time Costs when Using EPLAN CAD at all Stages of RZA Cabinets Creation]. *Materialy XXXVIII sessii Vserossiiskogo nauchnogo seminara «Diagnostics of Power Equipment»* [Materials of XXXVIII Session of all-Russian Scientific Seminar «Diagnostics of Power Equipment»]. Novocherkassk, YuRGPU (NPI) Publ., 2016, pp. 210–213. [in Russian].

5. Varganova A.V., Panova E.A., Khatyushina T.V., Kononenko V.S., Bagaeva Kh.M. ORU CAD. A.s. No. 2018660517 Russian Federation, 2018.

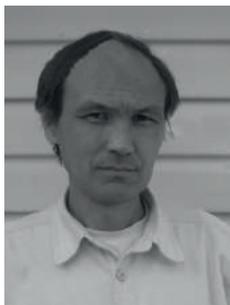
6. Panova E.A., Varganova A.V. Algoritm avtomatizirovannogo vybora skhem elektricheskikh soedinenii otkrytykh raspredelitel'nykh ustroystv napryazheniem 35-750 kV v SAPR «ORU CAD» [Oru-Cad Algorithm for Computer-Aided SLD Selection For 35-To 220-Kv Outdoor Switchgears]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika — Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering,*

2018, Vol. 18, No. 3, pp. 52-60. DOI: 10.14529/power180307. [in Russian].

7. Pravila ustroystva elektroustanovok: Vse deistvuyushchie razdely PUE-6 i PUE-7. 9-i vypusk [Regulations for Electrical Installation: All Applicable Sections of EIC-6 and EIC-7. 9th Edition]. Novosibirsk, Sibirskoe universitetskoe izdatel'stvo Publ., 2010. 464 p. [in Russian].

8. Varganova A.V., Panova Ye.A., Khatyushina T.V., Kononenko V.S., Bagayeva KH.M., Irikhov A.S. Elektrooborudovaniye raspredelitel'nykh ustroystv 35-220 kV k SAPR «ORU CAD» [Electrical Equipment of Switchgears 35-220 kV to CAD «ORU CAD»]. A.s. No. 2018621358, 2018.

9. Varganova A.V., Panova E.A., Khatyushina T.V., Kononenko V.S., Bagaeva Kh.M. Razrabotka bazy dannykh elektrooborudovaniya 35-220 kV dlya SAPR «ORU CAD» [Development of Electrical Equipment Database of 35-220 kV for «ORU CAD»]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electro-technical Systems and Complexes*, 2018, No. 2 (39), pp. 28-33. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-2(39)-28-33 [in Russian].



**Абдрахманов В. Х.**  
**Abdrakhmanov V. Kh.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Инфокоммуникационные  
технологии и  
наноэлектроника»  
ФГБОУ ВО «Башкирский  
государственный  
университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Важдаев К. В.**  
**Vazhdaev K. V.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Инфокоммуникационные  
технологии и  
наноэлектроника»,  
ФГБОУ ВО «Башкирский  
государственный  
университет»,  
доцент кафедры  
«Водоснабжение и  
водоотведение»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Салихов Р. Б.**  
**Salikhov R. B.**

доктор физико-  
математических наук,  
профессор кафедры  
«Инфокоммуникационные  
технологии и  
наноэлектроника»,  
ФГБОУ ВО «Башкирский  
государственный  
университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация

УДК 681.518.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-118-128

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

В статье рассматриваются применяемые системы точного земледелия, предназначенные для увеличения точности вождения сельхозтехники вне зависимости от внешних условий; уменьшения затрат на топливо, удобрения, посевной материал; улучшения качества обработки полей и увеличения урожайности — системы параллельного вождения, автопилоты и агронавигаторы. Рассмотрены имеющиеся на рынке готовые решения для точного земледелия, подходящие для целей точного позиционирования навигационные приемники и антенны. Рассмотрено использование имеющего в свободном доступе программного обеспечения — библиотеки RTKLib — для точного позиционирования по технологии RTK (Real Time Kinematic). Также рассмотрены имеющиеся решения для точного позиционирования беспилотных летательных аппаратов, использующих для этой цели навигационные приемники. По всем имеющимся готовым решениям и комплектующим приведены цены на май 2019 г. В статье предлагается создать бюджетную систему позиционирования, которая будет измерять местоположение сельскохозяйственной техники с точностью до сантиметра, используя библиотеку RTKLib, а также создать точный курсоуказатель или агронавигатор. Рассмотрена возможность создания высокоточного GPS/ГЛОНАСС навигационного приемника, где обработка данных по технологии RTK происходит на самой плате приемника с использованием микроконтроллера, в результате сделан вывод о целесообразности использования 32-разрядных микроконтроллеров STM32 с ядром ARM Cortex-M4, а для разработки прототипа устройства — отладочной платы STM32F4DISCOVERY. Рассмотрены особенности разработки проектов на STM32, выбор программного обеспечения для разработки.

**Ключевые слова:** системы точного земледелия, системы параллельного вождения, автопилоты, курсоуказатели, агронавигаторы, системы спутниковой навигации, GPS (Global

Positioning System), ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou, RTK (Real Time Kinematic), GNSS-антенны, GPS-модуль U-blox NEO-M8T, ARM Cortex-M4, STM32F4DISCOVERY, STM32Cube.

## RESEARCH OF POSSIBILITY OF PRECISION POSITIONING TECHNOLOGY IMPLEMENTATION

The article discusses the applied systems of precision farming intended to increase the accuracy of driving agricultural machinery regardless of external conditions, reduce the cost of fuel, fertilizer, seed, improve the quality of field processing and increase crop yields — parallel driving systems, autopilot and agronavigators. Ready-made solutions for precision farming that are suitable for accurate positioning navigation receivers and antennas are considered. Considered freely available software use — library RTKLib — for accurate positioning technology RTK (Real Time Kinematic). Also reviewed are available solutions for accurate positioning of unmanned aerial vehicles, navigation receivers used for this purpose. For all existing ready-made solutions and components, prices are given at May 2019. The article proposes to create a budget positioning system that will measure the location of agricultural equipment with an accuracy of a centimeter, using the RTKLib library to create an accurate heading or agronavigator. The possibility of creating a high-precision GPS/GLONASS navigation receiver, where data processing using RTK technology takes place on the receiver board itself using a microcontroller, is also considered, it was concluded that the use of 32-bit STM32 microcontrollers with ARM Cortex-M4 core was developed, and — debug board STM32F4DISCOVERY. Considered are the features of project development on STM32, the choice of software for development.

**Key words:** precision farming systems, parallel driving systems, autopilots, course indicators, agronavigators, satellite navigation systems, GPS (Global Positioning System), GLONASS, Galileo, BeiDou, RTK (Real Time Kinematic), GNSS antennas, U-blox NEO-M8T GPS-module, ARM Cortex-M4, STM32F4DISCOVERY, STM32Cube.

### 1. Актуальность научной проблемы исследования

#### 1.1 Использование GPS/GLONASS для трекеров

GPS (Global Positioning System) — спутниковая система навигации, обеспечивающая измерения расстояния, времени и определяющая местоположение во всемирной системе координат WGS 84 [1]. Есть аналогичные российская, европейская и китайская системы GLONASS, Galileo, BeiDou. GPS-модули широко используются для всевозможных трекеров, умных ошейников и рюкзаков. Специфика производственных процессов в сельском хозяйстве [2–4] порождает множество лазеек, ведущих к значительным издержкам, непроизводительным затратам, а удалённость от «хозяина» повышает вероятность злоупотреблений [5]. Внедряя системы GPS-мониторинга транспорта в сельском хозяйстве (рисунок 1) можно решить множество задач: учет задействованных единиц техники в любое время; четкое определение месторасположения участков, на которых проводятся работы; мониторинг

скорости и направления движения задействованных единиц техники; учет эффективности выполнения работ; возможность слежения за отклонениями в рабочем маршруте; нецелевое использование транспорта и махинации с топливом [6].



Рисунок 1. GPS-мониторинг в сельском хозяйстве

#### 1.2 Системы параллельного вождения и полевые компьютеры

В простейшем случае системы параллельного вождения — это курсоуказатели (рисунок 2) [7]. В курсоуказатель перед началом работы вносятся основные параметры: площадь и форма поля, ширина при-

цепного устройства. Курсоуказатель автоматически расчертит поле на полосы в точном соответствии с его границами и шириной агрегата. Пользуясь подсказками курсоуказателя, можно вести трактор по полю любой, сколь угодно сложной формы, без пропусков и нахлестов, с точностью до 20–40 см днем и ночью, в любую погоду. Также существуют подключаемые к курсоуказателю автопилоты и подруливающие устройства (рисунок 2).



