

Подписной индекс: 91824 в каталоге «Пресса России»

Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 1, т. 16, 2020

Группы научных специальностей, по которым ведется прием статей в научный журнал
«Электротехнические и информационные комплексы и системы»:

- 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты (технические науки),
- 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки),
- 05.09.12 – Силовая электроника (технические науки),
- 05.11.01 – Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки),
- 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (технические науки),
- 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям) (технические науки),
- 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (технические науки),
- 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки)

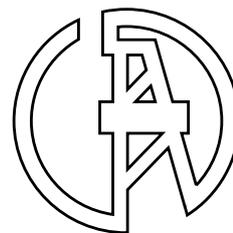


Electrical and data processing facilities and systems

№ 1, т. 16, 2020



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УГНТУ

№ 1, т. 16, 2020

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:

Главный редактор:

М.И. Хакимьянов — д-р техн. наук, доц. 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)

Члены редакционной коллегии:

В.М. Аргюшенко — 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) 

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. Г. Саенко

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

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, 2020.

Адрес редакции и издательства: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

Тел.: (347) 243–16–19, ies.rusoil.net

Цена свободная. 12+

Подписано в печать 23.05.2020 г. Формат 60×84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,39.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 69.

Адрес типографии: 450064, 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.

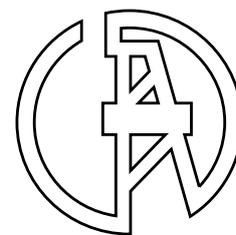
Материалы приводятся в авторской редакции.

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

№ 4, 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:

M.I. Khakimyanov — Dr. Sci. Tech. Assoc. 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. G. Saenko

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.

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, 2020.

Address of Editors office and Founder: 450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.

Tel. (347) 243-16-19, ies.rusoil.net

Price is free. 12+

Publishing authorized on 23.05.2020. Paper format 60×84/8. Offset printing. 16.39 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 69.

Address of Publishing Office: 450064, 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>Дорфман Б.С., Балахонцев В.Е., Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Гусаков Д.В., Бекузин В.И.</i> Виртуальный стенд для испытаний элементов системы электроснабжения летательных аппаратов	5
<i>Дебиев М.В., Эльмурзаев А.А.</i> Развитие возобновляемых источников энергии в Чеченской Республике	16
<i>Иванова О.В., Халиков Р.М., Короткова Л.Н.</i> Рациональное управление качеством функционирования электротехнической аппаратуры технологической схемы производства сжиженного газа	24
<i>Соловьев А.В., Кретюк Д.А.</i> К вопросу обоснования требуемой степени резервирования технических систем, обеспечивающих функционирование объекта	30
<i>Гусев Р.А., Бухаров Д.С.</i> К вопросу о разработке программного обеспечения для мониторинга и анализа работы дистанционной защиты	40
<i>Шуваева А.О., Меньшенин И.С.</i> Разработка и испытание устройства катодной защиты с автономным источником питания	47
<i>Ле Ван Тунг, Буй Чунг Кьен.</i> Прямое управление током активного выпрямителя с повышением эффективности метода непосредственного управления моментом асинхронных двигателей	54

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Муравьева Е.А., Шарипов М.И., Кубряк А.И.</i> Разработка метода управления процессом добычи на нефтегазовых месторождениях с использованием искусственного интеллекта	62
<i>Самаров Е.К.</i> Двумерное дискретное преобразование Габора и его применение для подавления шума в цифровых изображениях	69
<i>Янбеков Э.Р.</i> Цифровая аналитика геолого-технических мероприятий	73
<i>Андреанов А.В., Зикий А.Н., Кочубей А.С.</i> Широкополосный усилитель средней мощности дециметровых волн	82
<i>Шулаева Е.А., Маштанов Н.М., Иванов А.Н.</i> Многокритериальная оптимизация работы ртутного электролизера для получения каустической соды методом имитации отжига	89

МЕТРОЛОГИЯ

И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

<i>Важдаев К.В., Ураксеев М.А., Мартяшева В.А.</i> Автоматизированная многофункциональная система контроля утечки газа с использованием беспроводной технологии	97
<i>Зламан П.Н., Андреанов А.В., Зикий А.Н.</i> Экспериментальное исследование микросхемы LTC5553 в режиме умножения частоты с направленным ответвителем	106
<i>Лихачев Е.А., Зайцева А.А., Клименко О.В., Керасирова А.А.</i> Встроенная система контроля САУ-37	112

НАНОЭЛЕКТРОНИКА

И КВАНТОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

<i>Доломатов М.Ю., Шуткова С.А., Бахтизин Р.З., Доломатова М.М.</i> Исследование молекулярной и электронной структуры нанокластеров молекулярных димеров нефтяных асфальтенов «континентального» типа	118
Об авторах	125

CONTENT

ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Dorfman B.S., Balahoncev V.E., Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Gusakov D.V., Bekuzin V.I.</i> Virtual test bench for testing elements of aircraft power supply system	5
<i>Debiev M.V., Elmurzaev A.A.</i> Development of renewable sources energies of the Chechen Republic	16
<i>Ivanova O.V., Khalikov R.M., Korotkova L.N.</i> Rational management of quality of functioning of electrical technical equipment of technological scheme for producing liquefied gas	24
<i>Soloviev A.V., Kretuk D.A.</i> To the issue of justification of the required degree of redundancy of technical systems ensuring object operation	30
<i>Gusev R.A., Bukharov D.S.</i> Revisiting the development of a software for monitoring and analyzing of distance protection devices	40
<i>Shuvaeva A.O., Menshenin I.S.</i> Development and testing of a cathodic protection device with an autonomous power source	47
<i>Le Van Tung, Bui Trung Kien.</i> Direct current control of the active rectifier with improve method direct torque control AC motor	54

DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Muraveva E.A., Sharipov M.I., Kubryak A.I.</i> Development of a method for controlling the production process in oil and gas fields using neural networks	62
<i>Samarov E.K.</i> Two-dimensional discrete Gabor transformation and its application to noise suppression in digital images	69
<i>Yanbekov E.R.</i> Digital analytics of geological and engineering operations	73
<i>Andrianov A.V., Zikiy A.N., Kochubey A.S.</i> Broadband medium power amplifier for decimeter waves	82
<i>Shulaeva E.A., Mashtanov N.M., Ivanov A.N.</i> Multi-criterial optimization of the work of a mercury electrolyzer for producing caustic soda by annealing simulations	89

METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES

<i>Vazhdaev K.V., Urakseev M.A., Martyasheva V.A.</i> Automated multifunctional gas leakage control system using wireless technology	97
<i>Zlaman P.N., Andrianov A.V., Zikiy A.N.</i> Experimental investigation of the LTC5553 microcircuit in the frequency multiplication mode with directional coupler	106
<i>Likhachev E.A., Zaytseva A.A., Klimenko O.V., Kerasirova A.A.</i> Built-in ACS-37 control system	112

NANOELECTRONICS AND QUANTUM DATA SYSTEMS

<i>Dolomatov M.Yu., Shutkova S.A., Bakhtizin R.Z., Dolomatova M.M.</i> Research of the molecular and electronic structure of nanoclusters of molecular dimers of «continental» type oil asphaltes	118
About the authors	125



Дорфман Б. С.
Dorfman B. S.
генеральный директор,
АО «Уфимское научно-
производственное
предприятие «Молния»,
г. Уфа,
Российская Федерация



Балахонцев В. Е.
Balahoncev V. E.
начальник отдела 175,
АО «Уфимское научно-
производственное
предприятие «Молния»,
г. Уфа,
Российская Федерация



Исмагилов Ф. Р.
Ismagilov F. R.
доктор технических
наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Электромеханика»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный
авиационный технический
университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация



Вавилов В. Е.
Vavilov V. E.
кандидат технических наук,
доцент, доцент кафедры
«Электромеханика»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный
авиационный технический
университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация



Гусаков Д. В.
Gusakov D. V.
кандидат технических
наук, старший
преподаватель кафедры
«Электромеханика»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный
авиационный технический
университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация



Бекузин В. И.
Bekuzin V. I.
аспирант кафедры
«Электромеханика»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный
авиационный технический
университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация

УДК 631.313

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-5-15

ВИРТУАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В статье представлены результаты исследований работы виртуального стенда для испытаний элементов системы электроснабжения летательных аппаратов, виртуальный стенд выполнен на двумерной модели методом конечных элементов в программе ANSYS Maxwell 2017. Электрическая цепь систем электроснабжения в виртуальном стенде реализована в

ANSYS Circuit Editor. ANSYS Circuit Editor взаимосвязана с конечно-элементной моделью электромеханических элементов виртуального стенда. Подобный подход позволяет на работанном виртуальном стенде моделировать не только совместную работу электромеханических преобразователей в составе систем электроснабжения, но и оценивать влияние их магнитных полей друг на друга, оценивать их электромагнитную совместимость.

Виртуальный стенд позволяет реализовать имитацию работы системы электроснабжения летательного аппарата, включающую в себя магнитоэлектрический генератор, выпрямительное устройство, инвертор, блок трансформаторов и нагрузку. Применение разрабатываемого виртуального стенда позволяет отслеживать полный цикл преобразования электрической энергии: из переменного напряжения в постоянный и наоборот, а также оценивать качество преобразованного напряжения на всех участках цепи. При этом виртуальный стенд позволяет оценивать электромагнитную совместимость компонентов, входящих в него. Кроме того, создаваемый виртуальный стенд позволяет без натурных испытаний всей системы электроснабжения интегрировать в него модернизируемые элементы и оценивать их работоспособность уже в составе системы.

В ходе работы виртуальный стенд прошел верификацию со стендом, реализующим реальную систему электроснабжения летательного аппарата. Результаты верификации и сравнение с реальной системой электроснабжения представлены в работе. Результаты исследований могут быть полезны ученым и инженерам, которые занимаются созданием систем электроснабжения летательных аппаратов, а также сотрудникам предприятий, которые занимаются выпуском серийных элементов для систем электроснабжения летательных аппаратов.

Ключевые слова: виртуальный стенд, испытания, система электроснабжения летательных аппаратов, магнитоэлектрический генератор, выпрямительное устройство, блок трансформаторов, компьютерное моделирование.

VIRTUAL TEST BENCH FOR TESTING ELEMENTS OF AIRCRAFT POWER SUPPLY SYSTEM

A significant part of the electric energy transmission and distribution infrastructure is occupied by The paper presents the results of studies on the operation of a virtual bench for testing the elements of the aircraft electrical supply system, virtual bench was made on a two-dimensional model by the finite element method in ANSYS Maxwell 2017. The electrical circuit of the power supply systems in the virtual bench is implemented in the ANSYS Circuit Editor. ANSYS Circuit Editor is interconnected with the finite element model of electromechanical elements of a virtual bench. Such an approach allows to simulate not only the joint operation of electromechanical converters in the power supply system, but also to evaluate the influence of their magnetic fields on each other, to assess their electromagnetic compatibility.

A virtual bench allows to implement an simulation of the aircraft's power supply system, which includes a magnetoelectric generator, a rectifier, an inverter, a transformer unit and a load. The application of the developed virtual bench allows to track the full cycle of electric energy conversion: from alternating voltage to direct and vice versa, and also to evaluate the quality of the converted voltage in all parts of the circuit. At the same time, the virtual bench allows to evaluate the electromagnetic compatibility of the components included in it. In addition, the virtual bench being created allows integrating upgraded elements into it and assessing its performance as part of the system without full-scale tests of the entire power supply system.

In the course of work, the virtual bench was verified with a stand that implements the real power supply system of the aircraft. The verification results and comparison with a real power supply system are presented in the paper. The results of the study may be useful to scientists and engineers who are involved in the creation of power supply system of the aircraft, as well as to employees of enterprises that produce serial elements for power supply system of the aircraft.

Key words: virtual test bench, aircraft power supply system, magnetoelectric generator, rectifier, transformer unit, computer simulation.

Введение

Развитие современных летательных аппаратов (ЛА) направлено на повышение их экологичности, снижение эксплуатационных затрат при улучшении их тактико-технических характеристик и повышение безопасности полета. Как видно из публикаций последних лет, одним из основных способов решения приведённых выше задач является повышение использования уровня электрической энергии на борту ЛА [1–3]. Это позволяет уменьшить отборы воздуха от авиационного двигателя, минимизировать потребление механической энергии гидравлическими и пневматическими системами ЛА.

Для повышения уровня использования электрической энергии в ЛА первоочередными становятся вопросы модернизации элементов системы электроснабжения (СЭС) ЛА.

Очевидно, что при модернизации СЭС ЛА, ввиду экономической и технической эффективности, перепроектируются не все элементы, а наиболее ответственные (например электромеханические преобразователи энергии, преобразователи частоты). Поэтому при модернизации СЭС ЛА важной задачей становятся испытания создаваемых изделий — как стендовые, на проверку и соответствия техническому заданию и техническим условиям, так и в составе СЭС.

При этом, если стендовые испытания правильнее производить путем натуральных экспериментов, то испытания в составе СЭС с целью оценки взаимовлияния элементов существующих и модернизируемых элементов СЭС более эффективным, с точки зрения финансовых затрат, является с использованием верифицированных виртуальных стендов, построенных с использованием математических и компьютерных моделей и верифицированных на практике [4].

В публикациях [5–7] представлены способы моделирования в программных комплексах Matlab, SolidWorks. Однако данные комплексы не учитывают искажения фазных напряжений, токов и электромагнитного момента генератора при работе на нелинейную цепь. Поэтому для полного анализа (разработки) СЭС ЛА целесообразней использовать программные комплексы, которые учи-

тывают изменение электромагнитных параметров электромеханических преобразователей энергии (в частности генераторов, стартер-генераторов) [8]. К программному комплексу, который учитывает изменение электромагнитных параметров нелинейной цепи и изменение электромагнитных параметров генератора, можно отнести Ansys Maxwell. Данный программный комплекс позволяет совместить и симулировать работу СЭС в виртуальном пространстве. При этом работ по разработке виртуального стенда и анализу влияния электромагнитной совместимости компонентов нелинейной цепи не так много.

Поэтому задачей данной работы является разработка виртуального стенда в программном комплексе Ansys Maxwell, который позволит реализовать имитацию работы СЭС ЛА, включающую в себя магнитноэлектрический генератор (МЭГ), выпрямительное устройство (ВУ), инвертор, блок трансформаторов (БТ) и нагрузку.

Применение разрабатываемого виртуального стенда позволяет отслеживать полный цикл преобразования электрической энергии: из переменного напряжения в постоянный и наоборот, а также оценивать качество преобразованного напряжения на всех участках цепи. При этом виртуальный стенд позволяет оценивать электромагнитную совместимость компонентов, входящих в него. Кроме того, создаваемый виртуальный стенд позволяет без натуральных испытаний всей СЭС интегрировать в него модернизируемые элементы СЭС и оценивать их работоспособность уже в составе СЭС.

В работе представлены состав виртуального стенда и результаты виртуальных испытаний СЭС с конкретными численными параметрами. Кроме того, в ходе работы виртуальный стенд прошел верификацию со стендом, реализующим реальную СЭС ЛА, результаты верификации, сравнение с реальной СЭС представлены в работе.

Результаты статьи могут быть полезны ученым и инженерам, которые занимаются созданием СЭС ЛА, а также сотрудникам предприятий, которые занимаются выпуском серийных элементов для СЭС ЛА.

1. *Облик виртуального стенда.* Виртуальный стенд был выполнен на двумерной модели методом конечных элементов (МКЭ) в программе ANSYS Maxwell 2017. Электрическая цепь систем электроснабжения в виртуальном стенде реализована в ANSYS Circuit Editor. ANSYS Circuit Editor взаимосвязана с конечно-элементной моделью электромеханических элементов виртуального стенда. Подобный подход позволяет на разработанном виртуальном стенде моделировать не только совместную работу электромеханических преобразователей в составе СЭС, но и оценивать влияние их магнитных полей друг на друга, оценивать их электромагнитную совместимость.

На рисунке 1 изображена электрическая схема виртуального стенда СЭС. Вирту-

альный стенд состоит из МЭГ (мощность 46 кВА, частота вращения 8400 об/мин, номинальное линейное напряжение 320 В), три выводных конца которого соединены с ВУ1 (включающие в себя фильтрующие устройство ФУ1). ВУ1 соединен с инвертором, выводные концы инвертора соединены с фильтрующим устройством 2 (ФУ2), на выходе ФУ2 – 115 В, 400 Гц (трехфазная сеть, с нагрузкой). К трехфазной цепи электрически соединено ФУ2.1, которое соединено с БТ, на выходе БТ — 12 В, 400 Гц. БТ соединен с ВУ2, на выходе ВУ2 — 27 В постоянного тока, которое соединено непосредственно с нагрузкой. Длина кабеля в проектируемом виртуальном стенде учитывается введением дополнительных сопротивлений.

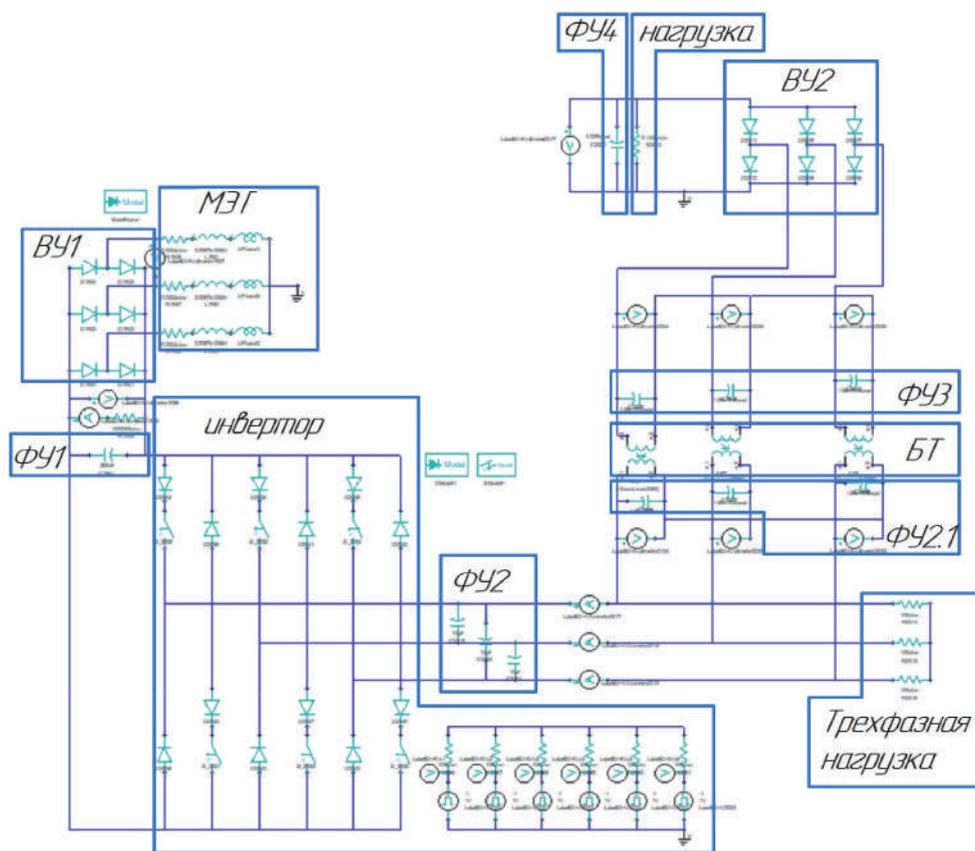


Рисунок 1. Электрическая схема виртуального стенда

1.1. *Электромеханическая часть стенда.* На рисунке 2 показана электромеханическая часть стенда, включающая в себя МЭГ.