**Рисунок 2.** Курсоуказатель Raven и подруливающее устройство

Точность системы параллельного вождения зависит от многих параметров, в том числе от времени суток (меняется положение спутников навигационных систем). В целом, можно сказать, что с недорогой антенной точность будет до  $\pm 50$  см, с хорошей внешней антенной до  $\pm 20$  см.

Точность GPS можно увеличить с помощью дифференциальной поправки (дифпоправки). Это довольно сложный и не часто используемый метод, однако он позволяет довести точность движения трактора до  $\pm 2,5$  см. Для этого есть несколько спосо-

бов, и один из них — использование специальных базовых станций дифпоправки по технологии RTK (Real Time Kinematic) [8]. У этого метода есть два ограничения: дифпоправка действует в радиусе не более 15 км, и принимать сигнал дифпоправки могут лишь самые дорогие системы параллельного вождения. Как правило, фирмы, производящие станции дифпоправки, производят лучшие и дорогие системы параллельного вождения.

### *2 Существующие системы параллельного вождения (агронавигаторы)*

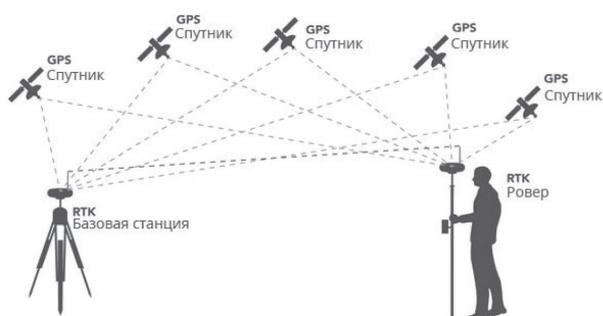
В качестве примера рассмотрим один из представленных на рынке фирмой РусАгро-Л агронавигатор Кампус [9]. Система параллельного вождения «Кампус» оснащена современным процессором и высокоточным модулем навигации. Точность — 2 см с RTK и до 30 см с усиленной антенной. Цветной сенсорный дисплей диагональю 20 см (18×10 см) делает работу приятной и удобной.



**Рисунок 3.** Агронавигатор Кампус

Система состоит из базовой станции (рисунок 4), которая является стационарной (в некоторых случаях она может быть мобильной) и передает сигнал коррекции на приемник (ровер). Исправления от базовой станции «Кампус» могут передаваться на ровер по радиоканалу, и в ближайшем будущем появится возможность передавать данные через Интернет. Тестовая дальность передачи по радиоканалу при высоте ровера и базовой станции 1,92 м составила более 15 км. Базовая станция имеет влагонепроницаемый корпус и может располагаться на открытой площадке. В каталоге фирмы РусАгро-Л цена агронавигатора Кампус —

59000 руб., ровера для подключения навигатора к базовой станции — 55000 руб., базовой станции RTK — 135000 руб. (май 2019 г.).



**Рисунок 4.** Система параллельного вождения, реализующая метод RTK

### 3 Технология RTK

Точность определения координат GPS/GLONASS составляет примерно 3–5 м и зависит от качества работы GPS-приемника, погодных условий, окружающего ландшафта и многих других факторов. Одним из способов повышения точности позиционирования является технология RTK (Real Time Kinematic) [10], которая широко применяется в геодезии и точном земледелии. Она основана на использовании измерений фазы несущего сигнала GPS/GLONASS, где базовая станция обеспечивает поправки в реальном времени для точности сантиметрового уровня точности.

Базовая станция RTK — это специальный спутниковый приемник, обеспечивающий передачу корректирующих поправок для абонентских приемников GPS/GLONASS-приемников (роверов). Навигационные приемники по технологии RTK должны быть способны выдавать «сырые» данные (псевдодальности, фазовые измерения), т.е. сам приемник не решает навигационную задачу полностью. Программный комплекс RTKLIB с открытым исходным кодом [10], разработанный Такасу Томоджи [11] из Токийского океанографического университета, может быть использован для получения координат сантиметровой точности из «сырых» данных приемника. Пакет RTKLIB широко используется в геодезии и картографии и зарекомендовал себя в профессиональной среде. RTKLIB версии 2.4.2 в настоящее время под-

держивает работу с ограниченным количеством навигационных приемников. Наиболее популярными моделями одночастотных (L1) приемников являются UBLOX NEO6T (GPS) и NV08C-CSM (GPS/GLONASS). Последний из приемников фирмы U-blox NEO-M8T анонсирован в январе 2016 г. — приемник GPS/GLONASS. При заказе из Китая NEO-M8T-0-10-U-BLOX-модуль-GPS-ГЛОНАСС (цена US \$ 78,99) [12] (май 2019 г.). Двухчастотные навигационные приемники (L1/L2) получают одни и те же данные со спутников, но на разных частотах. Основной задачей двухчастотных приемников является устранение ионосферной задержки. Однако двухчастотные приемники стоят гораздо дороже, чем одночастотные и встречаются реже. Они в основном используются в устройствах для геодезических кадастровых работ.

Основные возможности RTKLIB следующие: работа в системах спутниковой навигации: GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou; поддержка алгоритмов высокоточного позиционирования в реальном времени (RTK — Real Time Kinematic) и при пост-обработке (PPP — Precise Point Positioning); передача и прием навигационных данных по последовательному интерфейсу (UART) и по TCP/IP; поддержка большинства GNSS-стандартов и протоколов, среди которых: RINEX, RTCM, NTRIP, NMEA; поддержка проприетарных бинарных протоколов навигационных приемников (L1 и L1/L2): NovAtel, u-blox, JAVAD, NVS BINR и ряда других; Windows-версия RTKLIB имеет графический интерфейс (GUI), распространяется в виде ZIP-архива и не требует установки (рисунок 5).

### 4 Навигационные модули

#### для высокоточного позиционирования

В сети есть описание готовых решений для работы с технологией RTK, например, компания «Навтелеком» [13] предлагает два навигационных модуля в OEM-исполнении: UBX-1V0 и NAV-1V0. Навигационные модули подключаются к USB-разъему персонального компьютера (ноутбука) и не требуют дополнительного питания. Судя по описанию, технология RTK в них

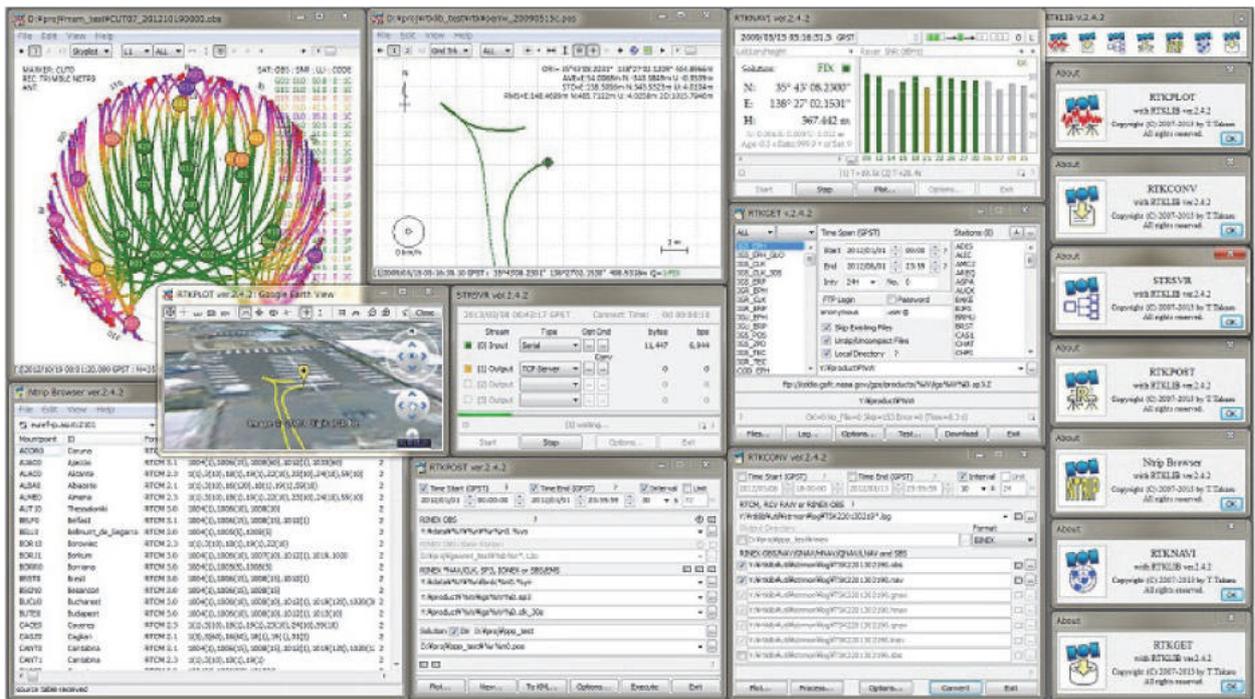


Рисунок 5. Графический интерфейс Windows-версии RTKLIB

не реализуется на самой плате, т.к. в этом случае там должен стоять микроконтроллер, который выводит уже готовый результат через USB-разъем, например, навигационный

модуль UBX-1V0 (рисунок 6) создан на базе одностороннего навигационного приемника GPS-NEO-6T известной швейцарской фирмы производителя GPS-приемников U-BLOX.