Как уже было сказано ранее, источником энергии виртуального стенда является МЭГ мощностью 46 кВА и номинальной частотой вращения 8400 об/мин, характеристики МЭГ представлены в таблице 1.

На рисунке 3 представлены внешние характеристики МЭГ при активной нагрузке и активно-индуктивной нагрузке ($\cos \varphi = 0,8$).

Картина распределения магнитного поля в теле магнитопровода статора и ротора представлена на рисунке 4.

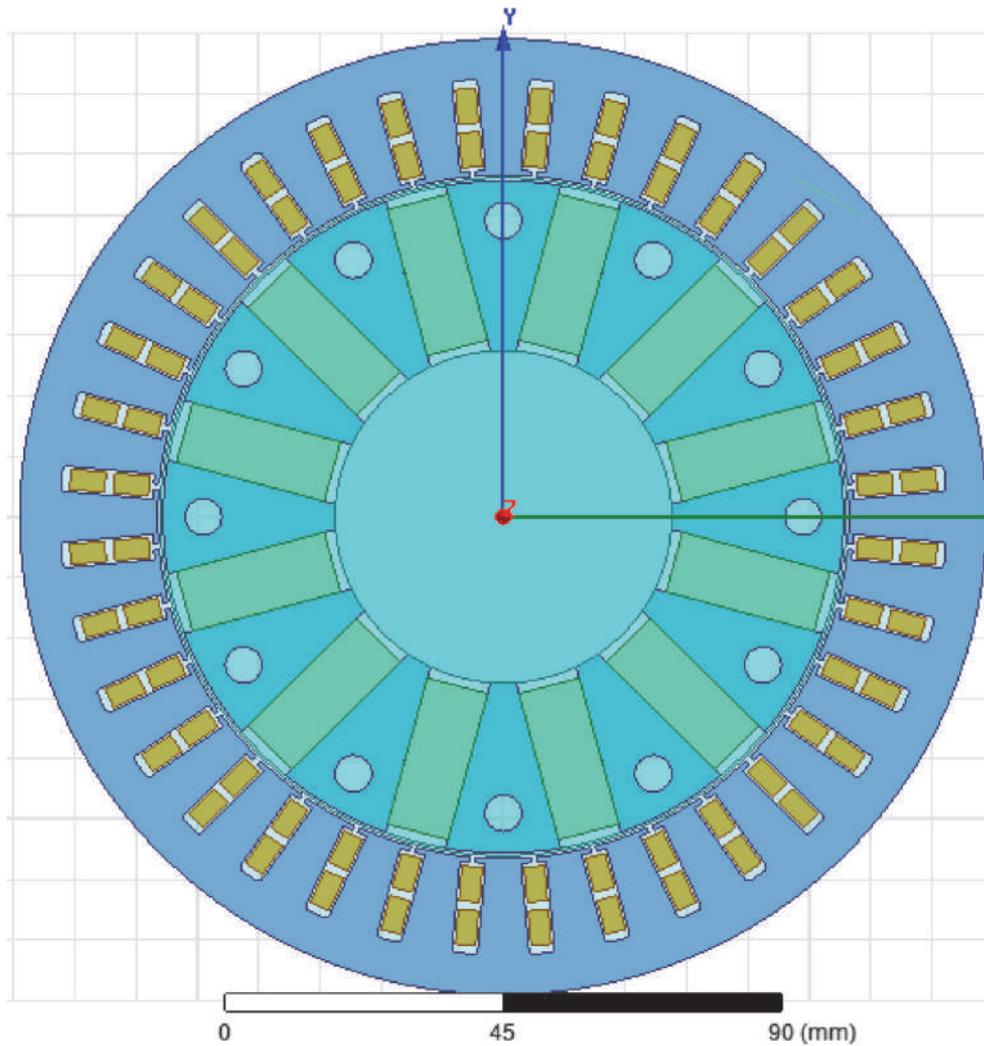


Рисунок 2. Электромеханическая часть станда

Таблица 1. Характеристики МЭГ

Параметр	Значения
Мощность, кВА	46
Число полюсов ротора	12
Число пазов статора	36
Частота вращения ротора, об/мин	8400
Напряжение холостого хода, фазное, действующее, В	212
Напряжение при номинальной нагрузке, $\cos \varphi = 1$ (нагрузки), линейное, действующее, В	320
Плотность тока, А/мм ²	9
Ток фазы, А	82
Число витков в фазе	24
Активное сопротивление фазы, Ом	0,0254
Индуктивности L_d/L_q , мкГн	119,53/150,86
Магнитная индукция в спинке статора, Тл	1,6
Магнитная индукция в зубцах статора, Тл	1,6
Магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл	0,67
Активная длина статора, мм	105
Тип материала магнитопровода статора, мм	Эл. тех. сталь 2421, 0,18
Тип материала магнитопровода ротора, мм	Эл. тех. сталь 2212, 0,5
Диаметр статора, внутренний/внешний, мм	113,3/158
Диаметр ротора, внутренний/внешний, мм	55/111,13
Тип постоянных магнитов, B_r (Тл) / H_c (к А/м)	SmCo, 1,06/760

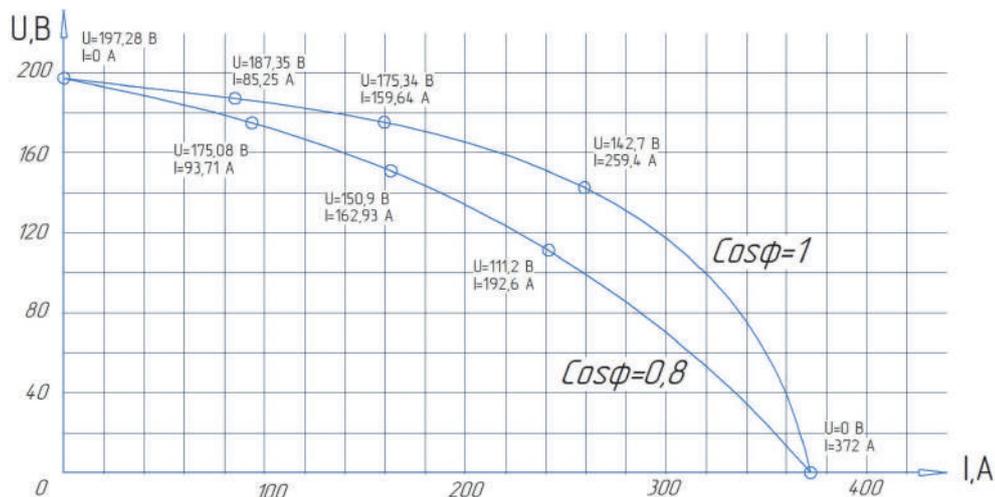


Рисунок 3. Внешние характеристики МЭГ

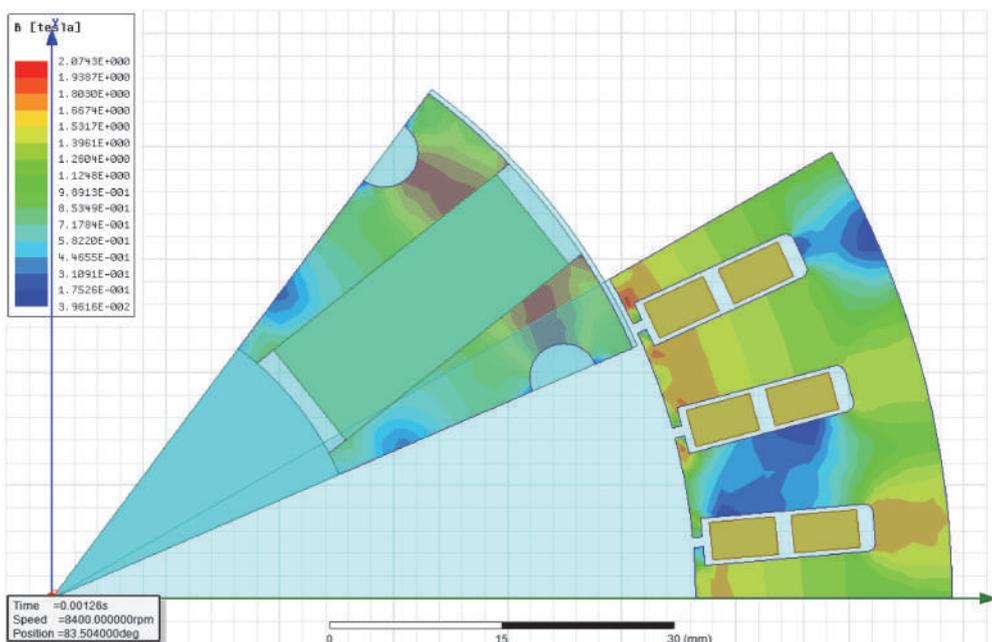


Рисунок 4. Картина распределения магнитного поля в теле магнитопровода статора и ротора

Из рисунка 4 следует, что локальные перенасыщения незначительные.

1.2. Рабочие характеристики виртуального стенда. Рабочие характеристики снимались в режиме работы виртуального стенда на нагрузку 5 кВт в цепи постоянного тока (напряжение 27 В) и на трехфазную нагрузку (83 кВт) в цепи трехфазного переменного тока (фазное напряжение 115 В).

Режим работы СЭС на два канала генерирования является основным режимом работы. Электрическая схема соединений представлена на рисунке 1.

Мощность нагрузки была выбрана исходя из внешней характеристики МЭГ, представленной на рисунке 3. Данный режим работы соответствует двухкратной перегрузке МЭГ.

На рисунках 5 и 6 показаны осциллограммы напряжения и тока (соответственно) на нагрузки цепи постоянного тока участка между ФУ4 и ВУ2.

Из рисунка 5 следует, что при номинальном режиме работы напряжение нагрузки составляет 27 В.

Из рисунка 6 следует, что ток нагрузки составляет 185 А, а мощность нагрузки в цепи постоянного тока составляет 5 кВт.

На рисунках 7 и 8 показаны осциллограммы фазного напряжения и токов в трехфазной цепи (трехфазная нагрузка) и разложение осциллограмм на гармонический состав.

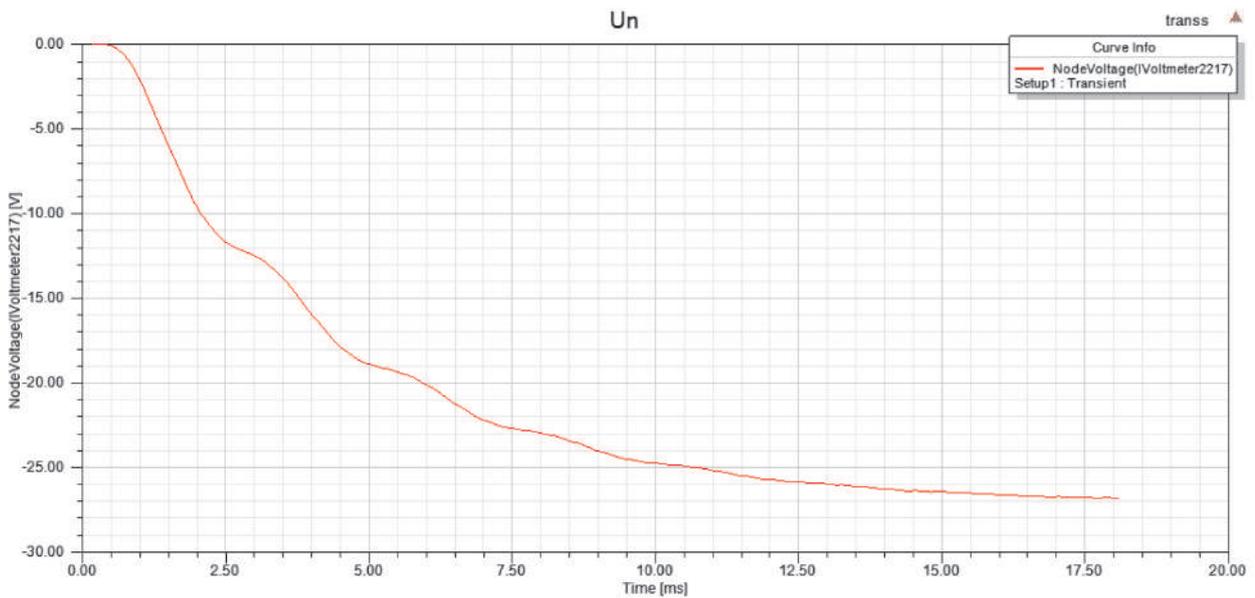


Рисунок 5. Осциллограмма напряжения нагрузки цепи постоянного тока

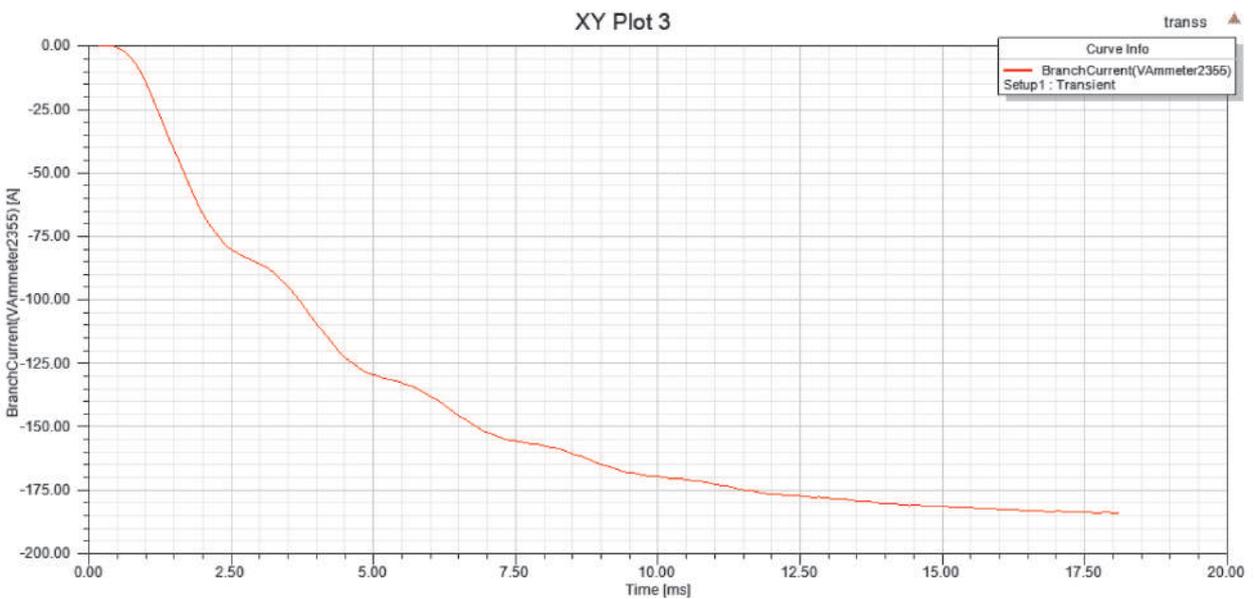
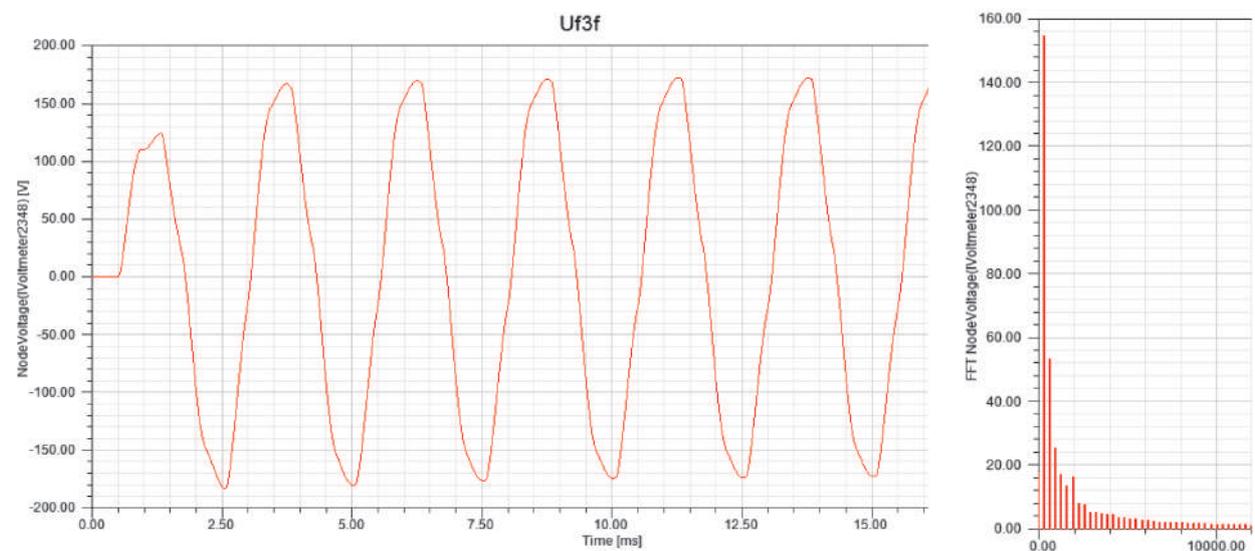


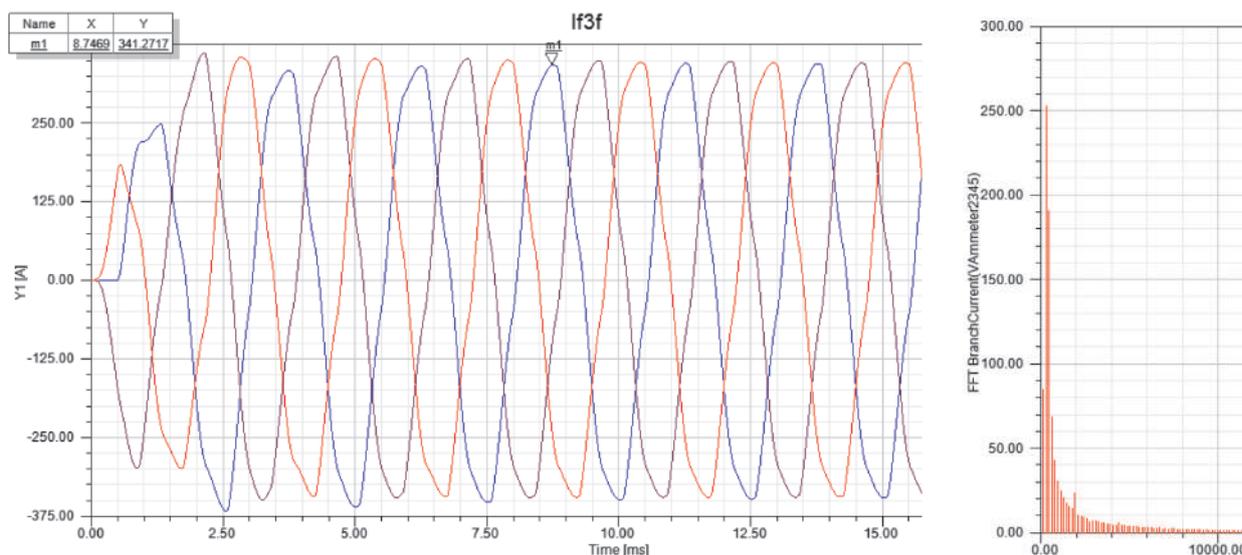
Рисунок 6. Осциллограмма тока нагрузки цепи постоянного тока



а)

б)

Рисунок 7. Осциллограмма фазного напряжения в трехфазной цепи (трехфазная нагрузка) (а) и ее разложение на гармонический состав (б)



а) **Рисунок 8.** Осциллограмма фазных токов в трехфазной цепи (трехфазная нагрузка) (а) и ее разложение на гармонический состав (б)

Из рисунков 7 и 8 следует, что фазное напряжение составляет 115 В, а фазный ток 241 А. Частота сети в трехфазной цепи составляет 400 Гц. Амплитудное значение напряжения 154 В, негативно проявляются 2, 3, 5, 7 гармоники. Амплитудное значение

тока составляет 253 А, негативно проявляются 2, 3, 5, 7 гармоники.

Аналогичным образом снимались осциллограммы напряжений и токов на входе и выходе каждого элемента цепи виртуального стенда СЭС (рисунок 1), численные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2. Рабочие параметры виртуального стенда СЭС ЛА

Параметр	Значение
Напряжение цепи постоянного тока, В	27 ± 0,2
Ток в цепи постоянного тока, А	185 ± 3
Амплитуды фазных напряжений (по гармоникам) на участке цепи между ФУЗ и ВУ2, В	Rms: 11,8 В
	1-ая г-ка: 17,4 В
	2-ая г-ка: 4,8 В
	3-ая г-ка: 2 В
	4-ая г-ка: 1,5 В
Амплитуды фазных напряжений (по гармоникам) первичных обмоток БТ, В	Rms: 115 В
	1-ая г-ка: 154 В
	2-ая г-ка: 52 В
	3-ая г-ка: 27 В
	4-ая г-ка: 14 В
Амплитуды фазных напряжений (по гармоникам) в трехфазной цепи (трехфазная нагрузка), В	Rms: 115 В
	1-ая г-ка: 155 В
	2-ая г-ка: 51 В
	3-ая г-ка: 27 В
	4-ая г-ка: 15 В
Амплитуды фазных токов (по гармоникам) в трехфазной цепи (трехфазная нагрузка), А	Rms: 241 А
	1-ая г-ка: 253 А
	2-ая г-ка: 190 А
	3-ая г-ка: 75 А
	4-ая г-ка: 40 А
5-ая г-ка: 25 А	

Параметр	Значение
Выпрямленное напряжение на участке между ВУ 1 и ФУ1, В	260 ± 10 В
Амплитуды линейных напряжений (по гармоникам) МЭГ, В	Rms: 203 В
	1-ая г-ка: 275 В
	2-ая г-ка: 25 В
	3-ая г-ка: 15 В
	4-ая г-ка: 10 В
Амплитуды фазный токов (по гармоникам) МЭГ, А	5-ая г-ка: 12 В
	Rms: 300 А
	1-ая г-ка: 425 А
	2-ая г-ка: 50 А
	3-ая г-ка: 25 А
Электромагнитный момент МЭГ, Нм	4-ая г-ка: 12 А
	5-ая г-ка: 10 А
	120 ± 30 Нм

Таким образом, показана возможность оценки качества электроэнергии на каждом участке цепи виртуального стенда при работе на канал генерирования постоянного тока (27 В) и трехфазной цепи переменного тока (115/200 В). По полученным осциллограммам появляется возможность оценки электромагнитной совместимости, а также корректировки параметров цепи (корректировки индуктивности и емкости) с целью минимизации искажения напряжения на различных участках цепи. Одним из основных параметров, который удается оценить благодаря виртуальному стенду, являются электромаг-

нитные параметры МЭГ, а именно искажение фазного напряжения и тока, а также искажение электромагнитного момента.

2. *Верификация рабочих характеристик виртуального стенда с характеристиками реального стенда СЭС.* Для верификации рабочих характеристик виртуального стенда был взят реальный стенд, имитирующий работу СЭС. Элементная база стенда, имитирующая работу СЭС, полностью повторяет элементную базу виртуального стенда. Внешний вид реального стенда СЭС представлен на рисунке 9.



Рисунок 9. Внешний вид реального стенда СЭС

Электрическая схема соединения реального стенда СЭС полностью повторяет основную схему виртуального стенда, которая представлена на рисунке 1, за исключением блока защиты, пульта управления.

С целью сравнения полученных характеристик на реальном стенде СЭС был реали-

зован описанный ранее режим работы. В данном режиме были сняты осциллограммы напряжения на двух каналах генерирования: цепи постоянного тока (напряжение 27 В) и цепи переменного трехфазного тока (фазное напряжение 115 В), которые представлены на рисунках 10 и 11 соответственно.

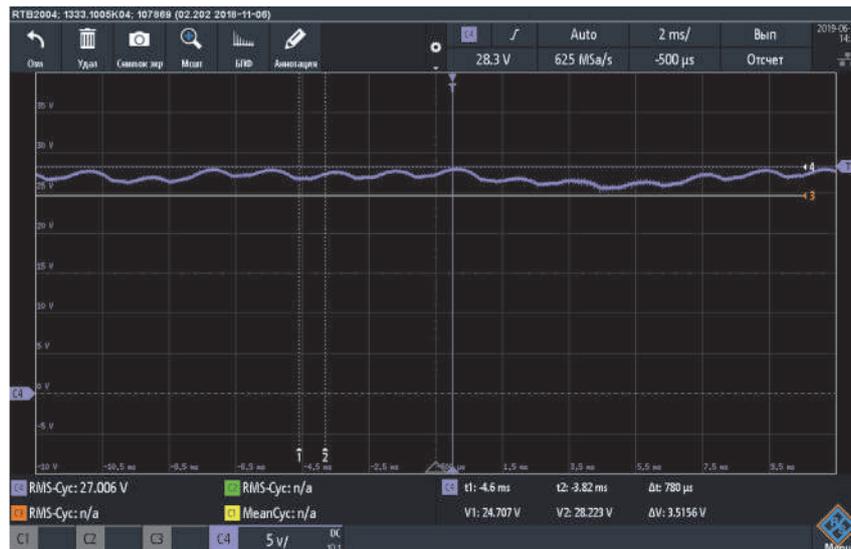


Рисунок 10. Осциллограмма напряжения в цепи постоянного тока



Рисунок 11. Осциллограмма напряжений цепи трехфазного переменного тока

Если сравнивать действующие значения напряжений, полученные на рисунках 10 и 11, с действующими значениями (рисунки 5, 7) напряжения нагрузок виртуального стенда, то расхождение составит не более 5 %, что говорит о корректной работе виртуального стенда.

Вывод

Таким образом, в работе показана возможность реализации СЭС в виртуальном пространстве, которая позволяет отслеживать электромагнитные процессы на каждом элементе цепи. Разработанный виртуальный стенд позволяет моделировать не только совместную работу электромеханических преобразователей в составе СЭС, но и оценивать влияние их магнитных полей друг на друга, оценивать их электромагнитную совместимость.

Проведена оценка качества электроэнергии на каждом участке цепи виртуального стенда при работе на канал генерирования постоянного тока (27 В) и трехфазной цепи переменного тока (115/200 В). По полученным осциллограммам появляется возможность оценки электромагнитной совместимости, а также корректировки параметров цепи (корректировки индуктивности и емкости) с целью минимизации искажения напряжения на различных участках цепи. Одним из основных параметров, который удается оценить благодаря виртуальному стенду, являются электромагнитные параметры МЭГ, а именно искажение фазного напряжения и тока, а также искажение электромагнитного момента.

Кроме того, в работе показана верификация виртуального стенда с реальным стен-

дом, имитирующий работу СЭС. При сравнении полученных результатов было выявлено, что расхождение результатов моделирования и результатов, полученных на реальном стенде СЭС, составляет не более 6 %, что говорит о корректной работе виртуального стенда. После проведения верифика-

ции появляется возможность оптимизации СЭС без проведения сложных стендовых испытаний, ограничившись испытаниями блоков, которые подвергаются оптимизации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-00562.

Список литературы

1. Власов Г.Д. Проектирование систем электроснабжения летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1967. 415 с.
2. Бертинов А.И. Авиационные электрические генераторы. М.: Оборонгиз, 1959. 594 с.
3. Бертинов А.И. Электрические машины авиационной автоматики. М.: Оборонгиз, 1961. 429 с.
4. Брускин Д.Э. Электрооборудование самолетов. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. 336 с.
5. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов: В 2 т. / Под. ред. С.А. Грузкова. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. Т. 2. 552 с.
6. Волокитина Е.В. Исследования по созданию системы генерирования и запуска маршевого двигателя в концепции полностью электрифицированного самолета. Часть 1 // Электроснабжение и электрооборудование. 2011. № 4. С. 29–33.
7. Левин А.В., Халютин С.П., Жмуров Б.В. Тенденции и перспективы развития авиационного электрооборудования // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 213. С. 50–57.
8. Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е. Высокотемпературный стартер-генератор обращенной конструкции с возможностью интеграции на валу высокого давления авиационного двигателя // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. 2016. № 1. С. 465–469.

3. Bertinov A.I. *Elektricheskiye mashiny aviatsionnoy avtomatiki* [Electric Machines of Aviation Automation]. Moscow, Oborongiz, 1961. 429 p. [in Russian].

4. Bruskin D.E. *Elektrooborudovaniye samoletov* [Electrical Equipment of Aircraft]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat, 1956. 336 p. [in Russian].

5. *Elektrooborudovaniye letatel'nykh apparatov: uchebnyk dlya vuzov: V 2 t.* [Electrical Equipment of Aircraft: Textbook for High Schools: In 2 Vol.]. Ed. by S.A. Gruzkov. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI, 2008. Vol. 2. 552 p. [in Russian].

6. Volokitina Ye.V. Issledovaniya po sozdaniyu sistemy generirovaniya i zapuska marshevogo dvigatelya v kontseptsii polnost'yu elektrifitsirovannogo samoleta. Chast' 1 [Research on the Creation of a System for Generating and Starting a Mid-Flight Engine in the Concept of a Fully Electrified Aircraft. Part 1]. *Elektrosnabzheniye i elektrooborudovaniye — Power Supply and Electrical Equipment*, 2011, No. 4, pp. 29–33. [in Russian].

7. Levin A.V., Khalyutin S.P., Zhmurov B.V. Tendentsii i perspektivy razvitiya aviatsionnogo elektrooborudovaniya [Trends and Prospects for the Development of Aviation Electrical Equipment]. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA — Scientific Herald of the MSTU GA*, 2015, No. 213, pp. 50–57. [in Russian].

8. Ismagilov F.R., Vavilov V.Ye. Vysokotemperaturnyy starter-generator obrashchennoy konstruksii s vozmozhnost'yu integratsii na valu vysokogo davleniya aviatsionnogo dvigatelya [High-Temperature Starter-Generator with Re-versed Design with the Possibility of Integration on the High-Pressure Shaft of an Aircraft Engine]. *Innovatsionnyye, informatsionnyye i kommunikatsionnyye tekhnologii — Innovative, Information and Communication Technologies*, 2016, No. 1, pp. 465–469. [in Russian].

References

1. Vlasov G.D. *Proyektirovaniye sistem elektrosnabzheniya letatel'nykh apparatov* [Design of Power Supply Systems for Aircraft]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1967. 415 p. [in Russian].
2. Bertinov A.I. *Aviatsionnyye elektricheskiye generatory* [Aviation Electric Generators]. Moscow, Oborongiz, 1959. 594 p. [in Russian].



Дебиев М. В.
Debiev M. V.

*кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электротехника
и электропривод»,
ФГБОУ ВО «Грозненский государственный
нефтяной технический университет
им. акад. М. Д. Миллионщикова»,
г. Грозный, Российская Федерация*



Ельмурзаев А. А.
Elmurzaev A. A.

*старший преподаватель кафедры
«Теплотехника и гидравлика»,
ФГБОУ ВО «Грозненский государственный
нефтяной технический университет
им. акад. М. Д. Миллионщикова»,
г. Грозный, Российская Федерация*

УДК 621.9

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-16-23

РАЗВИТИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ

В статье представлен обзор современного состояния энергетики в мире и России, которая сосредоточена на развитии возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Проведен анализ тенденций в производстве и потреблении энергоресурсов, а также оценки использования ВИЭ в России. Определены стимулы развития возобновляемых источников энергии с характеристиками, имеющимися в мире. Сделаны выводы о важности развития данной отрасли как в России, так и в Чеченской Республике, как одном из ее регионов. Дана оценка развития ветровой и солнечной энергетики России. Рассмотрена действующая структура электроснабжения Чеченской Республики, где приведены показатели максимальной электрической мощности, потребляемой электроэнергии, а также генерации электроэнергии республики. Проведен анализ возможности использования ресурсов ветровой и солнечной энергии, а также малой гидроэнергетики Чеченской Республики. Рассмотрены варианты освоения и эффективного применения возобновляемых источников энергии с учетом того, что использование энергоресурсов на основе современных инновационных технологий, внедрение новых перспективных альтернативных источников, поиск путей стимулирования использования ВИЭ, где предполагается организация и внедрение тарифной политики, является одной из главных задач развития энергетики, которые дают полное системное представление о масштабах проблемы перевода системы энергетики на инновационные рельсы. Предложены некоторые варианты наиболее целесообразного развития энергосистемы Чеченской Республики, строительства небольших опытных установок, использующих ВИЭ, с целью фактического (экспериментального) подтверждения прогнозных расчетных значений, а также постепенного массового внедрения установок, использующих ВИЭ в частном секторе с созданием необходимых тарифных условий для использования и строительства установок в промышленных масштабах в рамках энергетических частных или государственных компаний. Поставлены первоочередные задачи перспективного развития энергетики республики за счет внедрения возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: электроэнергетика, энергосистема, возобновляемые источники энергии, ветроэнергетика, ветроэлектростанция, солнечная энергетика, малая гидроэнергетика, генерация, природные ресурсы, тариф.

DEVELOPMENT OF RENEWABLE SOURCES ENERGIES OF THE CHECHEN REPUBLIC

The article provides an overview of the current state of energy in the world and in Russia, which focuses on the development of renewable energy sources (RES). An analysis is made of the trend in the production and consumption of energy resources, as well as an assessment of the use of renewable energy in Russia. Incentives for the development of renewable energy sources with the characteristics available in the world are determined. Conclusions are drawn about the importance of developing this industry both in Russia and in the Chechen Republic, as one of its regions. An assessment is given of the development of wind and solar energy in Russia. The current power supply structure of the Chechen Republic is considered, where the indicators of maximum electric power, consumed electric power, and also electric power generation of the republic are given. The analysis of the possibility of using wind and solar energy resources, as well as small hydropower of the Chechen Republic. Options for the development and effective use of renewable energy sources are considered, taking into account the fact that the use of energy resources based on modern innovative technologies, the introduction of new promising alternative sources, and the search for ways to stimulate the use of renewable energy sources, where it is supposed to organize and introduce a tariff policy, is one of the main tasks of energy development which give a complete systemic idea of the scale of the problem of transferring the energy system to innovative rails. Some options are proposed for the most expedient development of the energy system of the Chechen Republic, the construction of small pilot plants using renewable energy sources, with the goal of actual (experimental) confirmation of the predicted calculated values, as well as the gradual mass introduction of plants using renewable energy sources in the private sector with the creation of the necessary tariff conditions for use and construction installations on an industrial scale within the framework of energy private or public companies. Priority tasks have been set for the prospective development of the republic's energy sector by introducing renewable energy sources.

Key words: electric power industry, power system, renewable energy sources, wind power, wind power plant, solar power, small hydropower, generation, natural resources, tariff.

В настоящее время многие страны мира в большей или меньшей степени «обратили свои взоры» на возобновляемую энергетику и имеют определенные программы по её развитию. Некоторые из них добились суще-

ственных результатов в использовании «зеленой» энергии и постепенно переводят свою экономику на альтернативные источники, в частности на ветровую и солнечную энергетику (рисунок 1) [1].



Рисунок 1. Развитие солнечной и ветровой энергии в мире

Больших результатов в этом вопросе достигла Германия. Почти половину генерирующих источников страны составляют ветропарки и солнечные электростанции. Примером широкого внедрения в жизнь немцев альтернативной энергетики является 1 января 2018 г., когда вся страна на несколько часов почти полностью перешла на возобновляемые источники энергии. Иными словами, практически все традиционные электростанции всей Германии в эти часы в соответствии с диспетчерским графиком были остановлены, и электроснабжение всей страны обеспечивалось только ветрогенераторами и солнечными панелями. Наверное, при таком раскладе называть это направление энергетики альтернативной для Германии уже будет некорректно. Конечно, это была временная ситуация, были выходные, основная промышленность страны не работала, но в то же время это уже весомый сигнал и серьезная заявка от «зеленой» энергетики в одной из самых развитых стран мира.

Германия является крупнейшей экономикой Европы, но это не единственная страна, демонстрирующая здоровые показатели возобновляемой энергии [2–4]. К 2025 г. Германия планирует увеличить выработку электроэнергии из возобновляемых источников (солнечной, ветровой, водной) до 147,4 ГВт, что в 1,7 раза больше показателя за 2018 г. Консалтинговая компания GlobalData прогнозирует, что к этому сроку ВИЭ обгонят другие способы генерации и будут доминировать в энергобалансе страны: их доля вырастет с 45 % почти до 60 %. Этим результатам предшествовала длительная законодательная работа.

В начале прошлого года Португалия смогла произвести больше возобновляемой электроэнергии, чем потребовалось всего электричества за весь месяц март, и в стране было несколько почти трехдневных отрезков, когда спрос на электроэнергию удовлетворялся только за счет возобновляемой электроэнергии.

Общая мощность всех ветроустановок в мире на конец 2017 г. составила порядка 530 ГВт, что почти в полтора раза превысила общую мощность зарегистрированных в 32 странах мира 439 ядерных энергетических

реакторов суммарной мощностью 340 ГВт. Так, в 2017 г. в мире было введено в эксплуатацию 52 ГВт от ветроустановок, что было абсолютно беспрецедентным. Все это результат направленной политики государства перехода к чистой энергетике, соответствующей уровню развивающихся современных мировых инновационных технологий [5, 6].