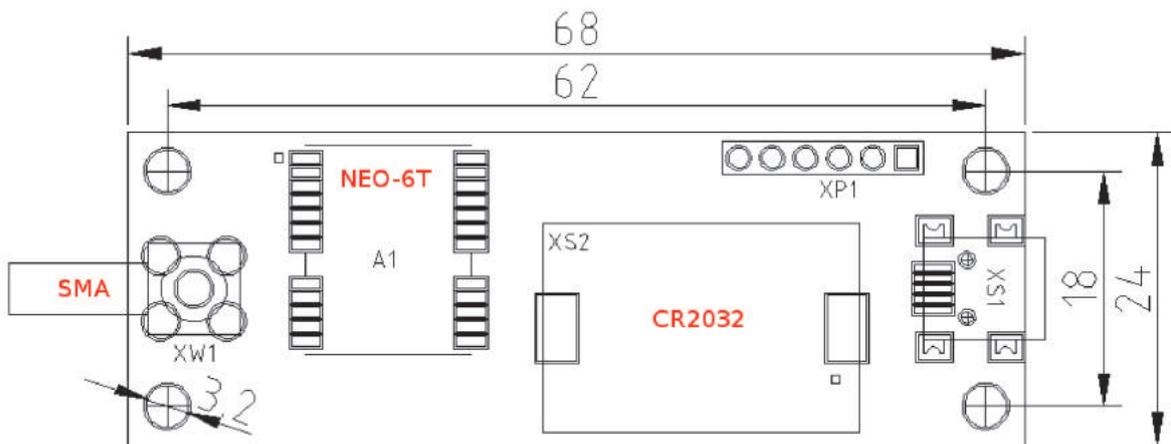


Рисунок 6. Навигационный модуль UBX-1V0

Судя по описанию, на плате кроме NEO-6T есть батарея резервного питания CR2032, EEPROM для сохранения текущих настроек, разъем для подключения антенны — SMA. Модуль обеспечивает питанием 3,3 В подключаемую внешнюю антенну. «Сырые» данные в бинарном протоколе RTKLIB — u-blox выводятся для дальнейшей обработки в компьютер через разъем — miniUSB. Частота выдачи данных — 1 Гц.

NV08C-CSM (рисунок 7) отечественной фирмы НАВИС. На момент создания он выгодно отличался тем, что поддерживает ГЛОНАСС, но после появления GPS/ГЛОНАСС приемников U-BLOX это не так актуально. При заказе из Китая модуль NV08C-CSM GPS/ГЛОНАСС V5.1 стоит US \$ 90 [14]. Судя по описанию, состав и возможности платы (рисунок 8) аналогичны UBX-1V0 — на плате кроме NV08C-CSM есть батарея резервного питания CR2032, EEPROM для сохранения текущих настроек,

разъем для подключения антенны — SMA. Модуль обеспечивает питанием 3.3–5.5 В подключаемую внешнюю антенну. Через 2 разъема miniUSB «сырые» данные в бинар-

ном протоколе (BINR, NMEA) выводятся для дальнейшей обработки в компьютер. Частота выдачи данных — 1 и 10 Гц.

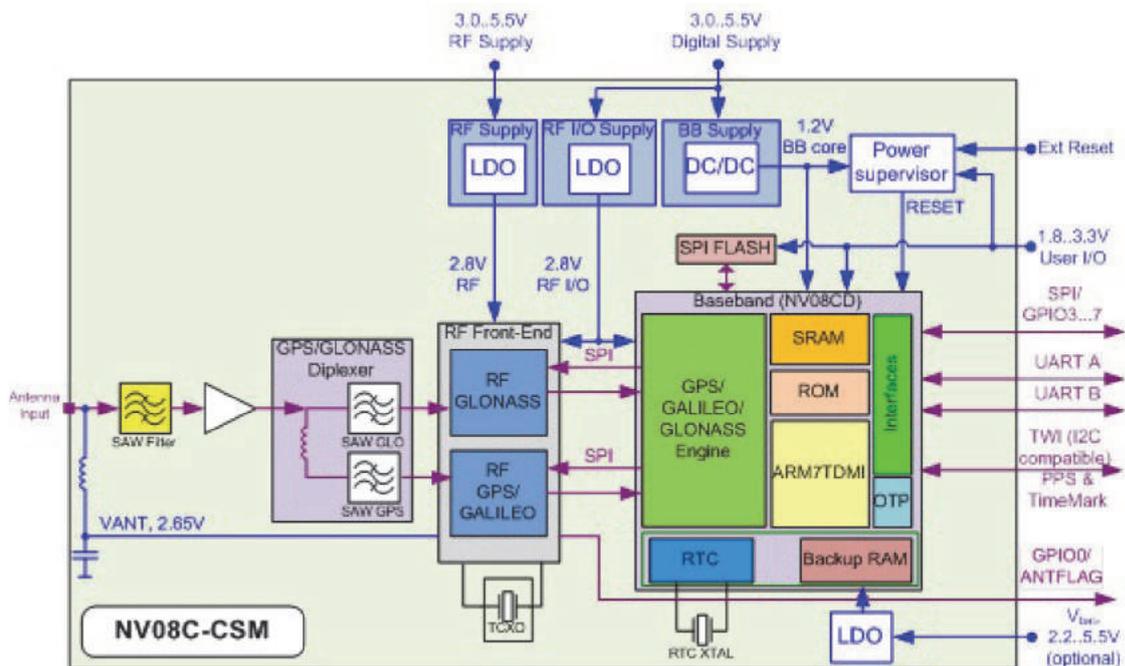


Рисунок 7. Внутренняя структура навигационного приемника GPS/GLONASS-NV08C-CSM

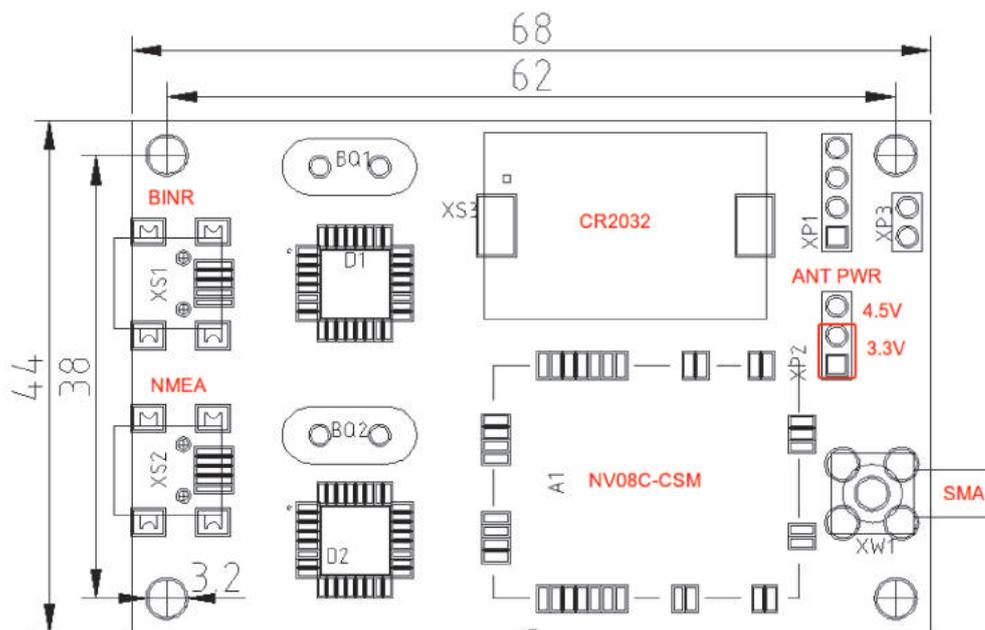


Рисунок 8. Навигационный модуль NAV-1V0

Кроме того, есть полностью законченный мультисистемный высокоточный навигационный приемник NV08C-RTK [15]. Как видно из блок-схемы (рисунок 9), он реализован на базе 32-разрядного ARM-микроконтроллера LPC3240 с сопроцессором FPU. Наличие мощного контроллера позволяет технологию RTK реализовать на

самой плате. Цена за такое готовое решение достаточно высока: при заказе из Китая US \$ 1300 [13].