Россия является одной из самых богатых стран природными ресурсами [7]. Но на сегодняшний день структура промышленных секторов в России напрямую связана с топливно-энергетическим комплексом, вектор их развития, который в основном является сырьем, не соответствует критериям, характеризующим энергию развитых стран. Такое развитие, с истощением природных ресурсов, может привести к тому, что энергетический сектор России станет заторможенным [1, 8].

Альтернативная энергетика в России развивается очень медленно; так, в 2014–2016 г. в России были введены в строй объекты возобновляемой энергетики мощностью около 130 МВт, в 2017 году — 140 МВт. В 2018 г. была введена в строй самая мощная солнечная электростанция в России — Сорочинская СЭС «Уран» мощностью 60 МВт. Планируется, что к 2023 г. суммарная мощность солнечных электростанций в России достигнет 1,5 ГВт. Примерно такая же мощность у Белоярской АЭС, самой старой атомной электростанции в РФ. По состоянию на 01.01.2018 этот показатель был меньше почти что втрое — 534 МВт. В Ростовской области активно ведется строительство ветроэнергетической станции (ВЭС). Планируется, что всего будут размещены 78 ветроэнергетических установок (ВЭУ) датской компании Vestas мощностью 3,8 МВт каждая [8–10].

По данным системного оператора Единой энергетической системы РФ, российские ветроэлектростанции в 2018 г. суммарно выработали 217,8 млн кВт·ч электроэнергии — и это на 66 % больше, чем за 2017 г. Для сравнения, прирост по выработке электроэнергии на солнечных электростанциях за этот же период времени составил 34,7 %.

Тем не менее, 217 млн кВт·ч — это просто капля в море, 0,02 % от общего количества электроэнергии, которое произведено в стране за прошлый год. Для сравнения: по

данным отчета Renewables 2018 Global-StatusReport вклад ветровой энергетики в общемировую выработку составляет 5,6 %. Разница более чем в 200 раз.

Энергетика Чеченской Республики

В 2018 г. собственный максимум нагрузки Чеченской энергосистемы составил 486 МВт (рисунок 2), вследствие чего темпы электро-

потребления имеют динамику определенного роста потребления электроэнергии. В Чеченской Республике в результате развития инфраструктуры, а также продолжающихся строительно-восстановительных работ, в сравнении с 2017 г., уровень электропотребления увеличился на 6 % и достиг значения 2862,8 млн кВт·ч (рисунок 3) [10, 11].

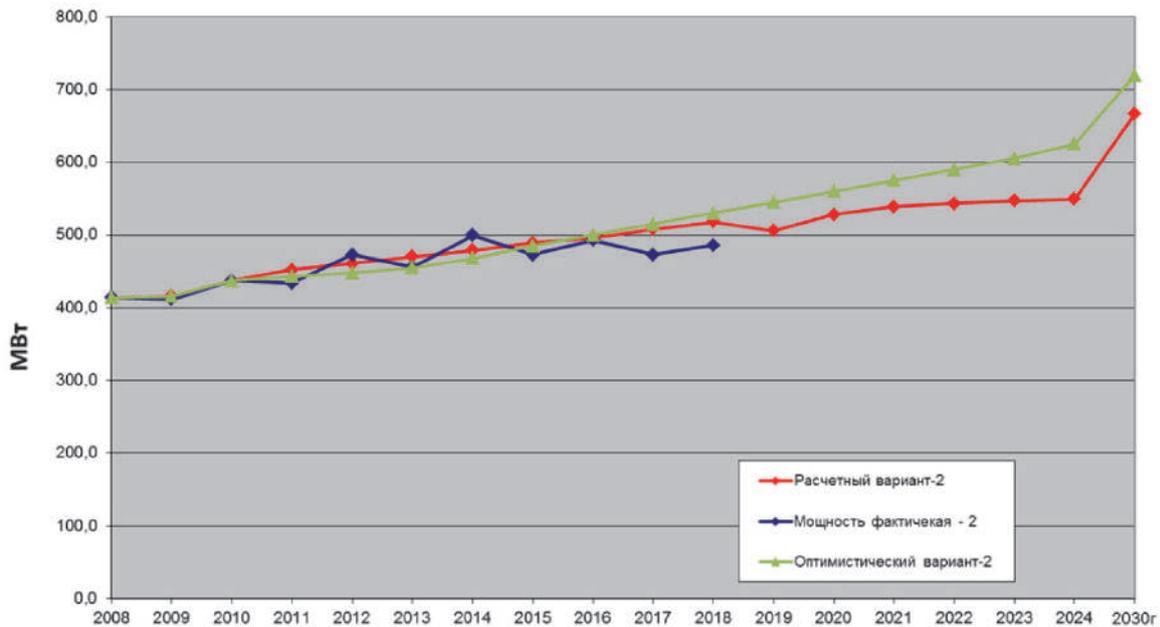


Рисунок 2. Диаграмма максимальной мощности

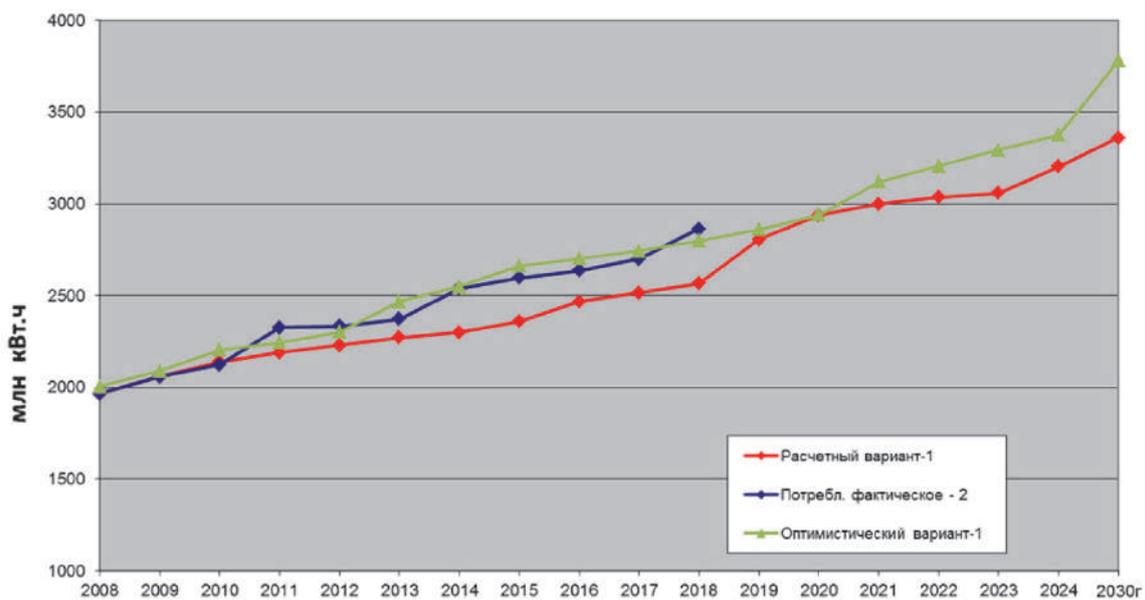


Рисунок 3. Диаграмма электропотребления

Электроснабжение Чеченской Республики осуществляется перетоками мощности по сети 110 кВ от соседних энергосистем и по сети 330 кВ от подстанции «ПС 330 кВ Грозный». Максимум потребления мощности в 2018 г. в Чеченской энергосистеме с

учетом работавшей с выдачей в сеть электроэнергии Грозненской ТЭС покрывался следующим образом (рисунок 4).

Традиционная энергетика в Чеченской Республике представлена двумя блоками ГТУ по 180 МВт (1-очередь) Грозненской



Рисунок 4. Поступление электроэнергии в энергосистему Чеченской Республики

ТЭС. Альтернативная энергетика представлена Кокадойской мини-ГЭС на реке Аргун в Итум-Калинском районе с установленной мощностью 1,3 МВт.

Можно сказать, что электрогенерация в Чеченской Республике сегодня находится на начальном этапе возрождения — введенная в эксплуатацию 1-очередь Грозненской ТЭС при работе даже в базовом режиме позволит обеспечить порядка 60 % от потребной электрической мощности в максимум зимних нагрузок Чеченской Республики. Но действующие блоки газотурбинной установки (ГТУ) по своим техническим характеристикам эффективны в режиме пиковых нагрузок.

Природные ресурсы Чеченской Республики обязывают развивать промышленность по разным направлениям и в первую очередь нефтедобычу, нефтепереработку, строительную индустрию [12–14]. Понятно, что этим трем направлениям жизненно необходима большая энергетика, и необходимость её развития не вызывает сомнений. Но, это одна из сторон реальной экономики.

Опыт развития передовых стран требует развивать и другие секторы — туристический бизнес, сельское хозяйство. Широко развиваются мелкий бизнес и частное предпринимательство, авторемонтные станции, торговые учреждения и т.д.

Согласно программе развития энергетики Чеченской Республики на 2011–2030 гг., в республике планировалось построить ветропарк, состоящий из 24 ВЭУ мощностью 1,5 МВт каждая, с общей установленной мощностью 36 МВт [11]. Стоимость проекта с учетом затрат на оборудование и строительство, проектные работы, исследования

характеристик ветра, выбора площадки, ПИР и т.д., необходимые инвестиции составляют 1,5 млрд руб. Годовая выработка электроэнергии — 72 тыс. кВт·ч. К сожалению, этот проект до настоящего времени не начат.

Учитывая, что Чеченская Республика обладает значительными гидроресурсами и большими возможностями использования солнечной и ветровой энергии, необходимо сегодня определить направление развития энергетики Чеченской Республики на многие годы вперед [15, 16].

Развивать энергетику можно двумя путями.

1) Воссоздание тепловых электростанций с использованием в качестве топлива природного газа или нефтепродуктов. Первым шагом в этом направлении является Грозненская ТЭС, которая в настоящее время работает в режиме ГТУ. Плановый (проектный) объем потребляемого природного газа составляет 127 тыс. м³/ч, или 108 тыс. т.у.т. в год, и экологи могут сказать, сколько вредных веществ выделяется при сжигании такого количества газа. Поэтому этот путь, несмотря на любые экологические мероприятия, ведущие к снижению вредных выбросов в окружающую среду, все равно ранее пройденное «наступление» на экологические грабли.

2) Путь, по которому пытаются идти передовые страны, предполагает взаимодополняющий симбиоз тепловых электростанций в необходимом для специфических целей объеме и широкой «зеленой» энергетике, зеленый свет которой в Чеченской Республике можно дать сегодня и которая в перспективе вплетется в структуру выработки и потребле-

ния электроэнергии республики, и тем самым позволит уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду.

Чеченская Республика имеет уникальную географию, где на небольшой территории находятся высокие южные горы с солнечными альпийскими лугами и продуваемыми ущельями и равнинные степные районы с большим количеством солнечных дней в году и сильными степными ветрами [10, 12, 15, 16]. Этот уникальный «букет» позволяет с уверенностью предположить о возможности и обязанности современников, имеющих возможность влияния на эти процессы, предпринять определенные шаги в направлении развития «зеленой» энергетики.

Учитывая вышеизложенное, развитие альтернативной энергетики в Чеченской Республике, которая в перспективе станет основной, необходимо осуществить в 2 этапа:

1) строительство небольших опытных установок, использующих ВИЭ, с целью фактического (экспериментального) подтверждения прогнозных расчетных значений;

2) постепенное массовое внедрение установок, использующих ВИЭ в частном секторе с созданием необходимых тарифных условий для использования и строительства установок в промышленных масштабах в рамках энергетических частных или государственных компаний [1, 3].

Оба этапа можно начинать реализовывать одновременно.

Для реализации 1-го этапа необходима государственная помощь и привлечение инвестиционных средств.

Для реализации 2-го этапа, в первую очередь, необходима подготовка законодательной базы с учетом возможности тарифного регулирования для обеспечения экономически обоснованных тарифов на «зеленую» электроэнергию хотя бы на республиканском уровне, например, на переходный период или на период реализации программы.

Необходимо обеспечить оптимальный симбиоз между индивидуальными (частными) установками ВИЭ и существующей системой выработки и поставками потребителям электроэнергии.

Конечно, пока себестоимость киловатта энергии, полученного из альтернативных

источников, кратно дороже стоимости киловатта, выработанного на ТЭС или ГЭС, отрасль будет оставаться дотационной. Да и мировые тренды добычи газа и нефти говорят о том, что глобальный отказ от ископаемого топлива еще за горизонтом.

Наверное, и у каждой страны и региона свои специфические причины, побуждающие переводить энергетику на «зеленые» рельсы, они есть и у Чеченской Республики. Поэтому необходимо тщательно изучить опыт передовых в этих вопросах стран и поэтапно начинать работать в этом направлении.

Необходимо изыскать средства и на законодательном уровне рассмотреть возможность организации льгот предприятиям, частникам и предпринимателям, внедряющим и использующим у себя «зеленую» энергетику. Пусть вначале это будет ветрогенератор, например, на чабанских точках или солнечные панели у административных зданий или мини-ГЭС на горных реках.

В дальнейшем можно привлекать инвесторов и попробовать организовать производство и ветровых установок и гелиоустановок.

Вывод

Первоочередными задачами развития энергетики республики являются нижеследующие:

1. Разработка современной программы развития нетрадиционных и возобновляемых источников энергии на территории Чеченской Республики;

2. Организация гидрологического мониторинга на горных реках республики с целью выбора оптимальных мест размещения МГЭС;

3. Организация комплексных метеорологических наблюдений (солнечная радиация, скорость и направление ветра на разных высотах и др.) в различных районах республики с целью выбора оптимальных мест размещения солнечных и ветровых энергоустановок;

4. Выполнение фундаментальных и прикладных НИР в области возобновляемой энергетики;

5. Разработка рекомендаций и инвестиционных предложений для промышленных предприятий и ЖКХ республики.

Список литературы

1. Баринаова В.А., Ланьшина Т.А. Особенности развития возобновляемых источников энергии в России и в мире // Российское предпринимательство. 2016. Т. 17. № 2. С. 259–270.
2. Hohmeyer O., Bohm S. Trends toward 100 % Renewable Electricity Supply in Germany and Europe: a Paradigm Shift in Energy Policies // *Energy and Environment*.
3. Walwyn D.R., Brent A.C. Renewable Energy Gathers Steam in South Africa // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. No. 41: 390. doi:10.1016/j.rser.2014.08.049.
4. Electric Cars and Cheap Solar 'Could Halt Fossil Fuel Growth by 2020 // *The Guardian*. (дата обращения: 20.03.2017).
5. U.S. Renewable Energy Technical Potentials: A GIS-Based Analysis. July 2013. URL: NREL.gov (дата обращения: 20.03.2017).
6. Renewables 2015: Global Status Report, REN21. URL: http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2015/07/GSR2015_Key Findings_lowres.pdf.
7. Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации / Под ред. Н.В. Кобышева, К.Ш. Хайрулина. С-Пб.: Гидрометиздат, 2005. 319 с.
8. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. М.: КНОРУС, 2010. 232 с.
9. Энергетическая стратегия на период до 2030 года. URL: <http://www.minenergo.gov.ru/activity/energostrategy>.
10. Керимов И.А., Минцаев М.Ш., Дебиев М.В. Основные этапы реализации программы развития энергетики Чеченской Республики // *Геоэнергетика* — 2019: матер. IV Всеросс. науч.-техн. конф. / Под ред. М.Ш. Минцаева. 2019. С. 38–56.
11. Керимов И.А., Гайсумов М.Я., Ахматханов Р.С. Программа развития энергетики Чеченской Республики на 2011–2030 гг. // *Наука и образование в Чеченской Республике: состояние и перспективы развития: матер. Всеросс. науч.-практ. конф., посвященной 10-летию со дня основания КНИИ РАН (7 апреля 2011 г., г. Грозный)*. Грозный, 2011. С. 38–63.
12. Дебиев М.В. Анализ эффективности развития региональной энергетической промышленности (на примере Чеченской Республики): дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. Волгоградский гос. техн. ун-т. Волгоград, 2014. 212 с.
13. Дебиев М.В., Попов Г.А. Анализ схем развития энергетических мощностей в регионе на основе сценарного подхода // *Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*, 2012. № 1. С. 35–40.
14. Бурмистров А.А., Виссарионов В.И., Дерюгин Г.В. и др. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии. М.: МЭИ, 2009. 144 с.
15. Керимов И.А., Дебиев М.В., Магомадов Р.А.-М., Хамсуркаев Х.И. Ресурсы солнечной и ветровой энергии Чеченской Республики // *Электронный журнал «Инженерный вестник Дона»*. 2012. № 1. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/nly2012/677>.
16. Керимов И.А., Дебиев М.В., Магомадов Р.А.-М., Хамсуркаев Х.И. Использование гидроаккумулирующих агрегатов в энергосистеме Чеченской Республики // *Электронный журнал «Инженерный вестник Дона»*, 2012. № 1. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/nly2012/673>.

References

1. Barinova V.A., Lan'shina T.A. Oso-bennosti razvitiya vozobnovlyayemykh istochnikov energii v Rossii i v mire [Features of the Development of Renewable Energy Sources in Russia and in the World]. *Rossiyskoye predpri-nimatel'stvo — Russian Entrepreneurship*, 2016, Vol. 17, No. 2, pp. 259–270. [in Russian].
2. Hohmeyer O., Bohm S. Trends toward 100 % Renewable Electricity Supply in Germany and Europe: a Paradigm Shift in Energy Policies. *Energy and Environment*.
3. Walwyn D.R., Brent A.C. Renewable Energy Gathers Steam in South Africa // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, No. 41: 390. doi:10.1016/j.rser.2014.08.049.
4. Electric Cars and Cheap Solar 'Could Halt Fossil Fuel Growth by 2020. *The Guardian*. (accessed 20.03.2017).
5. U.S. Renewable Energy Technical Potentials: A GIS-Based Analysis. July 2013. URL: NREL.gov (accessed 20.03.2017).
6. Renewables 2015: Global Status Report, REN21. URL: <http://www.ren21.net/wpcontent/>

uploads/2015/07/GSR2015_Key Findings_lowres.pdf.

7. *Entsiklopediya klimaticheskikh resursov Rossiyskoy Federatsii* [Encyclopedia of Climatic Resources of the Russian Federation]. Ed. by N.V. Kobyshev, K.Sh. Khayrulin. Saint-Petersburg, Gidrometizdat Publ., 2005. 319 p. [in Russian].

8. Sibikin Yu.D., Sibikin M.Yu. *Netraditsionnyye vozobnovlyayemyye istochniki energii* [Unconventional Renewable Energy Sources]. Moscow, KNORUS, 2010. 232 p. [in Russian].

9. *Energeticheskaya strategiya na period do 2030 goda* [Energy Strategy for the Period until 2030]. URL: <http://www.minenergo.gov.ru/activity/energostategy>. [in Russian].

10. Kerimov I.A., Mintsayev M.Sh., Debiyev M.V. Osnovnyye etapy realizatsii programmy razvitiya energetiki Chechenskoj Respubliki [The Main Stages of the Implementation of the Energy Development Program of the Chechen Republic]. *Materialy IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Geoenergetika — 2019»*. [Materials of the IV All-Russian Scientific and Technical Conference] «Geoenergy — 2019». Ed. by M.Sh. Mintsayev. 2019, pp. 38–56. [in Russian].

11. Kerimov I.A., Gaysumov M.Ya., Akhmatkhanov R.S. Programma razvitiya energetiki Chechenskoj Respubliki na 2011–2030 gg. [Energy Development Program of the Chechen Republic for 2011–2030]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 10-letiyu so dnya osnovaniya KNII RAN «Nauka i obrazovaniye v Chechenskoj Respublike: sostoyaniye i perspektivy razvitiya» (7 aprelya 2011 g., g. Grozny)*. [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 10th Anniversary of the Foundation of the Research Institute of the Russian Academy of Sciences «Science and Education in the Chechen Republic: State and Development Prospects» (April 7, 2011, Grozny). Grozny, 2011, pp. 38–63. [in Russian].

12. Debiyev M.V., Popov G.A. Analiz skhem razvitiya energeticheskikh moshchnostey v regione na osnove stsennarnogo podkhoda [Analysis of the Development Schemes of Energy Capacities in the Region on the Basis of a Scenario Approach]. *Vestnik AGTU. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika — Vestnik ASTU*. Series: Management, Computing and Informatics, 2012, No. 1, pp. 35–40. [in Russian].

13. Burmistrov A.A., Vissarionov V.I., Deryugin G.V. e.a. *Metody rascheta resursov vozobnovlyayemykh istochnikov energii* [Methods for Calculating the Resources of Renewable Energy Sources]. Moscow, MEI, 2009. 144 p. [in Russian].

14. Kerimov I.A., Debiyev M.V., Magomadov R.A-M., Khamsurkayev Kh.I. Resursy solnechnoy i vetrovoy energii Chechenskoj Respubliki [Resources of Solar and Wind Energy of the Chechen Republic]. *Elektronnyy zhurnal «Inzhenernyy vestnik Dona» — Electronic Journal «Engineering Herald of the Don»*, 2012, No. 1. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/677>. [in Russian].

15. Debiyev M.V. *Analiz effektivnosti razvitiya regional'noy energeticheskoy promyshlennosti (na primere Chechenskoj Respubliki): dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.01. Volgogradskiy gos. tekhn. un-t* [Analysis of the Development Efficiency of the Regional Energy Industry (on the Example of the Chechen Republic): dis. Cand. Engin. Sciences: 05.13.01. Volgograd State Technical University, Volgograd]. Volgograd, 2014. 212 p. [in Russian].

16. Kerimov I.A., Debiyev M.V., Magomadov R.A-M., Khamsurkayev Kh.I. Ispol'zovaniye gidroakkumuliruyushchikh agregatov v energosisteme Chechenskoj Respubliki [The Use of Pumped Storage Units in the Energy System of the Chechen Republic]. *Elektronnyy zhurnal «Inzhenernyy vestnik Dona» — Electronic Journal «Engineering Herald of the Don»*, 2012, No. 1. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/673>. [in Russian].



Иванова О. В.
Ivanova O. V.

кандидат технических наук,
доцент, доцент кафедры
«Управление и сервис
в технических системах»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация



Халиков Р. М.
Khalikov R. M.

кандидат химических наук,
доцент, доцент кафедры
«Прикладные
и естественнонаучные
дисциплины»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация



Короткова Л. Н.
Korotkova L. N.

кандидат химических
наук, доцент, доцент
кафедры «Охрана
окружающей среды и
рациональное использование
природных ресурсов»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация

УДК 665.62: 621.31

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-24-29

РАЦИОНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА СЖИЖЕННОГО ГАЗА

Растущее потребление сжиженного газа вызывает необходимость поиска новых трендов в технологии конструирования и управлении качеством функционирования, в частности, малотоннажных аппаратов. При разработке труднодоступных месторождений возведение газового трубопровода становится экономически невыгодным, а альтернативный подход транспорта сжиженного природного газа (СПГ) оказывается более предпочтительным и позволяет на локальном уровне обеспечивать энергоресурсами удаленные населенные пункты; кроме того, перспективным направлением развития отрасли является применение СПГ в качестве экологичного моторного топлива.

Процесс сжижения природного газа в зависимости от технологий и объемов потребляет 15–30 % затрачиваемой энергии. В технологической схеме природный газ сжимают в компрессорных аппаратах в 5–12 раз, затем охлаждают в теплообменнике до определенной температуры, а после разделения СПГ в сепараторе газообразные фракции повторно направляют на циклическое сжатие–охлаждение. Одной из важнейших частей технологической установки сжижения газа являются электронасосы, обеспечивающие циркуляцию хладагентов, приводы компрессоров и теплообменников. Основным элементом управления функционирования турбокомпрессоров для сжатия газообразных углеводородов под давлением свыше 0,4 МПа производства СПГ является микропроцессор, который обрабатывает сообщения от чувствительных электротехнических датчиков и своевременно формирует управляющий сигнал. Компрессорные агрегаты с электрическим приводом широко используются в производстве СПГ, а важнейшим показателем термодинамического достоинства цикла сжижения природного газа является величина удельного энергопотребления. Электрический привод позволяет регулировать мощность компрессоров и насосов в технологической схеме СПГ вне зависимости от колебаний температур в течение года. В ходе технологического функционирования компрессорных установок производства СПГ постоянно анализируются показания электротехнических датчиков. Рациональное управление

электродвигателями с переменной частотой вращения с общей мощностью 50–60 МВт позволяет уменьшить энергопотребление на 27–28 %.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, компрессорный агрегат, высокочастотный электродвигатель, управление качеством, энергосбережение.

RATIONAL MANAGEMENT OF QUALITY OF FUNCTIONING OF ELECTRICAL TECHNICAL EQUIPMENT OF TECHNOLOGICAL SCHEME FOR PRODUCING LIQUEFIED GAS

The growing consumption of liquefied gas makes it necessary to search for new trends in the design technology and quality management of operation, in particular, low-tonnage devices. When developing hard-to-reach fields, the construction of a gas pipeline becomes economically unprofitable, and the alternative approach of transportation of liquefied natural gas (LNG) is more preferable and allows to provide energy resources to remote localities at the local level; in addition, the use of LNG as an eco-friendly motor fuel is a promising direction for the development of the industry.

The process of liquefying natural gas, depending on the technology and volume, consumes 15–30 % of the energy consumed. In the technological scheme, natural gas is compressed in compressor units 5–12 times, then cooled in a heat exchanger to a certain temperature, and after separating the LNG in the separator, the gaseous fractions are re-directed to cyclic compression-cooling. One of the most important parts of the gas liquefaction process plant is the electric pumps that provide circulation of refrigerants, drives of compressors and heat exchangers. The main control element for the operation of turbochargers for compressing gaseous hydrocarbons under a pressure of more than 0.4 MPa produced by LNG is a microprocessor that processes messages from sensitive electrical sensors and generates a control signal in a timely manner. Compressor units with electric drive are widely used in the production of LNG, and the most important indicator of the thermodynamic advantage of the natural gas liquefaction cycle is the value of specific energy consumption. The electric drive allows you to control the power of compressors and pumps in the LNG process scheme, regardless of temperature fluctuations throughout the year. During the technological operation of LNG compressor units, the readings of electrical sensors are constantly analyzed. Rational control of variable speed motors with a total power of 50–60 MW can reduce energy consumption by 27–28 %.

Key words: liquefied natural gas, compressor aggregate, high frequency electric motor, quality management, energy saving.

Природный газ в ближайшие десятилетия останется важным топливным ресурсом в обеспечении глобальных энергетических потребностей человечества. На сегодняшний день большая часть природного газа (содержание метана от 70 % до 98 %) доставляется потребителям в газообразной форме по магистральным трубопроводам. В то же время для труднодоступных удаленных газовых месторождений в ряде случаев транспорт сжиженного природного газа (СПГ) оказывается предпочтительнее: особенно в условиях Арктического Севера. Транспортировка СПГ танкерами при температуре от минус 150 °С до минус 162 °С в сжиженном состоянии (в изотермических емкостях) безопаснее, чем сжатый газ трубопроводным транспортом.

Мировой рынок СПГ в последние годы демонстрирует ускоренное развитие в качестве углеводородного источника для получения тепловой энергии, моторного топлива для различных видов транспортных средств, а также сырья для нефтехимической промышленности [1].

Данная статья нацелена на рациональные подходы управления качеством функционирования электротехнических компрессоров технологии производства сжиженного газа.

Технология сжижения природного газа предполагает охлаждение газообразных углеводородов до температуры минус 162 °С, когда метан (основной компонент) переходит в жидкое состояние. После сжижения объем природного газа уменьшается в 600 раз, что

позволяет транспортировать СПГ на большие расстояния. Природный газ сжимают в компрессорных аппаратах в 5–12 раз, затем охлаждают в теплообменнике до определенной температуры, а после разделения СПГ в сепараторе газообразные фракции повторно направляют на циклическое сжатие–охлаждение (рисунок 1).

Газовый поток после сжатия компрессором охлаждается резким дросселированием, но один цикл сжижения позволяет получить всего СПГ 4–5 %. Объем производства СПГ в основном определяется: кинетикой сжижения метана в технологическом цикле; используемым хладагентом; мощностью компрессорных агрегатов, а также доступными размерами теплообменников, в которых охлаждается природный газ. Одной из важнейших частей технологической установки сжижения газа являются электронасосы, обеспечивающие циркуляцию хладагентов, приводы компрессоров и теплообменников.

Компрессорные агрегаты в технологии сжижения природного газа используют для сжатия газообразных углеводородов под давлением свыше 0,4 МПа [2]. Эффективность охлаждения газа до 14 % повышается при использовании компрессорно-детандерной схемы за счет совершения работы на лопатках турбины. Каскадный цикл с последовательным использованием в качестве хладагентов пропана, этилена и метана путем последовательного снижения их температуры кипения также является рациональным подходом управления качеством безопасного производства, изотермического хранения СПГ [3].

Различные технологии производства СПГ отличаются в схемах предварительного охлаждения и в приводах (газотурбинный

или электрический) для компрессорных агрегатов. Электрический привод позволяет регулировать непрерывно мощность компрессоров и насосов технологической схемы СПГ [4] вне зависимости от колебаний температур в течение года. Этот рациональный тренд позволяет не подбирать индивидуально для каждого компрессора свой хладагент, т.е. обеспечивает технологическую гибкость.

На начальном этапе очищенный от механических примесей, паров воды, азота, углекислого газа и др. природный газ охлаждается за счет воздушного либо водяного остужения до температуры порядка 10 °С. В технологической схеме СПГ регулирование функционирования турбокомпрессора осуществляется дросселированием, что уменьшает диапазон регуляции давления. Дросселирование газа — расширение газа при прохождении через дроссель (вентиль, диафрагма, клапан, кран и т.д.) — сопровождается падением температуры, т.е. постепенным охлаждением. Поэтому необходимым является подъем результативности функционирования компрессорного агрегата частотным регулированием электропривода. Одновременно разрабатываются более совершенные электроприводы, например, в работе [5] предложен асинхронно-синхронный бесконтактный каскадный двигатель, способный вырабатывать реактивную мощность.

В производстве СПГ используются следующие технологии: классические каскадные, с применением смешанных хладагентов, с употреблением детандера. Более половины мирового производства СПГ основано на технологии СЗМР (APCI): предварительное охлаждение пропаном и дроссельным циклом на смешанном хладагенте (рисунок 2).

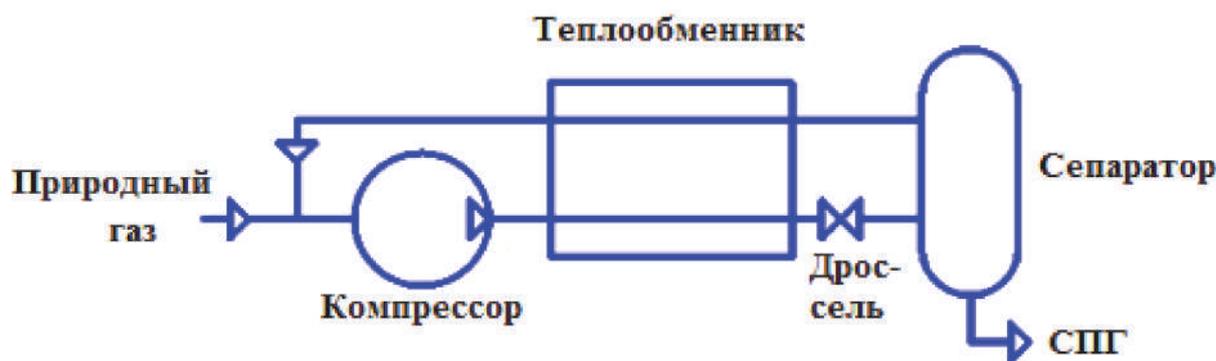


Рисунок 1. Технологическая схема сжижения природного газа

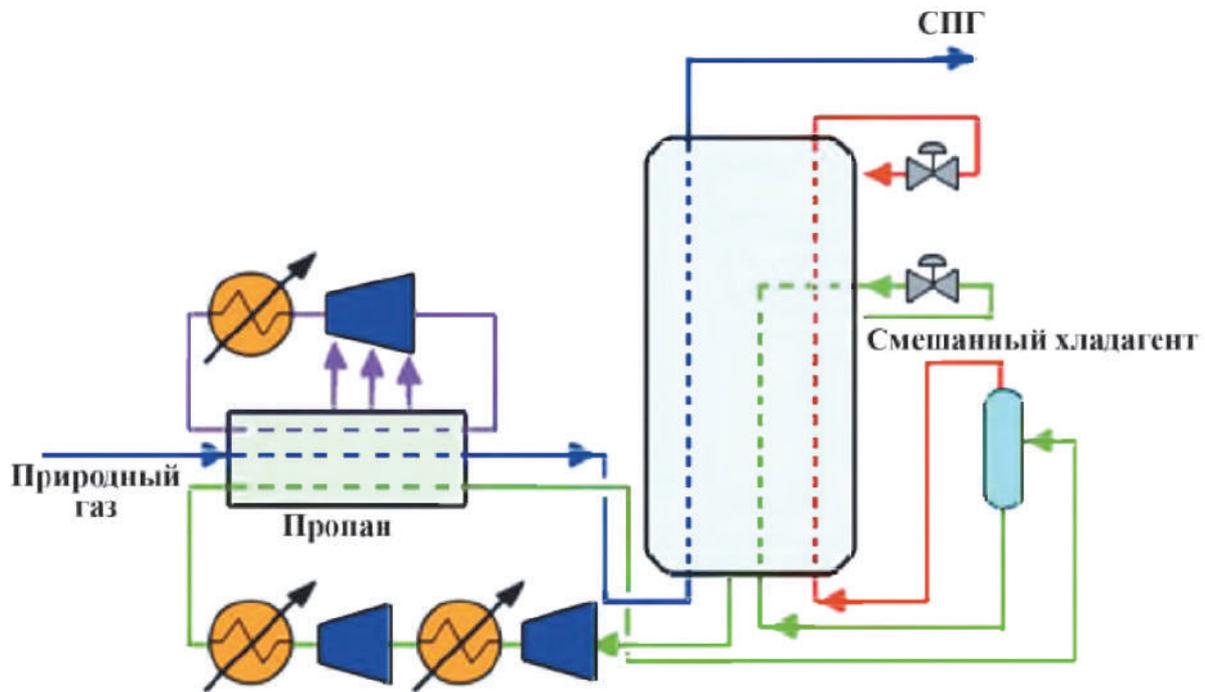


Рисунок 2. Схема технологии СЗМР получения СПГ

Традиционная автоматизация турбокомпрессорной установки СПГ с частотным регулированием двигателя предполагает наличие электротехнических датчиков давления при входе и на выходе газового потока и др., а также частоты вращения электродвигателя. Фактическое давление природного газа измеряется датчиком давления на выходе компрессора, сигнал (оповещение) которого поступает на модуль управления. В ходе технологической работы компрессорной установки производства СПГ постоянно снимаются и анализируются показания электротехнических датчиков температуры двигателя и т.д.

В статье [6] рассмотрены дожимные инновационные компрессоры топливного газа, не требующие смазки и герметичности; переход от компрессорного агрегата к полностью «сухому» без смазки (газодинамическому уплотнению) позволяет исключить мультипликатор, муфту «мультипликатор – электродвигатель» и т.п., а потребляемая мощность компрессора в «сухом» исполнении — 740 кВт, а с масляной смазкой — 870 кВт.

Основным элементом управления функционирования турбокомпрессоров производства СПГ является микропроцессор, который обрабатывает сообщения от чувствительных датчиков и своевременно формирует управляющий сигнал. При минимальной или кри-

тической производительности технологии СПГ наступает помпаж: давление нагнетания газового потока резко снижается, а движение газа изменяется на обратное направление. В случае возникновения сигнала рассогласования антипомпажного регулирования модуль управления технологической схемы СПГ формирует оповещение на изменение частоты вращения приводного электродвигателя турбокомпрессора.

Употребляемые в индустрии СПГ электротехнические датчики основаны на принципе дросселирования газа на входе компрессора, а среди имеющихся решений выделяется система управления на базе контроллера ControlLogix5555. Подсистема защит и технологического управления компрессорным оборудованием сжижения газа состоит из основного контроллера и сигнализатора помпажа.

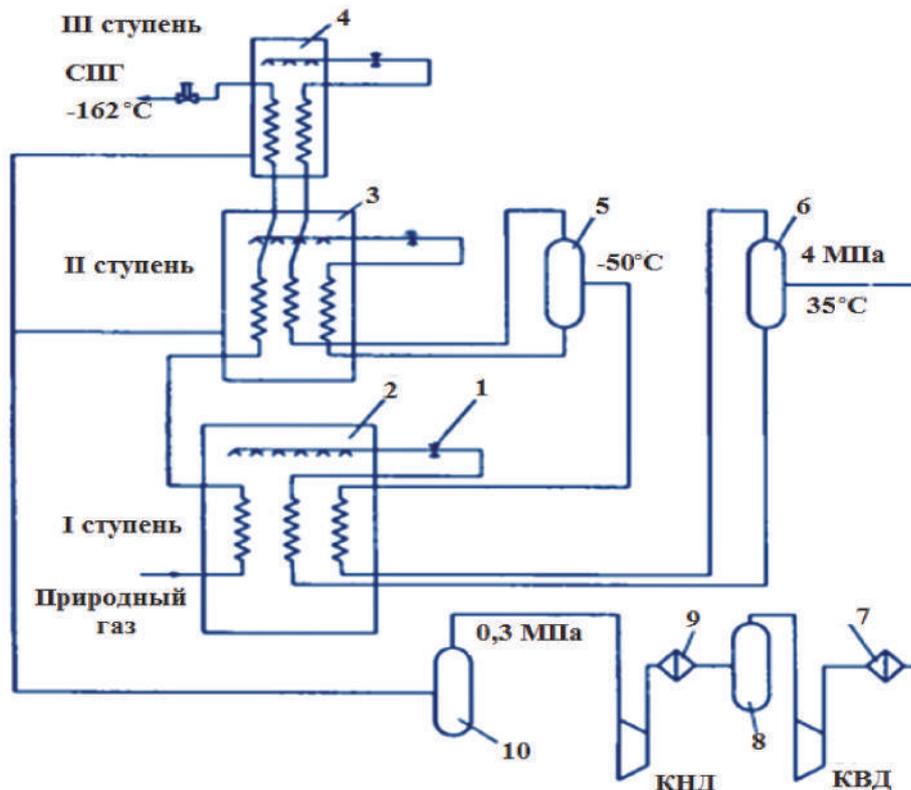
Основной контроллер технологического производства СПГ предназначен для выполнения следующих важнейших функций:

- автоматической подготовки к запуску (выполнение предпусковых операций и др.) электродвигателя;
- корректной сигнализации и запрещению непосредственного включения при нарушении параметров функционирования компрессорной установки;

— предохранения технологического оборудования производства от опасных перегрузок и т.п.