При использовании технологии RTK предъявляются повышенные требования к качеству GNSS-антенн (хорошее подавление многолучевости и высокая стабильность фазового центра). Следует учесть, что

RTK-решения возможны только, если не менее 6–8 спутников в зоне прямой видимости. Установку антенн необходимо производить на открытом месте (крыша здания, открытая площадка). Рекомендуется использовать GPS/GLONASS-антенны канадской фирмы Tallysman) [16] (напряжение питания

от 2,5 В): TW3440/TW3442 (антенна для монтажа в отверстие), TW2410 (магнитная антенна).

Навигационные антенны данного типа рекомендуют размещать на плоском рефлекторе (ground plane) диаметром около 20 см.

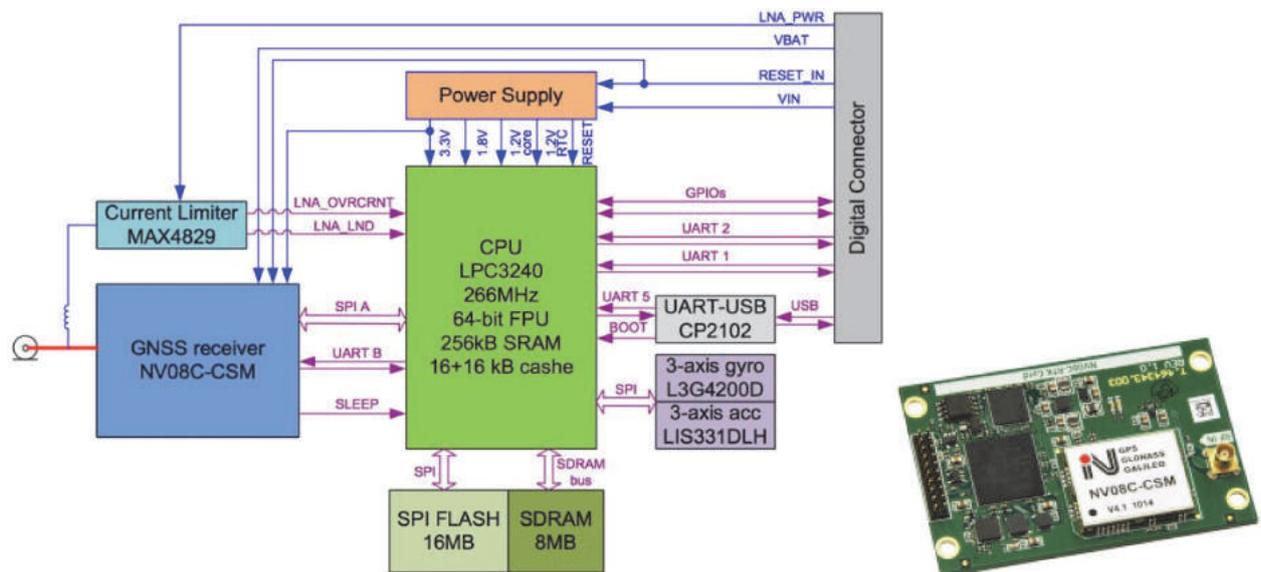


Рисунок 9. Высокоточный навигационный приемник NV08C-RTK

5 RTK для беспилотных летательных аппаратов

Система RTK также используется для точного позиционирования беспилотных летательных аппаратов (рисунок 10). Известны готовые решения, в которых реализована технология RTK, например, RTK GPS-приёмник Piksi [17] — проект был выложен на сайте kickstarter.com для сбора средств на

разработку. Устройство имеет открытый исходный код программного обеспечения, быстрое (50 Гц) обновление положения/ скорости/времени, низкое энергопотребление — 500 мВт, малый форм-фактор — 53×53 (мм), собственный дизайн платы. Заявляемая цена на сам приемник US \$ 166 (рисунок 11), полный комплект Piksi RTK (рисунки 12, 13) — US \$ 900 [18].

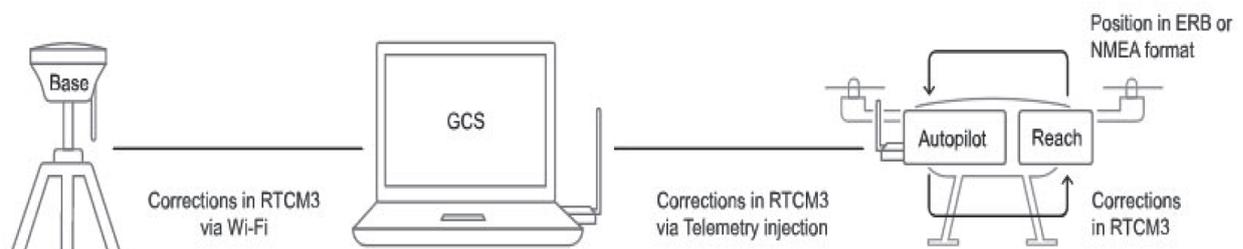


Рисунок 10. Система RTK для беспилотных летательных аппаратов



Рисунок 11. RTK GPS-приёмник Piksi

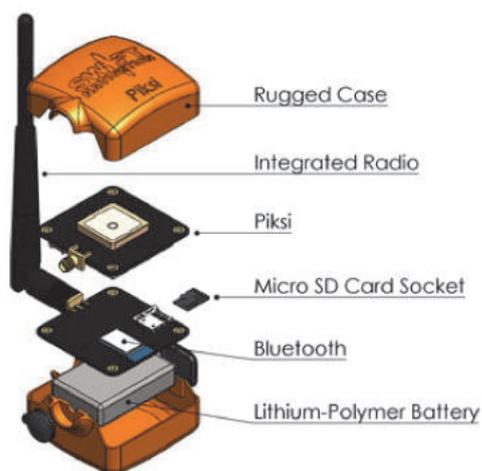


Рисунок 12. RTK GPS-приёмник PiKsi



Рисунок 13. RTK GPS-приёмник PiKsi

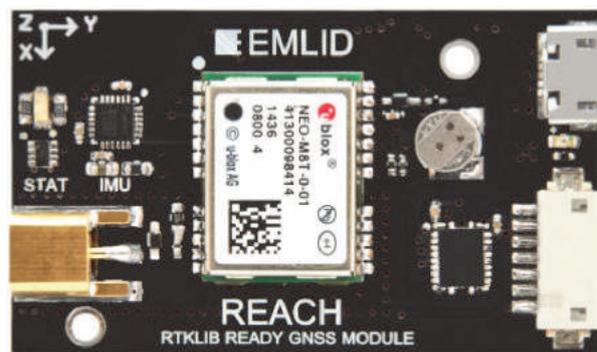


Рисунок 14. Плата Reach RTK



Рисунок 15. Полный комплект Reach RTK

Также известное решение — Reach RTK [19]. На разработанной, очень компактной 26 x 36 (мм) плате (рисунок 14) используется самый последний из приемников фирмы U-blox NEO-M8T[9]-GPS/ГЛОНАСС приемник: 72 канала, частота до 18Hz, поддержка GPS/QZSS L1 C/A, GLONASS L10F, BeiDou B1, SBAS L1 C/A: WAAS, EGNOS, MSAS, Galileo-ready E1B/C. Для реализации технологии RTK используется процессор Intel Edison-dual-core 500MHz. Вывод информации возможен через I2C, UART, GPIO, TimeStamp, OTG USB, Bluetooth, Wi-Fi. Полный комплект Reach UAV RTK kit (цена US \$ 1242.00) содержит следующие основные блоки: базовую станцию Reach RS+, приемник для ровера Reach M+, антенну Tallysman multi-GNSS antenna TW4721, радиомодуль для передачи поправок между приемниками Reach M+LoRa radio (рисунок 15).

*6 Предлагаемые методы и подходы к решению задач исследований*

После рассмотрения наиболее актуальных, существующих на сегодняшний день решений можно сделать вывод, что готовые

решения есть, но их стоимость велика — не менее US \$ 1200 за полную систему RTK, и это препятствует широкому внедрению этой технологии в сельском хозяйстве. Причем для разработок может использоваться библиотека с открытым исходным кодом RTKLIB [10], сами приемники, на которых можно реализовать RTK, не сильно дороги, например, последний из приемников фирмы U-blox NEO-M8T — анонсированный в январе 2016 г. GPS/ГЛОНАСС-приемник при заказе из Китая US \$ 78,99 [12], подходящая, рекомендуемая для RTK антенна US \$ 75,00 [20].