Следует отметить, что технологией последовательного охлаждения, последующей сепарации и двухступенчатого дросселирования газового потока энергопотребление можно уменьшить до 0,45–5,00 кВт·ч/кг СПГ,

а также может быть достигнуто значительное снижение объемных габаритов теплообмена. Технологический цикл производства СПГ на смешанном хладагенте предполагает циркуляцию многокомпонентной газовой системы, которая состоит из CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} и N_2 в замкнутом трехступенчатом контуре (рисунок 3).



1 — дроссель; 2, 3, 4 — теплообменники; 5, 6, 8, 10 — сепараторы; 7, 9 — водяные теплообменники; КНД — компрессор низкого давления; КВД — компрессор высокого давления

Рисунок 3. Схема однопоточного сжижения природного газа на смешанном хладагенте

Малотоннажное производство СПГ [7] является эффективным альтернативным моторным экологичным топливом для автомобильного, железнодорожного, судоходного и авиационного транспорта. Расчетные показатели работы малотоннажных производств СПГ России показывают, что удельные энергозатраты СПГ варьируются в зависимости от использования технологической схемы от 10 кВт·ч/т (цикл с вихревой трубой) до 870 кВт·ч/т (дроссельный цикл высокого давления).

Целесообразное управление качеством функционирования в технологии СПГ включает и соответствующую деятельность вспомогательной инфраструктуры, в частности

водоснабжения. В работе [8] показано, что использование регулируемого электропривода насосов позволяет сэкономить электроэнергию от 38 % до 45 %, а основная функция, выполняемая автоматизированной системой управления фильтрами — управление работой электротехнического оборудования в фильтрующем блоке в соответствии с технологией водоподготовки.

Вывод

Рациональное управление электроприводами позволяет регулировать мощность компрессоров и насосов в технологической схеме производства СПГ, а также уменьшить величину удельного энергопотребления на 27–28 %.

Список литературы

1. Федорова Е.Б. Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии и оборудование. М.: РГУНГ, 2011. 159 с.
2. Люгай Д.В., Мутовин Ю.Г., Одишария Г.Э. Разработка и реализация масштабных проектов СПГ // Вести газовой науки. 2017. № 1. С. 211–217.
3. Иванцова С.Г., Рахманин А.И. Идентификация опасностей при оценке риска изотермического хранения сжиженных газов // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2012. № 4. С. 36–40.
4. Галеркин Ю.Б., Козаченко Л.И. Турбокомпрессоры. СПб.: Изд-во Политехн. унив., 2008. 374 с.
5. Шапиро С.В., Гумерова М.Б., Бабикова Н.Л. и др. Каскадный асинхронно-синхронный бесконтактный двигатель // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2018. Т. 14. № 3. С. 28–36.
6. Хисамеев И.Г., Гузельбаев Я.З., Архипов А.И. и др. Особенности компоновки безмасляного компрессорного агрегата // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 16. С. 250–256.
7. Кондратенко А.Д., Карпов А.Б., Козлов А.М. и др. Российские малотоннажные производства по сжижению природного газа // Нефтегазохимия. 2016. № 4. С. 31–36.
8. Иванова О.В., Халиков Р.М., Короткова Л.Н. Результативное управление электротехническим оборудованием технологической схемы производства качественной воды // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2018. Т. 14. № 2. С. 21–27.

References

1. Fedorova E.B. *Sovremennoye sostoyaniye i razvitiye mirovoy industrii szhizhennogo prirodnogo gaza: tekhnologii i oborudovaniye* [Current State and Development of the Global Liquefied Natural Gas Industry: Technologies and Equipment]. Moscow: RSUPG, 2011. 159 p. [in Russian].
2. Lugay D.V., Mutovin Yu.G., Odisharia G.E. *Razrabotka i realizatsiya masshtabnykh proyektov SPG* [Development and Imple-

mentation of Large-Scale LNG Projects]. *Vesti gazovoy nauki — Vesti gazovoy nauki*, 2017, No. 1, pp. 211–217. [in Russian].

3. Ivantsova S.G., Rakhmanin A.I. *Identifikatsiya opasnostey pri otsenke riska izotermicheskogo khraneniya szhizhennykh gazov* [Hazard Identification in Assessing the Risk of Isothermal Storage of Liquefied Gases]. *Upravleniye kachestvom v neftegazovom komplekse — Quality Management in the Petroleum and Gas Complex*, 2012, No. 4, pp. 36–40. [in Russian].

4. Galerkin Yu.B., Kozachenko L.I. *Turbo-kompressory* [Turbochargers]. Saint-Petersburg, Publ. Polytechnic. Univ., 2008. 374 p. [in Russian].

5. Shapiro S.V., Gumerova M.B., Babikova N.L. e.a. *Kaskadnyy asinkhronno-sinkhronnyy beskontaktnyy dvigatel'* [Cascading Asynchronous-Synchronous Non-Contact Motors]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Facilities and Systems*, 2018, Vol. 14, No. 3, pp. 28–36. [in Russian].

6. Khisameev I.G., Guzelbaev Y.Z., Arkhipov A.I. e.a. *Osobennosti komponovki bezmaslyanogo kompressornogo agregata* [Features of the Layout of the Oil-Free Compressor Unit]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta — Bulletin of Kazan Technological University*, 2011, No. 16, pp. 250–256. [in Russian].

7. Kondratenko A.D., Karpov A.B., Kozlov A.M. et al. *Rossiyskiye malotonnazhnyye proizvodstva po szhizheniyu prirodnogo gaza* [Russian Small-Tonnage Production for the Liquefaction of Natural Gas]. *Neftegazokhimiya — Petroleum and Gas Chemistry*, 2016, No. 4, pp. 31–36. [in Russian].

8. Ivanova O.V., Khalikov R.M., Korotkova L.N. *Rezultativnoye upravleniye elektrotekhnicheskim oborudovaniyem tekhnologicheskoy skhemy proizvodstva kachestvennoy vody* [The Efficient Management of Electrotechnical Equipment for the Qualitative Water Production Technological Scheme] *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Facilities and Systems*, 2018, Vol. 14, No. 2, pp. 21–27. [in Russian].



Соловьев А. В.
Soloviev A. V.

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



Кретюк Д. А.
Kretuk D. A.

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

УДК 621.311.44

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-30-39

К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБУЕМОЙ СТЕПЕНИ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ОБЪЕКТА

В условиях современного уровня технического развития вводятся в эксплуатацию всё более и более сложные изделия (объекты, предприятия), выполняющие достаточно сложные задачи. Процессы функционирования достаточно сложные и дорогостоящие, в результате простой (отключение) такого объекта может повлечь за собой серьёзные последствия, характеризующиеся значительным экономическим ущербом, экологической катастрофой, причинением вреда жизни и здоровью, срывом выполнения боевой задачи и т.п.

Для обеспечения требуемого уровня надёжности объекта необходимо учитывать показатели надёжности каждой из систем объекта, а также степень их значимости в процессе его функционирования.

Таким образом, обеспечение надёжности их функционирования является основной задачей эксплуатации. Для снижения вероятности возникновения отказов таких объектов к ним предъявляются общие и специфические требования, определяемые техническим заданием (ТЗ). В статье рассматриваются такие частные показатели, как коэффициент готовности и время восстановления, так как они являются нормативными показателями, характеризующими надёжность объекта в целом.

При формировании заказчиком требований к надёжности, живучести, безопасности и т.д. для создаваемого объекта зачастую требования технического задания прописываются к изделию, при этом под изделием следует понимать составную часть объекта, которая является технологической системой, оказывающей прямое влияние на выходной эффект.

Под выходным эффектом в нашем случае следует понимать минимальный объём произведённой продукции или вероятность выполнения решаемых задач в течение заданного промежутка времени*.

Существуют изделия самодостаточные (автономные) и не самодостаточные. Для вторых характерно наличие неких внешних устройств или систем, которые обеспечивают их функционирование. Такие системы функционально и конструктивно объединены с изделием и

* Определение дано исходя из анализа определений, представленных в ГОСТ 56526 «Требования надёжности и безопасности космических систем», Большой энциклопедии нефти и газа и определений, представленных в теории надёжности.

являются обеспечивающими техническими системами (далее ОТС). Таким образом в статье, под объектом следует понимать некую техническую структуру, состоящую из изделия, обеспечивающих технических систем и коммуникаций между ними.

В работе определено противоречие, которое заключается в том, что при условии наличия объекта, объединяющего изделие и ОТС, техническим заданием к изделию предъявляются требования, выраженные количественными показателями надёжности, а к обеспечивающим системам – качественными.

Для разрешения этого противоречия в статье предлагается подход к обоснованию требуемой степени резервирования технических систем, обеспечивающих функционирование объекта с целью определения степени одиночного и группового влияния ОТС на функционирование изделия в частном и выходной эффект в целом.

Подход заключается в выполнении действий в следующей последовательности:

- определение унифицированной структуры объекта как совокупности изделия, ОТС и связей (коммуникаций) между ними;
- проверка выполнения условий, определяющих степень влияния (достаточности резервирования) ОТС на показатели надёжности, заданные ТЗ;
- в случае не выполнения выше обозначенных условий применение мероприятий, изменяющих параметры ОТС для ограничения степени влияния последних на надёжность работы изделия.

Таким образом, в статье предлагается поочерёдно оценить степень влияния одной ОТС, затем — двух, далее — трёх и так до определения степени влияния n (всех) ОТС на функционирование изделия и по необходимости применить мероприятия, снижающие влияние ОТС на изделие. Условия описаны математическими выражениями и представлены в работе.

Ключевые слова: техническое задание, время восстановления изделия, коэффициент готовности, обеспечивающие технические системы, резервирование агрегатов.

TO THE ISSUE OF JUSTIFICATION OF THE REQUIRED DEGREE OF REDUNDANCY OF TECHNICAL SYSTEMS ENSURING OBJECT OPERATION

In the conditions of the modern level of technical development, more and more complex products (objects, enterprises) are put into operation, performing quite complex tasks. The processes of functioning are quite complex and expensive, as a consequence of simple (shutdown) of such an object can lead to serious consequences, characterized by significant economic damage, environmental disaster, harm to life and health, failure of the combat mission, etc.

To ensure the required level of reliability of the object it is necessary to consider the reliability of each system object, and the degree of their importance in the process of its functioning.

Thus, ensuring the reliability of their operation is the main task of operation. To reduce the probability of failure of such objects, they are subject to general and specific requirements determined by the terms of reference (TOR). The article deals with such particular indicators as the readiness factor, time between failures and recovery time, as they are normative indicators characterizing the reliability of the object as a whole.

When the customer forms requirements for reliability, survivability, safety, etc. for the created object, the requirements of the technical specification are often prescribed for the product, while the product should be understood as an integral part of the object, which is a technological system that has a direct impact on the output effect.

The output effect in our case should be understood as the minimum volume of production or the probability of performing the tasks within a given period of time*.

There are products self-sufficient (autonomous) and not self-sufficient. The second is characterized by the presence of certain external devices or systems that ensure their functioning. Such systems are functionally and structurally integrated with the product and are providing technical sys-

* The definition is given on the basis of the analysis of the definitions presented in State Standard 56526 «Reliability and Safety Requirements for Space Systems», the Big Encyclopedia of Oil and Gas and the definitions presented in the theory of reliability.

tems (hereinafter PTS). Thus, in the article, the object should be understood as a kind of technical structure consisting of products that provide technical systems and communications between them.

The paper defines the contradiction, which lies in the fact that, subject to the presence of an object that combines the product and the PTS, the technical specification for the product requirements expressed by quantitative indicators of reliability, and to the providing systems — qualitative.

To resolve this contradiction, the article proposes an approach to substantiate the required degree of redundancy of technical systems that ensure the operation of the object in order to determine the degree of single and group influence of PTS on the functioning of the product in particular and the output effect as a whole.

The approach is to perform actions in the following sequence:

- definition of the unified structure of the object as a set of products, PTS and links (communications) between them;

- verification of compliance with the conditions determining the degree of influence (redundancy sufficiency) of the PTS on the reliability indicators specified by the TOR;

- in case of failure to comply with the above conditions, the use of measures that change the parameters of the PTS to limit the degree of influence of the latter on the reliability of the product.

Thus, the article proposes to alternately assess the degree of influence of one PTS, then-two, then-three, and so on to determine the degree of influence of n (all) PTS on the functioning of the product and, if necessary, apply measures to reduce the impact of OTS on the product. The conditions are described by mathematical expressions and presented in the paper.

Key words: terms of reference, product recovery time, availability factor, providing technical systems, backup units.

Введение

В условиях современного уровня научно-технического развития вводятся в эксплуатацию объекты (изделия, предприятия), выполняющие сложные и важные в масштабах государства задачи. Обеспечение надёжности их функционирования является основной задачей, так как отказ одной из систем, входящих в состав изделия, может повлечь за собой серьёзные последствия, характеризующиеся значительным экономическим ущербом, экологической катастрофой, причинением вреда жизни и здоровья и т.п. Оценку обеспечения надёжности производят на основании анализа таких частных показателей, как время восстановления $T_{вс}$, продолжительность функционирования специального объекта при отказе i -ой обеспечивающей системы $t_{np i}$ и коэффициента готовности K_g .

При составлении технического задания (ТЗ) требования к обеспечивающим техническим системам (ОТС) выражены в виде качественных показателей, например, ТЗ определена категория помещения, категория надёжности электроснабжения изделия, наличие систем газового пожаротушения, обеспечение изделия водой от артезианской скважины и т.п. Предполагается, что воздействие ОТС на изделие будет достаточным и полезным, и это событие является достоверным. В этом

случае не учитывается возможное (вероятное) отрицательное воздействие ОТС на выходной эффект. Отрицательное воздействие может заключаться в том, что обеспечивающая система является технической, т.е. не обладает абсолютной надёжностью, следовательно, может с некоторой долей вероятности отказать. Время функционирования изделия без ОТС в этом случае уменьшится и вероятность достижения полезного эффекта будет снижена, а так как эта вероятность задана ТЗ, то выполнение его требований станет невозможным.

Например, требования к некоторому изделию, предназначенному для производства (выходной эффект), определены конкретными минимальными значениями таких показателей надёжности, как вероятность безотказной работы и коэффициент готовности. И в то же время в ТЗ ссылаются на требования нормативных документов к системе электроснабжения (система, обеспечивающая функционирование рассматриваемого изделия) [1], в итоге требования к надёжности определяются качественно. А именно, определены категории электроприёмников по надёжности электроснабжения (в рассматриваемом случае приёмник равнозначен изделию). Согласно [1], требования ограничиваются количеством источников энергии и

способом их подключения к потребителю (через устройство автоматического ввода резерва или иным образом).

Исходя из вышеизложенного и научных исследований, выдержки из которых представлены в [2], требования технического задания к изделию не учитывают влияние обеспечивающих технических систем на выходной эффект, т.е. появляется противоречие.

В итоге противоречие заключается в том, что при условии наличия объекта, объединяющего изделие и ОТС, техническим заданием к изделию предъявляются требования, выраженные количественными показателями надёжности, а к обеспечивающим системам — качественными.

Для разрешения этого противоречия в статье предлагается подход к обоснованию требуемой степени резервирования ОТС с целью определения степени одиночного и группового влияния ОТС на надёжность функционирования изделия в частном и выходной эффект в целом, т.е. необходимо проверить соблюдение объектом требования ТЗ к изделию.

Определение структуры объекта

С целью обеспечения живучести и надёжности современные объекты специального

назначения выполняются со своими ОТС, обеспечивающими работу технологического оборудования изделия, такими как:

1. Система электроснабжения высокого напряжения (РУ-10 кВ);
2. Система гарантированного и автономного электропитания (СГАП);
3. Система электроснабжения низкого напряжения (РУ-0,4 кВ);
4. Система постоянного тока;
5. Система специальных токов (ССТ);
6. Электрическое освещение, отопление и собственные нужды;
7. Система водоснабжения (включая водоотведение);
8. Система вентиляции и кондиционирования воздуха (СВКВ);
9. Система пожаротушения (СПТ).

Все эти системы взаимосвязаны между собой и имеют свою степень значимости в процессе функционирования изделия. Для определения степени значимости каждой системы в процессе эксплуатации определим их взаимосвязи между собой и изделия в целом.

Структурно взаимосвязь между ОТС и изделием представлена на рисунке 1.

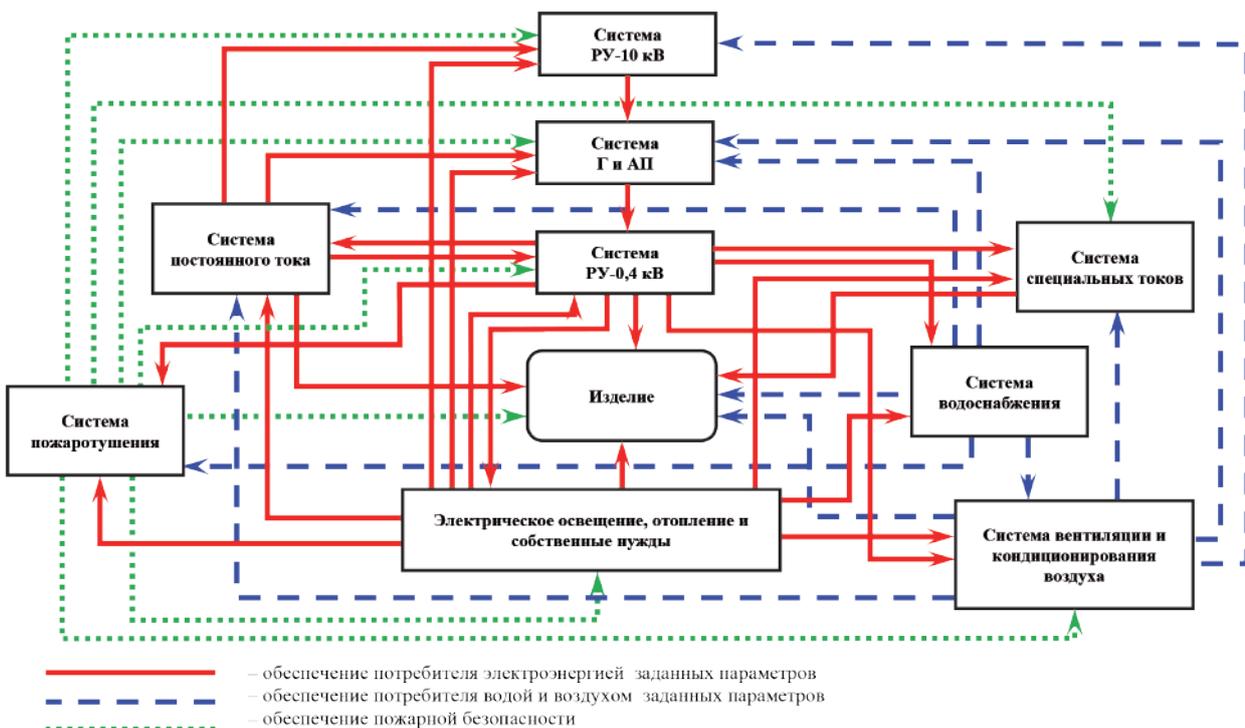


Рисунок 1. Вариант структуры объекта

Для оптимизации структурных связей между ОТС, учитывая их значимость в процессе функционирования изделия, объединим системы РУ-10 кВ, СГАП и РУ-0,4 кВ в одну систему РУ-10/0,4 кВ, а систему постоянного тока не будем рассматривать, так как цепи распределительных устройств управления и защиты, потребители узла связи обеспечиваются электроэнергией от бесперебойных источников питания, светильники аварийного (эвакуационного) освещения

обеспечиваются встроенной аккумуляторной батареей.