Предлагаем создать бюджетную систему позиционирования, которая будет измерять местоположение сельскохозяйственной

техники с точностью до сантиметра, используя библиотеку RTKLib. Для реализации этой технологии необходимы два приемника GPS. Один приемник ставится на передвигающийся объект — ровер, другой — на неподвижной опоре (например, в поле или на здании). Каждый из них должен включать в себя:

— U-blox NEO-M8T — GPS/ГЛОНАСС-приемник — 72 канала, частота до 18 Hz, поддержка GPS/QZSS L1 C/ A, GLONASS L10F, BeiDou B1, SBAS L1 C/ A: WAAS,

EGNOS, MSAS, Galileo-ready E1B / C (рисунок 16). Эта наиболее подходящая для RTK-технологии последняя разработка фирмы U-Blox;

— радиомодем (для передачи дифференциальных поправок между базовой станцией и ровером);

— антенна для более качественного приёма сигнала, например рекомендуемая для RTK-технологии TW3440 фирмы Tallysman [13].

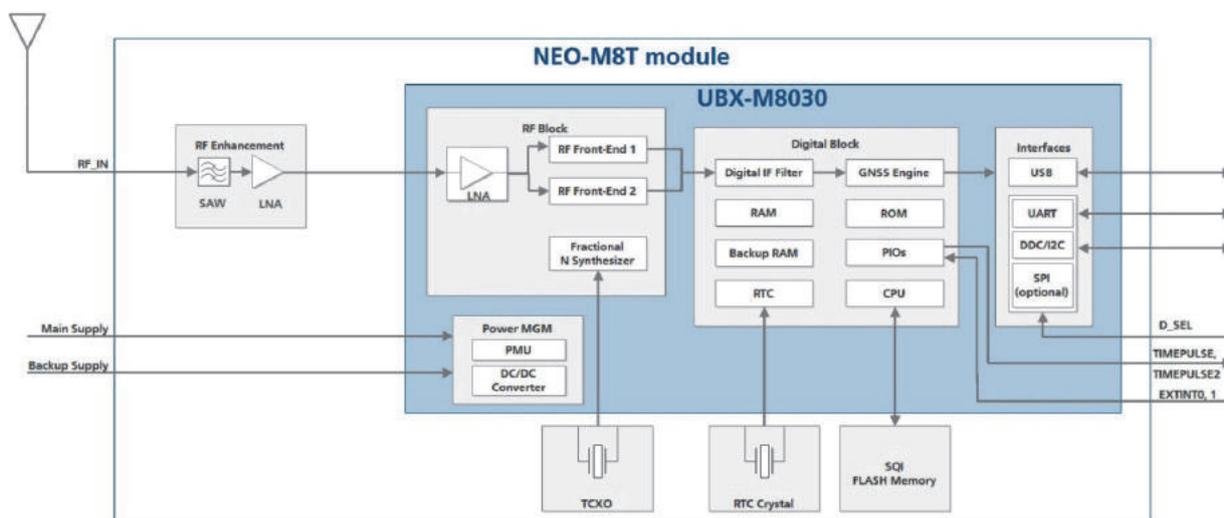


Рисунок 16. Внутренняя структура навигационного приемника NEO-M8T

Необходимо разработать плату на базе NEO-M8T, где кроме него должна быть батарея резервного питания CR2032, EEPROM для сохранения текущих настроек, разъем для подключения антенны SMA. Модуль должен обеспечивать питание подключаемую внешнюю антенну. «Сырые» данные в бинарном протоколе RTKLIB-u-blox будут выводиться для дальнейшей обработки в компьютер, планшет, смартфон через разъем, например miniUSB. Используя свободную Windows-версию RTKLIB, которая имеет графический интерфейс (GUI), можно получить точные данные, которые отображаются на экране. Если использовать планшет на Windows, то получим таким образом бюджетный курсоуказатель или навигатор для установки на сельхозтехнику. Также есть возможность создания бюджетного высокоточного GPS/ГЛОНАСС навигационного приемника, где обработка данных по технологии RTK происходит на самой плате с

использованием микроконтроллера. Такой приемник уже можно было бы использовать для реализации системы точного позиционирования беспилотных летательных аппаратов, колесных роботов, автономно движущихся по точной траектории без участия оператора. Предлагаем добавить в исходную схему 32-разрядный ARM серии STM32F4 с FPU, написать для него программное обеспечение, используя RTKLIB. Появление и широкое распространение достаточно бюджетных 32-разрядных микроконтроллеров STM32 с ядром ARM Cortex-M4, которое отличается встроенными инструкциями для цифровой обработки сигналов Digital Signal Processing (DSP) и блоком операций для чисел с плавающей точкой Floating Point Unit (FPU), позволяет их использовать для нашей разработки. Причем, несмотря на большую вычислительную мощность и скорость работы, благодаря особенностям системы тактирования в микроконтроллерах ARM

удается значительно снизить энергопотребление. Особенно удобной для разработки прототипа устройства является плата STM32F4DISCOVERY [21] на базе микроконтроллера STM32F407VGT6 [22] (Cortex M4, 168МГц, flash 1Мб, RAM 192Кб). При этом для разработки программного обеспечения начинающим знакомство с семейством STM32 удобно использовать программ-генератор кодов инициализации CubeMX [23] от фирмы-изготовителя STMicroelectronics для настройки (инициализации) ядра и периферии, подключения библиотек, генерации пустого проекта. После генерации проекта можно перенести его в популярную среду разработки Keil  $\mu$ Vision [24]. Также недавно появилась интегрированная среда STM32Cube-IDE на базе Eclipse. Таким образом, можно относительно легко ознакомиться и начать работать с STM32, причем, как видим, средства разработки для STM32 быстро развиваются.

#### Вывод

В результате анализа имеющихся на рынке готовых решений для целей точного позици-

онирования навигационных приемников и антенн, беспилотных летательных аппаратов, а также имеющего в свободном доступе программного обеспечения предлагается создать бюджетную систему позиционирования, которая будет измерять местоположение сельскохозяйственной техники с точностью до сантиметра, используя библиотеку RTKLib, а также создать точный курсоуказатель или агронавигатор.

Рассмотрена возможность создания высокоточного GPS/ГЛОНАСС навигационного приемника, где обработка данных по технологии RTK происходит на самой плате приемника с использованием микроконтроллера, сделан вывод о целесообразности использования 32-разрядных микроконтроллеров STM32 с ядром ARM Cortex-M4, а для разработки прототипа устройства — отладочной платы STM32F4DISCOVERY.

Рассмотрены особенности разработки проектов на STM32 и выбор программного обеспечения для разработки.

#### Список литературы

1. GPS // Википедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/GPS> (дата обращения: 25.07.2019).
2. Абдрахманов В.Х., Важдаев К.В., Салихов Р.Б. Разработка средств автоматизации с использованием WI-FI-модулей ESP8266 и LPWAN-технологий // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. Т. 13. № 4. С. 98–108.
3. Абдрахманов В.Х., Важдаев К.В., Салихов Р.Б. Исследование возможности применения информационно-измерительных технологий и интернета вещей в агропромышленном комплексе // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. Т. 13. № 2. С. 85-95.
4. Abdrakhmanov V.Kh., Salikhov R.B., Vazhdaev K.V. Development of a Sound Recognition System using STM32 Microcontrollers for Monitoring the State of Biological Objects // Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE) — 2018: XIV International Scientific-Technical Conference. Novosibirsk, Russia. 2018. Vol. 1. P. 170–173. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545278.
5. Использование GPS навигации в сельском хозяйстве // ГеоМетр Россия. URL: <https://geometer-russia.ru/a213902-ispolzovanie-gps-navigatsii.html> (дата обращения: 25.07.2019).
6. GPS мониторинг в сельском хозяйстве и агрофирме // VIDIS. URL: <http://www.gps-monitoring.com.ua/selskoe-xozaistvo.html> (дата обращения: 26.07.2019).
7. Точное земледелие. Часть 1. Системы параллельного вождения // VIDIS. URL: <http://www.gps-monitoring.com.ua/precision-farming-news-1.html> (дата обращения: 20.07.2019).
8. Real Time Kinematic // Википедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Real\\_Time\\_Kinematic](https://ru.wikipedia.org/wiki/Real_Time_Kinematic) (дата обращения: 25.07.2019).
9. РусАгро-Л. URL: <http://rusagro48.ru/catalog.html?yclid=1052934474269494468#1> (дата обращения: 19.07.2019).
10. RTKLib — Сантиметровая точность GPS/ГЛОНАСС в пост-обработке // Хабр.

URL: <https://sohabr.net/habr/post/244475/> (дата обращения: 25.07.2019).

11. Research and Development of Precise Positioning Technology by Global Navigation Satellite System. URL: <http://gpspp.sakura.ne.jp> (дата обращения: 25.07.2019).

12. U-Blox NEO-M8T // Ebay. URL: <https://www.ebay.com/itm/1pcs-NEO-M8T-0-10-U-BLOX-MODULE-GPS-GLONASS/323079085934?hash=item4b39039f6e:g:XBMAAOSwXMBahts7> (дата обращения: 24.07.2019).

13. Навигационные модули «Навтелеком» // Навтелеком. URL: <https://navtelecom.ru/28-testovaya/190-navigatsionnye-moduli> (дата обращения: 24.07.2019).

14. NV08C-CSM // NVS Навигационные технологии. URL: <http://nvs-gnss.ru/products/modules/item/2-nv08c-csm.html> (дата обращения: 25.07.2019).

15. NV08C-RTK // NVS Навигационные технологии. URL: <http://nvs-gnss.ru/products/modules/item/76-nv08c-rtk.html> (дата обращения: 22.07.2019).

16. NV08C-RTK // AliExpress. URL: <https://ru.aliexpress.com/item/Nv08c-rtk-a-GPS/32854202982.html> (дата обращения: 15.07.2019).

17. Tallysman. URL: <http://www.tallysman.com> (дата обращения: 16.07.2019).

18. Piksi: RTK GPS Receiver // Kickstarter. URL: <https://www.kickstarter.com/projects/swiftnav/piksi-the-rtk-gps-receiver?token=-398b4977> (дата обращения: 19.07.2019).

19. Reach: First Affordable RTK GPS Receiver // INDIEGOGO. URL: <https://www.indiegogo.com/projects/reach-first-affordable-rtk-gps-receiver#/> (дата обращения: 19.07.2019).

20. SANAV-TA-200-GPS-Antenna-Replacement-for-Tallysman-TW3030 // Ebay. URL: <https://www.ebay.com/itm/SANAV-TA-200-GPS-Antenna-replacement-for-Tallysman-TW3030/264230203450?hash=item3d8558f03a:g:mMAAOxy0NtTDiJh> (дата обращения: 27.07.2019).

21. STM32F407VG // STMicroelectronics. URL: <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f407vg.html> (дата обращения: 25.07.2019).

22. STM32F4DISCOVERY // STMicroelectronics. URL: <http://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html> (дата обращения: 25.07.2019).

23. STM32CubeMX // STMicroelectronics. URL: <http://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html> (дата обращения: 23.07.2019).

24.  $\mu$ Vision IDE // Arm Keil. URL: <http://www2.keil.com/mdk5/uvision> (дата обращения: 24.07.2019).

## References

1. GPS. Wikipediya. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/GPS> (accessed 25.07.2019). [in Russian].

2. Abdrakhmanov V.Kh., Vazhdaev K.V., Salikhov R.B. Razrabotka sredstv avtomatizatsii s ispol'zovaniem WI-FI-modulei ESP8266 i LPWAN-tekhnologii [Development of Automation Facilities using Wi-Fi Modules Esp8266 and LPWAN Technologies]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2017, Vol. 13, No. 4, pp. 98-108. [in Russian].

3. Abdrakhmanov V.Kh., Vazhdaev K.V., Salikhov R.B. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya informatsionno-izmeritel'nykh tekhnologii i interneta veshchei v agropromyshlennom komplekse [Study of the Possibility of Application of Information-Measuring Technologies and the Internet of Things in the Agro-Industrial Complex]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2017, Vol. 13, No. 2, pp. 85-95. [in Russian].

4. Abdrakhmanov V.Kh., Salikhov R.B., Vazhdaev K. V. Development of a Sound Recognition System Using STM32 Microcontrollers for Monitoring the State of Biological Objects. *XIV International Scientific-Technical Conference «Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE) — 2018»*. Novosibirsk, Russia, 2018, Vol. 1, pp. 170–173. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545278.

5. Ispol'zovanie GPS navigatsii v sel'skom khozyaistve [Use of GPS Navigation in Agriculture]. GeoMetr Rossiya. Available at: <https://geometer-russia.ru/a213902-ispol-zovanie-gps-navigatsii.html> (accessed 25.07.2019). [in Russian].

6. GPS monitoring v sel'skom khozyaistve i agrofirme [GPS Monitoring in Agriculture and Agrofirma]. VIDIS. Available at: <http://www.vidis.ru/>

gps-monitoring.com.ua/selskoe-xozaistvo.html (accessed 26.07.2019). [in Russian].

7. Tochnoe zemledelie. Chast' 1. Sistemy parallel'nogo vozhdeniya [Precision Farming. Part 1. Parallel Driving Systems]. VIDIS. Available at: <http://www.gps-monitoring.com.ua/precision-farming-news-1.html> (accessed 20.07.2019). [in Russian].

8. Real Time Kinematic. Vikipediya. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Real\\_Time\\_Kinematic](https://ru.wikipedia.org/wiki/Real_Time_Kinematic) (accessed 25.07.2019).

9. RusAgro-L. Available at: <http://rusagro48.ru/catalog.html?yclid=1052934474269494468#1> (accessed 19.07.2019). [in Russian].

10. RTKLib — Santimetrovaya tochnost' GPS/GLONASS v post-obrabotke [RTKLib-Centimeter Precision GPS / GLONASS in Post-Processing]. Habr. Available at: <https://sohabr.net/habr/post/244475> (accessed 25.07.2019). [in Russian].

11. Research and Development of Precise Positioning Technology by Global Navigation Satellite System. Available at: <http://gpspp.sakura.ne.jp> (accessed 25.07.2019).

12. U-Blox NEO-M8T. Ebay. Available at: <https://www.ebay.com/itm/1pcs-NEO-M8T-0-10-U-BLOX-MODULE-GPS-GLONASS/323079085934?hash=item4b39039f6e:g:XBMAAO SwXMBahts7> (accessed 24.07.2019). [in Russian].

13. Navigatsionnye moduli «Navtelekom». Navtelekom. URL: <https://navtelecom.ru/28-testovaya/190-navigatsionnye-moduli> (accessed 24.07.2019). [in Russian].

14. NV08C-CSM. NVS Navigatsionnye tekhnologii. Available at: <http://nvs-gnss.ru/products/modules/item/2-nv08c-csm.html> (accessed 25.07.2019). [in Russian].

15. NV08C-RTK. NVS Navigatsionnye tekhnologii. Available at: <http://nvs-gnss.ru/products/modules/item/76-nv08c-rtk.html> (accessed 22.07.2019). [in Russian].

products/modules/item/76-nv08c-rtk.html (accessed 22.07.2019). [in Russian].

16. NV08C-RTK. AliExpress. Available at: <https://ru.aliexpress.com/item/Nv08c-rtk-a-GPS/32854202982.html> (accessed 15.07.2019). [in Russian].

17. Tallysman. Available at: <http://www.tallysman.com/> (accessed 16.07.2019).

18. Piksi: RTK GPS Receiver. Kickstarter. Available at: <https://www.kickstarter.com/projects/swiftnav/piksi-the-rtk-gps-receiver?token=398b4977> (accessed 19.07.2019).

19. Reach: First Affordable RTK GPS Receiver. IDIEGOGO. Available at: <https://www.indiegogo.com/projects/reach-first-affordable-rtk-gps-receiver/#/> (accessed 19.07.2019).

20. SANAV-TA-200-GPS-Antenna-Replacement-for-Tallysman-TW3030 // Ebay. URL: <https://www.ebay.com/itm/SANAV-TA-200-GPS-Antenna-replacement-for-Tallysman-TW3030/264230203450?hash=item3d8558f03a:g:m nMAAOxy0NtTDiJh> (accessed 27.07.2019).

21. STM32F407VG. High-Performance Foundation Line, ARM Cortex-M4 Core with DSP and FPU, 1 Mbyte Flash, 168 MHz CPU, ART Accelerator, Ethernet, FSMC. STMicroelectronics. Available at: <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f407vg.html> (accessed 25.07.2019).

22. STM32F4DISCOVERY. STMicroelectronics. Available at: <http://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html> (accessed 25.07.2019).

23. STM32CubeMX. STMicroelectronics. Available at: <http://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html> (accessed 23.07.2019).

24.  $\mu$ Vision IDE. Arm Keil. Available at: <http://www2.keil.com/mdk5/uvision> (accessed 24.07.2019).