Методика обоснования требований к значениям показателей надежности систем электроснабжения реализована в диссертационных исследованиях в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского и представлена в [2].

Таким образом, взаимосвязь между специальными техническими системами будет иметь вид, как на рисунке 2.

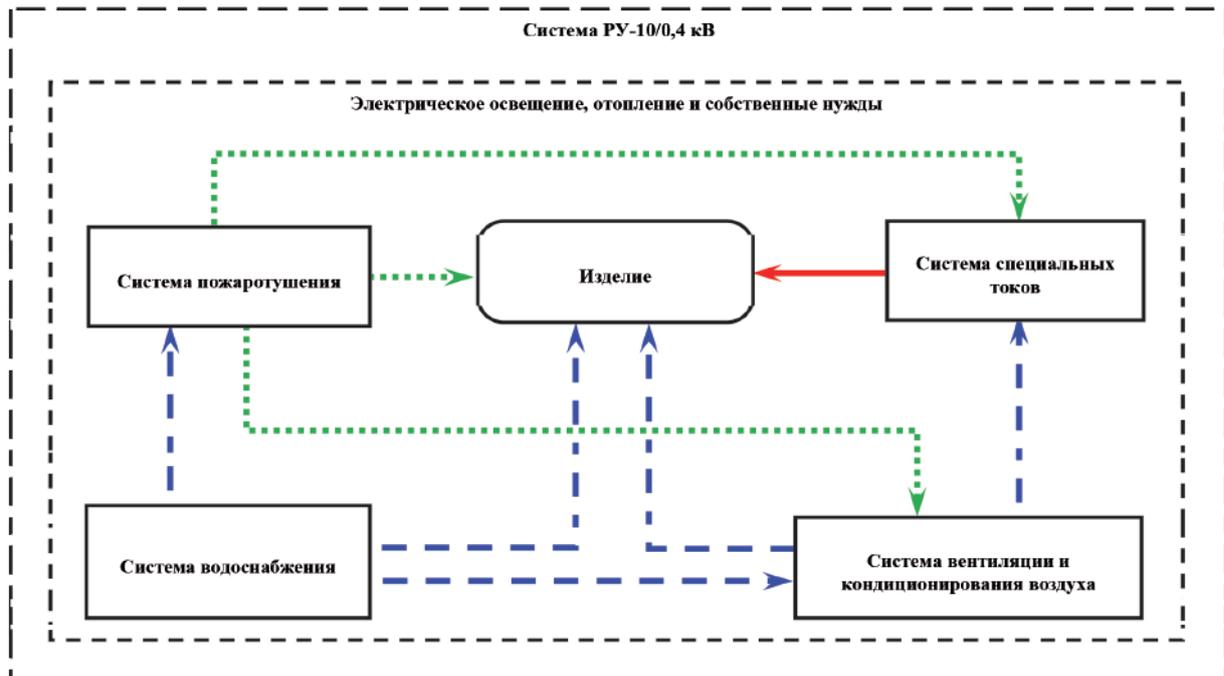


Рисунок 2. Структура объекта в преобразованном виде

Проанализируем работу ОТС и их взаимосвязи в преобразованном виде.

Система спецтоков — оборудование изделия

При нарушении связи «ССТ — изделие» высокочастотное оборудование прекратит функционирование, что может привести к нарушению боевой готовности объекта в целом.

Система водоснабжения — оборудование изделия

Связь обеспечивает хозяйственно-питьевые нужды персонала и оборудования изделия. При нарушении данной связи нарушится функционирование оборудования КП не произойдет, но вместе с тем ухудшится санитарное состояние рабочих мест.

Система водоснабжения — система пожаротушения

При нарушении связи «водоснабжение — ССТ» ССТ прекратит функционирование, но вместе с тем боевая готовность объекта в целом нарушена не будет.

Исходя из анализа преобразованной структуры объекта (рисунок 2) можно подытожить:

- работоспособность изделия не зависит от функционирования ССТ;
- система спецтоков является специальной системой и применяется на объектах достаточно редко.

Для упрощения описания порядка действий при определении достаточности резервирования ОТС будем рассматривать функ-

ционирование изделия без учёта систем спецтоков и пожаротушения.

Подход к определению степени влияния обеспечивающих функционирование изделия специальных технических систем на показатели надёжности функционирования изделия

Рассмотрим возможные варианты функционирования систем для определения условия выполнения требований ТЗ к изделию.

Шаг I. Рассмотрим неисправность одной из обеспечивающих систем.

Распределение времени устранения неисправности можно представить в виде графика, изображенного на рисунке 3, где ось ординат i (шт) отображает количество систем, вышедших в неисправность;

ось абсцисс t (мин) отображает временную ось, при чём у величины T_e отсчет начинается с момента наступления t_{npi} ;

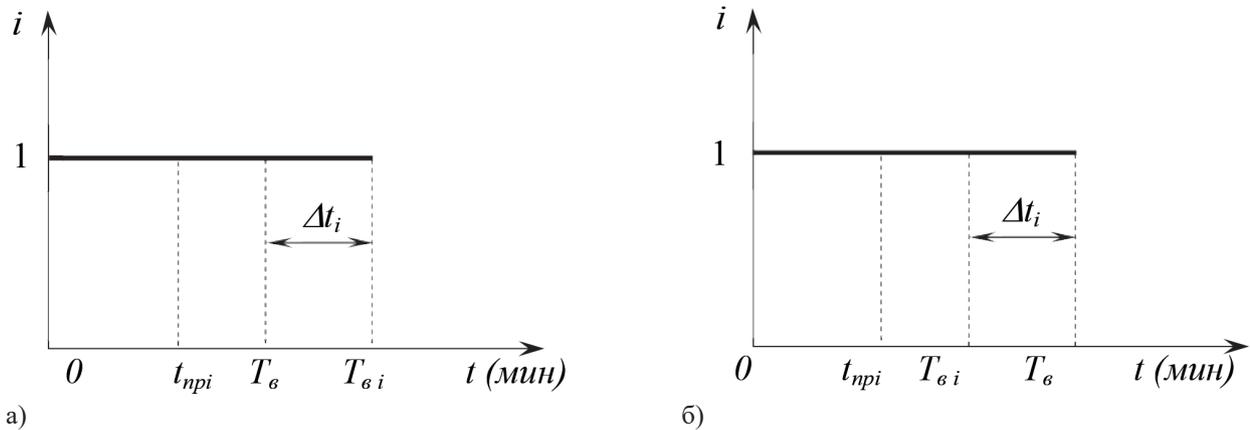
0 — начало отсчёта и время наступления отказа (неисправности) i -ой системы;

t_{npi} — предельное время функционирования изделия при отказе (неисправности) i -ой системы;

T_e — время восстановления изделия, установленное техническим заданием;

T_{ei} — время устранения неисправности i -ой системы;

Δt_i — временной параметр, определяющий условие выполнения требования технического задания.



а) — требования ТЗ не выполняются; б) — требования ТЗ выполняются
Рисунок 3. График устранения неисправности одной из обеспечивающих систем изделия

Численно Δt определяется выражением:

$$\Delta t_i = (t_{npi} + T_e) - T_{ei}. \quad (1)$$

Если $\Delta t_i \geq 0$, то изделие может находиться либо в работоспособном, либо в неработоспособном состоянии, при этом время восстановления изделия T_e не выходит за рамки требований ТЗ. А именно:

если $\Delta t_i \geq 0$ и $\Delta t_i \geq T_e$, то требования ТЗ выполняются, и изделие находится в работоспособном состоянии;

если $\Delta t_i \geq 0$ и $\Delta t_i < T_e$, то требования ТЗ выполняются, но изделие находится в неработоспособном состоянии.

В целом, если $\Delta t_i < 0$, то изделие неработоспособно, а время восстановления изделия выходит за рамки требований ТЗ. В этом случае необходимо выполнить мероприятия по уменьшению времени восстановления неисправности i -ой системы.

К мероприятиям по уменьшению времени восстановления относятся:

- организация резервирования агрегатов i -ой системы;
- укрупнение узлового (агрегатного) ремонта;
- увеличение наименований запасных инструментов и принадлежностей и технически необходимого резерва оборудования.

Таким образом, обобщенно условие выполнения требований ТЗ определяется выражением:

$$\begin{cases} \Delta t_i \geq 0 - \text{требования выполняются} \\ \Delta t_i < 0 - \text{требования не выполняются.} \end{cases} \quad (2)$$

Для выполнения требования ТЗ необходимо уменьшить продолжительность восстановления i -ой системы T_{ei}' . В итоге T_{ei}' — это время восстановления рассматриваемой

системы при реализации вышеописанных мероприятий.

Мероприятия по уменьшению времени восстановления систем выполняются до тех пор, пока величина значения времени устранения неисправности рассматриваемой обеспечивающей системы не перестанет оказывать влияние на соблюдение требования ТЗ.

Если после перебора (проверки на предмет соблюдения требования ТЗ к изделию) всех обеспечивающих систем и выполнения по необходимости всех вышеперечисленных мероприятий не оказывают влияние на выполнение требований ТЗ при неисправности одной из них, то есть Δt_i всегда больше нуля, требования ТЗ выполняются.

Шаг II. Одновременная неисправность двух обеспечивающих систем.

При рассмотрении этого события следует учесть, что шаг I уже выполнен, все необходимые мероприятия снижения времени восстановления проведены, т.е. Δt_i всегда не меньше нуля.

Предварительно необходимо рассмотреть вопрос количества ремонтно-восстанови-

тельных бригад, осуществляющих устранение неисправности системы.

Если количество ремонтно-восстановительных бригад соответствует количеству неисправных систем, то производятся действия по первому варианту (шаг I) при $\Delta t_i \geq 0$.

При наличии одной ремонтно-восстановительной бригады устранение неисправностей систем производится последовательно, при этом в первую очередь устраняется неисправность той системы, у которой наименьшее предельное время функционирования изделия t_{np} . Такая система принимается за i -ую систему.

Таким образом, условие очередности восстановления систем определяется выражением:

$$\begin{cases} t_{npi} < t_{npi+1}, \text{мо } i = 1, a \ i+1 = 2 \\ \text{если} \\ t_{npi} > t_{npi+1}, \text{мо } i+1 = 1, a \ i = 2 \end{cases} \quad (3)$$

Распределение времени устранения неисправностей на двух системах можно представить в виде графика, изображенного на рисунке 4,

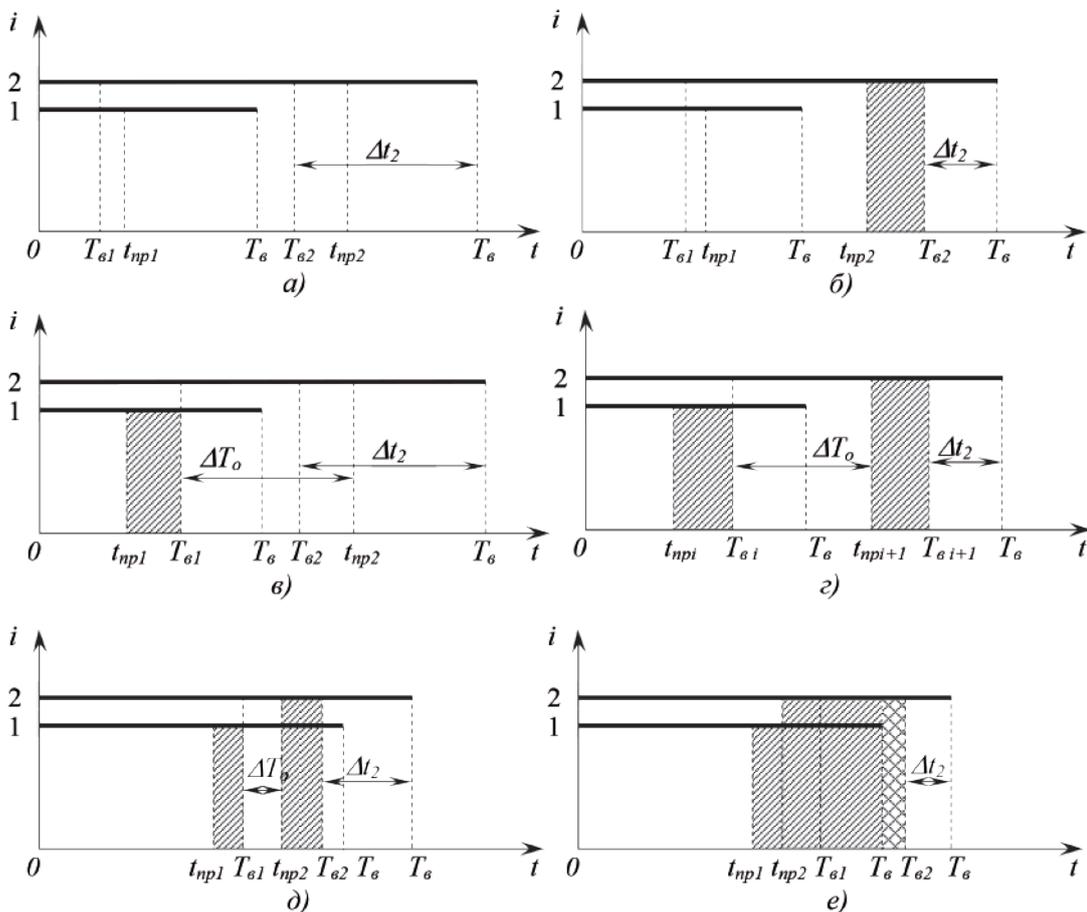


Рисунок 4. График устранения неисправностей двух обеспечивающих систем изделия

где ΔT_o — временной параметр, характеризующий время с момента восстановления функционирования изделия до следующего отказа;

Δt_2 — временной параметр, определяющий условие выполнения требования технического задания и определяется по выражению (4);

▨ — отрезок времени (область), в котором изделие находится в состоянии выключено по причине отказа ОТС, при этом требования ТЗ выполняется;

▩ — отрезок времени (область), в которой изделие находится в состоянии выключено, при этом требования ТЗ не выполняется.

$$\Delta t_2 = (t_{np2} + T_o) - (T_{o1} + T_{o2}). \quad (4)$$

Условием, определяющим выполнение требования ТЗ, является система:

$$\begin{cases} \Delta t_2 \geq 0 - \text{требования выполняются;} \\ \Delta t_2 < 0 - \text{требования не выполняются.} \end{cases} \quad (5)$$

В случае, если требование ТЗ к изделию не выполняется (второе неравенство выражения (5)), то необходимо выполнить мероприятия по снижению времени восстановления одной из двух вышедших в неисправность систем. Мероприятия целесообразно применить к той обеспечивающей системе, у которой наибольшее время восстановления. Мероприятия по уменьшению времени восстановления описаны при рассмотрении шага I.

Проведём анализ распределения времени устранения неисправностей.

График на рисунке 4, а

Требования ТЗ выполняются (первое выражение системы (6)) и режим функционирования изделия **не нарушается** (второе выражение системы (6)).

$$\begin{cases} \Delta t_2 \geq 0; \\ \Delta t_2 \geq T_o. \end{cases} \quad (6)$$

График на рисунке 4, б

Требования ТЗ выполняются (первое выражение системы (7)) и режим функционирования изделия **нарушается** (второе выражение системы (7)).

$$\begin{cases} \Delta t_2 \geq 0; \\ \Delta t_2 < T_o. \end{cases} \quad (7)$$

Графики на рисунке 4, в, г

Как известно из источника [3], коэффициент готовности K_g характеризует вероятность того, что объект (в нашем случае изделие) окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени (кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается). Коэффициент готовности задан техническим заданием и определяется согласно [4]:

$$K_g = \frac{T_o}{T_o + T_r}, \quad (8)$$

где T_o — время наработки на отказ (задано ТЗ),

T_r — время восстановления изделия.

Из выражения (9) определим предельное значение наработки на отказ:

$$T_o = \frac{K_g T_r}{1 - K_g}. \quad (9)$$

Если $\Delta T_o \geq T_o$, то изделие находится в работоспособном состоянии дольше предельного значения наработки на отказ и, как следствие, не приводит к снижению коэффициента готовности K_g и не выходит за рамки требований ТЗ.

Исходя из этого условия и анализа графика 4, в, составим систему условий выполнения требований ТЗ:

$$\begin{cases} \Delta t_2 \geq 0; \\ \Delta t_2 < T_o; \\ \Delta T_o \geq T_o. \end{cases} \quad (10)$$

где первое (верхнее) неравенство системы (10) — условие ко времени восстановления;

второе неравенство — фактическое время восстановления работы изделия не превышает установленное время T_o ;

третье неравенство — фактическое время работы до следующего отказа превышает время наработки на отказ, установленное ТЗ.

В то же время, если $\Delta T_o < T_o$, как возможно из графика 4, г, система (10) примет вид:

$$\begin{cases} \Delta t_2 \geq 0; \\ \Delta t_2 < T_o; \\ \Delta T_o < T_o. \end{cases} \quad (11)$$

В этом случае изделие находится в неработоспособном состоянии менее предельного значения наработки на отказ и, как следствие, приводит к снижению коэффициента готовности K_2 (требования ТЗ не выполняются).

В этом случае необходимо выполнить мероприятия по уменьшению времени восстановления первой системы T_{e1} или (и, если уменьшение времени восстановления первой системы недостаточно для выполнения требования ТЗ) по уменьшению времени восстановления второй системы T_{e2} .