---

## ОБ АВТОРАХ

### **Абдрахманов Вали Хызырович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и наноэлектроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: awali@inbox.ru

### **Анисимова Наталья Александровна**

аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Российская Федерация

### **Белов Олег Александрович**

кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Энергетические установки и электрооборудование судов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Камчатский государственный технический университет», г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация, e-mail: boa-1@mail.ru

### **Будков Виктор Юрьевич**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории технологий больших данных киберфизических систем, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

### **Важдаев Константин Владимирович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и наноэлектроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: vazhdaevk@gmail.com

### **Варганова Александра Владимировна**

кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Российская Федерация, e-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru

### **Васёв Алексей Николаевич**

начальник службы связи средств диспетчерского технологического управления, филиал ОАО «Сетевая Компания», Набережночелнинские электрические сети, г. Набережные Челны, Российская Федерация

### **Герасимов Вячеслав Евгеньевич**

ассистент кафедры «Электроэнергетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Российская Федерация

### **Горин Вадим Александрович**

кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Энергоснабжение (наземной космической инфраструктуры)», Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: vadim044542010@mail.ru

---

**Дашевский Владимир Павлович**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, руководитель отдела прототипирования робототехнических и встраиваемых систем, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: vladimir.dashevsky@gmail.com

**Дмитриев Алексей Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильного транспорта, строительных и дорожных машин», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Российская Федерация, e-mail: alextmn86@mail.ru

**Еникеева Альфия Рустемовна**

магистрант кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

**Ершов Михаил Сергеевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», г. Москва, Российская Федерация

**Карагодин Владимир Викторович**

доктор технических наук, профессор кафедры «Энергоснабжения (наземной космической инфраструктуры)», Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: vladimirkar@rambler.ru

**Кротенко Дмитрий Сергеевич**

аспирант кафедры «Энергетические установки и электрооборудование судов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Камчатский государственный технический университет», г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

**Крымский Виктор Григорьевич**

доктор технических наук, профессор кафедры управления и сервиса в технических системах, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: vikrymsky@mail.ru

**Кумова Дарья Михайловна**

аспирант кафедры электрогидроакустической и медицинской техники, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», г. Таганрог, Российская Федерация

**Купцов Даниил Викторович**

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа. Российская Федерация

---

**Кушмиль Олег Евгеньевич**

студент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Российская Федерация

**Лапин Денис Игоревич**

аспирант кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: lapin.d@gubkin.ru

**Латыпов Ирек Салихович**

соискатель кафедры «Электроэнергетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», ООО «Тюменский нефтяной научный центр», г. Тюмень. Российская Федерация, e-mail: irek.tat.latypov@gmail.com

**Липатников Константин Алексеевич**

бакалавр техники и технологий, инженер научно-исследовательского института прикладной электродинамики, фотоники и живых систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», г. Казань, Российская Федерация

**Луночкина Ирина Михайловна**

начальник сектора Научно-конструкторского бюро моделирующих и управляющих систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», г. Таганрог, Российская Федерация

**Мисбахов Ринат Шаукатович**

кандидат технических наук, доцент, директор Инжинирингового центра «Компьютерное моделирование и инжиниринг в области энергетики и энергетического машиностроения», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Российская Федерация

**Морозов Олег Геннадьевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофотоники и микроволновых технологий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», г. Казань, Российская Федерация, e-mail: microoil@mail.ru

**Нуреев Ильнур Ильдарович**

доктор технических наук, доцент, доцент кафедры радиофотоники и микроволновых технологий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», г. Казань, Российская Федерация

**Панова Евгения Александровна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Российская Федерация

---

**Рыжий Николай Витальевич**

адъюнкт кафедры «Энергоснабжение (наземной космической инфраструктуры)», Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: nikolya.ryzhiy@mail.ru

**Салихов Ренат Баязитович**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Инфокоммуникационные технологии и нанoeлектроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: salikhovrb@ya.ru

**Саттаров Роберт Радикович**

доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: sattar.rb@gmail.com

**Сахабутдинов Айрат Жавдатович**

доктор технических наук, доцент кафедры радиофотоники и микроволновых технологий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ», г. Казань, Российская Федерация

**Сироткин Сергей Леонидович**

кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор Научно-конструкторского бюро моделирующих и управляющих систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», г. Таганрог, Российская Федерация

**Спирidonov Олег Борисович**

кандидат технических наук, директор Научно-конструкторского бюро моделирующих и управляющих систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», г. Таганрог, Российская Федерация

**Стыскин Андрей Владиславович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: styskin.andrei@yandex.ru

**Тимощук Вячеслав Николаевич**

студент кафедры «Энергетические установки и электрооборудование судов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Камчатский государственный технический университет», г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

**Уразбахтина Нэля Гиндуллаевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: urazbah@mail.ru

---

**Федосеева Евгения Александровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: e.a.fedoseeva@mail.ru

**Хазиева Регина Тагировна**

старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: khazievart@mail.ru

**Хатюшина Татьяна Владимировна**

магистрант кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Российская Федерация

**Шарипов Булат Айдарович**

магистрант кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

**Шарипов Марсель Ильгизович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация, e-mail: sharipovm@mail.ru

**Шафиков Игорь Наилевич**

аспирант кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: shafikov\_in@mail.ru

---

## ABOUT THE AUTHORS

### **Abdrakhmanov Vali K.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Infocommunication Technologies and Nanoelectronics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», Ufa, Russian Federation, e-mail: awali@inbox.ru

### **Anisimova Natalya A.**

Postgraduate Student of Industrial Power Supply Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Nosov Magnitogorsk State Technical University», Magnitogorsk, Russian Federation

### **Belov Oleg A.**

Cand. Sci. Tech., Head of the Department «Power Plants and Electrical Equipment of Ships», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kamchatka State Technical University», Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation, e-mail: boa-1@mail.ru

### **Budkov Viktor Yu.**

Cand. Sci. Tech., Senior Researcher, Head of Laboratory of Big Data Technologies in Socio-Cyberphysical Systems of Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Petersburg, Russian Federation

### **Dashevsky Vladimir P.**

Cand. Sci. Tech., Senior Researcher, Head of Robotic and Embedded System Prototyping Division, Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: vladimir.dashevsky@gmail.com

### **Dmitriev Alexey A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Road Transport, Construction and Road Machines Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tyumen Industrial University», Tyumen, Russian Federation, e-mail: alextmn86@mail.ru

### **Enikeeva Alfiya R.**

Undergraduate Student of Industrial Heat Power Engineering Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

### **Ershov Mikhail S.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Professor of Department «Theoretical Electrical Engineering and Electrification of the Oil and Gas Industry», Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National University of Oil and Gas (Gubkin University)», Moscow, Russian Federation

### **Fedoseeva Evgeniya A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Industrial Heat and Power Engineering Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation, e-mail: e.a.fedoseeva@mail.ru

### **Gerasimov Vyacheslav E.**

Assistant of Electricity Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen», Tyumen, Russian Federation

### **Gorin Vadim A.**

Cand. Sci. Tech., Lecturer of Department «Power Supply (of Ground-Based Space Infrastructure)», Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education «Mozhaisky Military Space Academy» of the Ministry of Defense, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: vadim044542010@mail.ru

---

**Hatyushina Tatyana V.**

Master Student of Industrial Power Supply Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Nosov Magnitogorsk State Technical University», Magnitogorsk, Russian Federation

**Khazieva Regina T.**

Senior Lecturer of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation, e-mail: khazievart@mail.ru

**Karagodin Vladimir V.**

Dr. Sci. Tech., Professor of Department «Power Supply (of Ground-Based Space Infrastructure)», Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education «Mozhaisky Military Space Academy» of the Ministry of Defense, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: vladimirkar@rambler.ru

**Krotenko Dmitry S.**

Postgraduate Student of the Department «Power Plants and Electrical Equipment of Ships», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, «Kamchatka State Technical University», Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

**Krymsky Viktor G.**

Dr. Sci. Tech., Professor of the Management and Service in Technical Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation, e-mail: vikrymsky@mail.ru

**Kumova Darja M.**

Postgraduate Student of Electrohydroacoustic and Medical Equipment Department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», Taganrog, Russian Federation

**Kupcov Danil V.**

Student of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

**Kushmil Oleg E.**

Student of Industrial Power Supply Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Nosov Magnitogorsk State Technical University», Magnitogorsk, Russian Federation

**Lapin Denis I.**

Postgraduate Student of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of the Oil and Gas Industry Department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National University of Oil and Gas (Gubkin University)», Moscow, Russian Federation, e-mail: lapin.d@gubkin.ru

**Latypov Irek S.**

Applicant of Electrical Power Engineering Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen», Tyumen Oil Research Center LLC, Tyumen, Russian Federation, e-mail: irek.tat.latypov@gmail.com

**Lipatnikov Konstantin A.**

Master Student of the Microwave Photonics and Technologies Department, Engineer of the Research Institute of Applied Electrodynamics, Photonics and Living Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI», Kazan, Russian Federation

---

**Lunochkina Irina M.**

Head of Sector of Scientific Design Bureau of Modeling and Control Systems, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», Taganrog, Russian Federation

**Misbakhov Rinat Sh.**

Cand. Sci. Tech., Director of Engineering Center «Computer Modeling and Engineering in the Field of Energy and Power Engineering», Associated Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power Engineering University», Kazan, Russian Federation

**Morozov Oleg G.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of the Microwave Photonics and Technologies Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI», Kazan, Russian Federation, e-mail: microoil@mail.ru

**Nureev Ilnur I.**

Dr. Sci. Tech., Assistant Professor, Associated Professor of the Microwave Photonics and Technologies Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI», Kazan, Russian Federation

**Panova Evgeniya A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor, Assistant Professor of Industrial Power Supply Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Nosov Magnitogorsk State Technical University», Magnitogorsk, Russian Federation

**Ryzhiy Nikolay V.**

Post-Graduate Student of Department «Power Supply (of Ground-Based Space Infrastructure)», Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education «Mozhaisky Military Space Academy» of the Ministry of Defense, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: nikolya.ryzhiy@mail.ru

**Sakhabutdinov Airat Zh.**

Dr. Sci. Tech., Professor of the Microwave Photonics and Technologies Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI», Kazan, Russian Federation

**Salikhov Renat B.**

Dr. Sci. Phys.-Math., Professor, Head of Infocommunication Technologies and Nanoelectronics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», Ufa, Russian Federation, e-mail: salikhovrb@ya.ru

**Sattarov Robert R.**

Dr. Sci. Tech, Professor of Department «Electrical Equipment and Facilities of Enterprises», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation, e-mail: sattar.rb@gmail.com

**Shafikov Igor N.**

Postgraduate Student of Automation of Technological Processes and Industrial Facilities Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation, e-mail: shafikov\_in@mail.ru

---

**Sharipov Bulat A.**

Undergraduate Student of Industrial Heat Power Engineering Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

**Sharipov Marsel I.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Automated Process and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation, e-mail: sharipovm@mail.ru

**Sirotkin Sergey L.**

Cand. Sci. Tech., Leading Design Engineer of Scientific Design Bureau of Modeling and Control Systems, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», Taganrog, Russian Federation

**Spiridonov Oleg B.**

Cand. Sci. Tech., Director of Scientific Design Bureau of Modeling and Control Systems, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», Taganrog, Russian Federation

**Styskin Andrey V.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electromechanic Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», Ufa, Russian Federation, e-mail: styskin.andrei@yandex.ru

**Tymoschuk Vyacheslav N.**

Student of the Department «Power Plants and Electrical Equipment of Ships», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kamchatka State Technical University», Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

**Urazbakhina Nelja G.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electromechanic Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», Ufa, Russian Federation, e-mail: urazbah@mail.ru

**Varganova Aleksandra V.**

Cand. Sci. Tech., assistant professor of Industrial Power Supply Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Nosov Magnitogorsk State Technical University», Magnitogorsk, Russian Federation, e-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru

**Vasev Alexey N.**

Head of Communications Service of Naberezhnye-Chelny Branch of OJSC «Grid Company», Naberezhnye Chelny, Russian Federation

**Vazhdaev Konstantin V.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Infocommunication Technologies and Nanoelectronics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», Assistant Professor of Water Supply and Sewage Water Disposal Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation, e-mail: vazhdaevk@gmail.com

## Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале:

1. Статьи, предоставляемые авторами в журнал, должны соответствовать профилю журнала, обладать новизной, интересовать широкий круг научной общественности.
2. Редакция принимает к публикации только открытые материалы на русском и английском языках (для иностранных авторов).
3. Поля — 2,5 см с каждой стороны; шрифт — Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал — полуторный; ссылки на литературу — в квадратных скобках. При наличии ссылок список литературы обязателен (в порядке цитирования, в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008).
4. В правом верхнем углу жирным курсивом: фамилия, имя, отчество авторов (обязательно полностью), ученая степень, ученое звание, должность, структурное подразделение (обязательно полностью), наименование организации (полностью), город, страна.
5. По центру, жирным шрифтом, заглавными буквами: название статьи, УДК в правом верхнем углу.
6. В конце статьи укажите почтовый адрес с указанием индекса, фамилию и инициалы получателя (по этому адресу будет выслан журнал), телефон (сотовый), e-mail контактного лица. Файл со статьей оформить: Фамилия И.О.doc (или docx). Отправлять по адресу: uor-ugaes@mail.ru.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельными файлами.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (240 слов, определяющих теоретическую ценность и практическую новизну статьи), ключевые слова (не менее 10), список литературы обязателен (не менее 5 источников) на русском и английском языках.
9. Автор дает согласие на воспроизведение на безвозмездной основе в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВО «УГНТУ» электронной версии своей статьи, опубликованной в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы».
10. Графический и табличный материал должен быть представлен в черно-белом варианте в приложении к WORD, например, Microsoft Graph, без использования сканирования; для диаграмм применять различную штриховку, размер шрифта 10 или 11 pt, математические формулы оформляются через редактор формул Microsoft Equation, а их нумерация проставляется с правой стороны. Таблицы, диаграммы, рисунки подписываются 12 шрифтом в правом верхнем углу.
11. Сокращение слов, имен и названий, как правило, не допускается. Разрешаются лишь общепринятые сокращения мер физических, химических и математических величин и терминов и т. д.
12. Поступившие в редакцию статьи в обязательном порядке будут проходить рецензирование. Рецензии отклоненных работ высылаются авторам и содержат аргументированный отказ от публикации. В рецензиях работ, отправленных на доработку, указываются замечания к статье.
13. Все статьи, поступившие в редакцию, в обязательном порядке проходят проверку в системе «Антиплагиат».
14. С аспирантов плата за публикацию не взимается. При отправлении статьи на электронный адрес также необходимо отправить отсканированную справку из аспирантуры, заверенную отделом кадров.

### Памятка авторам

В статье настоятельно рекомендуется:

- НЕ использовать табуляцию (клавиша Tab);
- НЕ устанавливать свои стили абзацев (кроме принятых по умолчанию);
- НЕ расставлять автоматические списки (при нумерации строк и абзацев);
- НЕ ставить двойные, тройные и т. д. пробелы между словами.

Рекомендуется применять в статье только один тип кавычек («»).

Помнить о том, что необходимо различать дефис и тире. Тире выставляется сочетанием двух клавиш («Ctrl» + «-»).

**Все цитаты в статье должны быть соотнесены со списком литературы, при прямом цитировании обязательно указывать номера страниц.** Список литературы не следует смешивать с примечаниями, которые должны располагаться перед списком литературы.

**Статьи, не соответствующие требованиям, отклоняются для доработки.**

---

## **Requirements for the materials, provided for publication in the journal:**

1. Articles provided by the authors in the Journal should match the profile of the magazine, be new, be interesting for a wide range of scientific community.
2. Revision accepted for publication only open materials in Russian and English (for foreign authors).
3. Fields — 2.5 cm on each side; font — Times New Roman, font size — 14, line spacing — one and a half; References in square brackets. If there is a list of literature references is required (in order of citation in accordance with GOST R 7.05-2008).
4. In the upper right corner in bold italics: surname, name, patronymic of the author (certainly in full), academic degree, academic rank, position, name of organization (in full), country, city.
5. Centered, bold capital letters: title of the article. UDC — in the upper right corner.
6. At the end of the article specify the e-mail address with ZIP code, name and initials of the recipient (the address will be sent to the magazine), telephone (mobile), e-mail of the contact person. Article File Contents: Surname N.P.doc (or docx). Send to the address: uop-ugaes@mail.ru.
7. Be sure to send color photos of the authors in separate files (at least 1 MB and not more than 5 MB).
8. To the article must be accompanied by the Russian and English languages: the article title, abstract (240 words, determine the theoretical value and practical novelty of the article), keywords (at least 10), references required (at least 5 sources).
9. Author agrees to play free of charge on the Internet at the website FSBEI HE «USPTU» electronic version of his article published in the journal «Electrical and data processing facilities and systems».
10. Graphical and table material should be presented in the annex to the WORD. For example, Microsoft Graph, without scanning; diagrams for applying a different shading, font size 10 or 11 pt, mathematical formulas should be made through the formula editor Microsoft Equation, and their numbers stamped on the right side. Table signed by the 12th print in the upper right corner, diagrams, drawings — at the bottom center.
11. Reductions of words of names usually are not permitted. Allowed only standard abbreviations measures, physical, chemical and mathematical quantities and terms, etc.
12. Received articles will necessarily be reviewed. Reviews of rejected papers are sent to the authors and contain a reasoned rejection of the publication. In reviews of works sent for revision, specify comments on the article.
13. All articles received by the editorial compulsorily tested in the «Anti-plagiarism».
14. Article volume with the summary and the list of references shouldn't exceed 12 pages.

### **Memo to authors**

The article is highly recommended:

- NOT TO use the tab key (Tab);
- NOT TO place your paragraph styles (other than the defaults);
- NOT TO set automatic lists (with line numbers and paragraphs);
- NOT TO put double, triple and so. D. The spaces between words.

Recommended in the article is only one type of quotes («» or "").

Remember that it is necessary to distinguish hyphens and dashes. Dash is exhibited by a combination of two keys («Ctrl» + «-»).

**All quotations in the article should be correlated with the list of literature, with direct quotations necessarily indicate page numbers.** References should not be confused with the notes that must be placed before the bibliography.

**Articles that do not meet the requirements will be rejected for revision.**