График на рисунке 4, д

Если время восстановления работоспособности изделия не превышает установленное ТЗ время T_0 и фактическое время функционирования изделия до отказа не превысит время наработки на отказ T_o , то требования технического задания выполняются.

Исходя из этого условия и анализа графика 4, д, составим систему условий выполнения требований ТЗ:

$$\begin{cases} \Delta t_2 \geq 0; \\ \Delta T_0 \geq T_0. \end{cases} \quad (12)$$

В то же время, если $\Delta T_0 < T_0$, то необходимо выполнить мероприятия, изложенные при рассмотрении графика 4, з.

График на рисунке 4, е

График на рисунке 4, е соответствует частному случаю, когда предельное время функционирования изделия при отказе второй системы наступает раньше восстановления первой системы, соответственно, изделие перейдёт в работоспособное состояние только после восстановления второй обеспечивающей системы. В этом случае время восстановления работоспособности изделия не должно превысить установленное ТЗ время T_0 для выполнения требований технического задания.

Тогда условий выполнения требований ТЗ примет вид:

Список литературы

1. Правила устройства электроустановок. 7 изд. М.: ЗАО «Энергосервис», 2004.
2. Рыбаков В.В., Пешехонов Н.Е., Воронин А.Е. Актуальные проблемы учёта тре-

$$\begin{cases} \Delta t_2 \geq 0; \\ T_{e1} + T_{e2} - t_{npi} \leq T_0. \end{cases} \quad (13)$$

При невыполнении условия (13) необходимо выполнить мероприятия, изложенные при рассмотрении графика, изображенного на рисунке 4, з.

На объекте количество обеспечивающих систем, как правило, более двух, в этом случае применение подхода заключается в сокращении количества систем до двух, путём объединения в одну систему двух (трёх и т.д.) систем с наименьшими значениями t_{npi} . При этом объединённая система будет иметь параметры t_{npi} , T_{ei} :

$$\begin{cases} t_{npi} := \min\{t_{npi} | i = 1..n\} \\ T_{e1} := \sum_{i=1}^n T_{ei} \end{cases} \quad (14)$$

Вывод

Подход к определению достаточности резервирования оборудования ОТС заключается в проверке условий выполнения ТЗ, которое определяет коэффициент готовности (K_2) и время восстановления изделия (T_0). Выполнение требований ТЗ при отказе одной или нескольких обеспечивающих технических систем проверяется пошагово. Первый шаг (вариант I) — возможный отказ одной из обеспечивающих систем, второй и последующие шаги — отказ одновременно двух, трёх, четырёх и т.п. систем.

Условия выполнения требований ТЗ определяются выражениями (2), (5), (10), (12), (13).

При выявлении случая несоответствия требованиям ТЗ в статье представлены мероприятия (рекомендации) по снижению времени восстановления ОТС. Результатом применения предлагаемых мероприятий является изменение проектных (схемных решений) и эксплуатационных параметров ОТС для приведения объекта к требованиям ТЗ к изделию.

бований надёжности электроэнергетической системы при построении систем электрообеспечения специальных объектов // Известия Тульского государственного университета. 2018. Вып. 10. С. 392–398.

3. Сикорский А.Е. Системы электро-снабжения объектов ПВО и автоматизация: учеб. пособие для вузов. Пушкин: Изд-во Пушкинского ВУРЭ ПВО, 1995. 320 с.

4. Ковалёв А.П. Эксплуатация космических средств: теория и практика: учеб. для вузов. СПб.: Изд-во ВКА им. А.Ф. Можайского, 2003. 482 с.

References

1. *Pravila ustroystva elektroustanovok* [Electrical Units Installation Rules]. 7th Ed. Moscow, ЗАО «Energoservis», 2004. [in Russian].

2. Rybakov V.V., Peshekhonov N.Ye., Voronin A.Ye. Aktual'nyye problemy uchota trebovaniy nadozhnosti elektroenergeticheskoy sistemy pri postroyenii sistemy elektrosnabzheniya spetsial'nykh ob'yektov [Actual Issues of

Accounting Requirements the Reliability of the Electric Energy System when Building a Power Supply System Special Object]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta — Bulletin of Tula State University*, 2018, Issue 10, pp. 392-398. [in Russian].

3. Sikorskiy A.Ye. *Sistemy elektro-snabzheniya ob'yektov PVO i avtomatizatsiya: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Power Supply Systems for Air Defense Facilities and Automation: Manual for Universities]. Pushkin, Izd-vo Pushkinskogo VURE PVO, 1995. 320 p. [in Russian].

4. Kovalov A.P. *Ekspluatatsiya kosmicheskikh sredstv: teoriya i praktika: ucheb. dlya vuzov* [The Exploitation of Space Assets: Theory and Practice: Manual for Universities]. Saint-Petersburg, Izd-vo VKA im. A.F. Mozhayskogo, 2003. 482 p. [in Russian].



Гусев Р. А.
Gusev R. A.

ведущий специалист, Служба автоматизированных систем диспетчерского управления, Филиал АО «СО ЕЭС» «Региональное диспетчерское управление энергосистемы Иркутской области», г. Иркутск, Российская Федерация



Бухаров Д. С.
Bukharov D. S.

кандидат технических наук, заместитель начальника службы – начальник отдела, Служба автоматизированных систем диспетчерского управления, Филиал АО «СО ЕЭС» «Региональное диспетчерское управление энергосистемы Иркутской области», г. Иркутск, Российская Федерация

УДК 004.021

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-40-46

К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА РАБОТЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Мониторинг и анализ расположения точек нагрузки относительно области срабатывания дистанционной защиты в режиме реального времени затруднителен. Для решения этих двух задач разрабатывается специализированное программное обеспечение, которое позволит представить необходимую информацию в графическом виде. Такое программное обеспечение позволит анализировать корректность работы дистанционной защиты и оценивать риски изменения режима работы энергосистемы.

Программное обеспечение для мониторинга и анализа работы дистанционной защиты разрабатывается на объектно-ориентированном языке программирования C#. На текущий момент выполнена интеграция с оперативно-информационным комплексом с целью приема актуальной телеметрической информации с энергетических объектов, на которых установлена дистанционная защита, и вычисления месторасположения точки нагрузки на комплексной плоскости активного и реактивного сопротивления.

Для каждой дистанционной защиты моделируется область срабатывания, которая может иметь простую (треугольник, четырехугольник, окружность, эллипс) и сложную геометрические формы. Реализован алгоритм фиксации приближения точки нагрузки к области срабатывания дистанционной защиты и выдачи предупреждения о необходимости принятия управляющих воздействий для предотвращения возможного срабатывания устройства. Фиксация приближения точки нагрузки к области срабатывания дистанционной защиты основана на вычислении области отстройки, которая изменяется в зависимости от текущего значения сопротивления.

Реализован алгоритм фиксации схожести изменения текущей нагрузки с нагрузкой в режиме, который привел к работе дистанционную защиту. Данный алгоритм основан на построении специальной области на комплексной плоскости. Эта область строится относительно пути, пройденного нагрузкой с момента фиксации приближения к области срабатывания до момента работы дистанционной защиты. Эта область характеризует собой эквидистанту. Схожесть фиксируется, когда текущая нагрузка попадает внутрь эквидистанты и перемещается вдоль области к области срабатывания.

Программное обеспечение позволяет визуализировать поведение нагрузочной характеристики относительно области срабатывания дистанционной защиты в режиме реального

времени и проинформировать диспетчерский персонал о возможных последствиях при ведении нормального или аварийного режима.

Ключевые слова: программное обеспечение, мониторинг, анализ, моделирование, дистанционная защита, область срабатывания, предупредительная сигнализация, уставки, эквидистанта, сопротивление, точка нагрузки.

REVISITING THE DEVELOPMENT OF A SOFTWARE FOR MONITORING AND ANALYZING OF DISTANCE PROTECTION DEVICES

Monitoring and analyzing of a load location compared with operation region of the distance protection (DP) is problematic in real-time mode. This one claim to develop a specialized software, which can show all kinds of the information as graphical. This software need for analyzing of correctness of DP actions with historical and computed data and estimating of risks in operational changes of the electric power system.

The software is developed in object-oriented programming language C#. Data receiving of telemetering measurements is implemented by the dynamic library of the operative-information complex. Telemetering measurements from the every energy objects with DP is used for computing of the load point location in complex plane of active and reactive resistances.

The software is implemented by models of operation regions (OR) of the every DP type. The OR is entitled to simple (triangle, quadrangle, circle, and ellipse) and difficult geometric shapes. There is the algorithm for registration of closing a load point (LP) in the OR of the DP. For the every state of closing a LP in the OR of the DP the software raise a warning, that a dispatcher takes an action to prevention of DP tripping. The registration of closing a LP in the OR of the DP bases on computing of the offset region, which changes in real-time with the current value of the resistance.

There is the algorithm for registration of a conformity of the current load and the load, which caused the DP operation. This algorithm bases on plotting of the ad-hoc region on the complex plane. The ad-hoc region is equidistant of the trajectory that was plotted by the LP from the warning time to the DP action time. If the current load moves along the trajectory into the interior of equidistant, then the software registers the conformity.

The software make it possible to show graphically the load changing in real-time for the every DP devices and to warn dispatch office personnel about probable consequences in the control of normal and emergency operating conditions.

Key words: software, monitoring, analyzing, modeling, distance protection, operation region, warning, setting, equidistant, resistance, load point.

Введение

В настоящее время осуществление оперативного мониторинга нахождения точек нагрузки (ТН) относительно области срабатывания (ОС) дистанционной защиты (ДЗ) затруднительно в виду отсутствия визуального отображения этой информации.

Осуществление контроля режима по величине перетоков мощностей и напряжению не позволяет диспетчеру в полной мере определить необходимые управляющие воздействия на силовое оборудование для предупреждения возможной аварийной ситуации.

Программное обеспечение (ПО), обеспечивающее прием необходимой телеметрической информации (ТМ), моделирование

работы ДЗ по заданным уставкам и визуализацию в реальном времени текущей ситуации на энергообъекте, позволят диспетчеру, оперативно оценить текущее положение нагрузочной характеристики и ее поведение, а также уменьшить время принятия решения на изменение режима работы энергосистемы.

Одним из ключевых инструментов при ведении режима для диспетчера является оперативно-информационный комплекс (ОИК), в который в режиме реального времени поступает ТМ (рисунок 1), необходимая для мониторинга.

Каждый параметр ТМ в ОИК подвергается достоверизации по описателю качества, времени поступления, физическим преде-



Рисунок 1. ПО мониторинга ДЗ

лам, проверяется физическая доступность сервера телемеханики и устанавливается сессия с его ПО.

Так, например, при выходе (необходимого для мониторинга ДЗ) параметра ТМ за физические пределы (т.е. наблюдается выброс ТМ из-за сбоя системы телемеханики на энергообъекте) выполняется «замораживание» значения этого параметра до момента восстановления его достоверности. При «замораживании» ПО работает по последнему достоверному значению.

Математико-алгоритмическое обеспечение разрабатываемого ПО позволяет выполнять следующие функции:

- вычисление ТН на основе ТМ;
- фиксацию приближения точки нагрузки к области срабатывания ДЗ;
- фиксацию схожести изменения текущей нагрузки с нагрузкой в режиме, который привел к работе ДЗ;
- построение области отстройки от нагрузки;
- загрузку ретроспективных и расчетных данных из файлов;
- прием данных ТМ из ОИК (реализован посредством стандартной динамической библиотеки ОИК OICDAS.dll [1]);
- отображение информации в графическом виде (реализовано посредством графической библиотеки ZedGraph.dll [2]).

Вычисление ТН на основе ТМ из ОИК

— Для визуализации точки нагрузки $TH(t) = f\langle P(t), Q(t), U(t) \rangle$ необходимы три параметра телеметрической информации из ОИК: напряжение $U(t)$, активная $P(t)$ и реактивная $Q(t)$ мощности в текущий момент времени t , которые необходимы для вычисления активного $R(t)$ и реактивного $X(t)$ сопротивлений.

Согласно [3, 4], активная мощность $P(t)$ и электрический ток $I(t)$ вычисляются по формулам:

$$P(t) = R(t) \cdot I^2(t), I(t) = \frac{S(t)}{\sqrt{3} \cdot U(t)},$$

где $S(t) = \sqrt{P^2(t) + Q^2(t)}$ — полная мощность.

Выразив $R(t)$ через $I(t)$, получим формулу расчета активного сопротивления:

$$R(t) = \frac{3 \cdot P(t) \cdot U^2(t)}{P^2(t) + Q^2(t)}.$$

Выполнив аналогичные преобразования, получим формулу расчета реактивного сопротивления:

$$X(t) = \frac{3 \cdot Q(t) \cdot U^2(t)}{P^2(t) + Q^2(t)}.$$

Расчетная точка $TH(t)$ необходима для определения принадлежности $TH(t)$ к области срабатывания ДЗ D .

Если в момент времени t' точка $TH(t') \in D$ (рисунок 2), то выполняется работа ДЗ по отключению защищаемого силового оборудования.

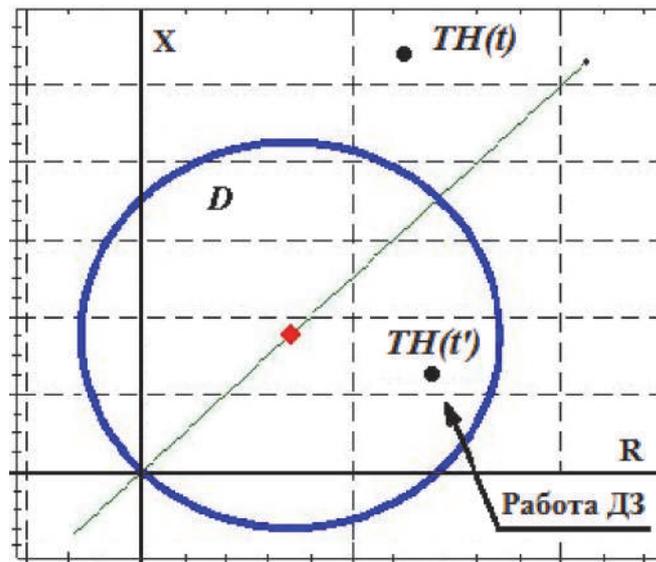


Рисунок 2. Точка нагрузки относительно ОС ДЗ

Построение ОС ДЗ

Область *D* может иметь простую (треугольник, четырехугольник, окружность,

эллипс) и сложную геометрические формы. В рамках настоящей статьи рассмотрим эллиптическую ОС (рисунок 3).

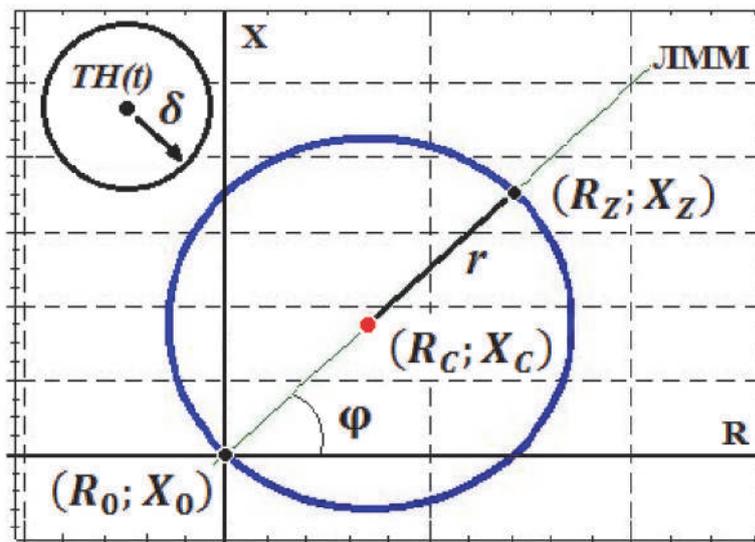


Рисунок 3. Фиксация приближения *ТН(t)* к области *D*

Построение ОС *D* выполняется на основе пяти уставок: величины полного сопротивления *Z*, угла максимальной чувствительности $\varphi \in [0;180]$ линии максимальных моментов (ЛММ), коэффициента смещения $\Delta \in [-1;1]$ и полуосей эллипса $a \in (0;1]$, $b \in (0;1]$.

Для схематического отображения эллипса на плоскости вычисляются координаты «опорных» точек ОС:

$$R_{OC} = a \cdot r \cdot \cos(\alpha),$$

$$X_{OC} = b \cdot r \cdot \sin(\alpha),$$

где $\alpha \in [0;360]$, *r* – радиус ОС ДЗ.

Для этих «опорных» точек выполняются аффинные преобразования [5]:

$$R_{OC}^* = R_{OC} \cdot \cos(\varphi) - X_{OC} \cdot \sin(\varphi) + R_C,$$

$$X_{OC}^* = R_{OC} \cdot \sin(\varphi) + X_{OC} \cdot \cos(\varphi) + X_C,$$

где $(R_C; X_C)$ – центр ОС с координатами

$$R_C = \frac{R_Z + R_0}{2}, X_C = \frac{X_Z + X_0}{2}.$$

В результате таких преобразований происходит перемещение в точку $(R_C; X_C)$ и поворот системы координат на угол φ .

R_Z и X_Z – координаты «фиксированной» точки $(R_Z; X_Z)$, лежащей на ЛММ, расположенной под углом φ оси OR и проходящей

через точку $(0;0)$. Координаты точки $(R_Z; X_Z)$ вычисляются как $R_Z = Z \cdot \cos \varphi$, $X_Z = Z \cdot \sin \varphi$.

R_0 и X_0 – координаты «смещающейся» по ЛММ точки $(R_0; X_0)$, вычисляемые по формулам

$$R_0 = |\Delta| \cdot Z \cdot \cos(\varphi + 180 \cdot p(\Delta)),$$

$$X_0 = |\Delta| \cdot Z \cdot \sin(\varphi + 180 \cdot p(\Delta)),$$

где $p(\Delta)$ – бинарная пороговая функция

$$p(\Delta) = \begin{cases} 1, & \text{при } \Delta < 0, \\ 0, & \text{при } \Delta \geq 0. \end{cases}$$

От величины коэффициента смещения Δ зависит расположение точки $(R_0; X_0)$ на ЛММ и размер ОС (рисунок 4).

Фиксация приближения ТН к ОС ДЗ

Необходимой частью мониторинга текущего положения $ТН(t)$ является своевременная сигнализация об утяжелении режима и

приближении к области D . Если $ТН(t)$ попадает в D , то фиксируется работа ДЗ. Для предупреждения этой ситуации необходима сигнализация о факте приближения $ТН(t)$ к области D (рисунок 5).

Если $ТН(t)$ попадает в область 1 (рисунок 5), то в разрабатываемом ПО выдается сообщение об утяжелении электроэнергетического режима. Если $ТН(t)$ попадает в область 2, то выдается сообщение о необходимости принятия управляющих воздействий для предотвращения срабатывания ДЗ.

Для фиксации момента приближения $ТН(t)$ к области D необходимо вычислить расстояние между $ТН(t)$ и центром области D — точкой $(R_C; X_C)$. Если это расстояние меньше или равно $r + \delta$ (область 2 сигнализаци-

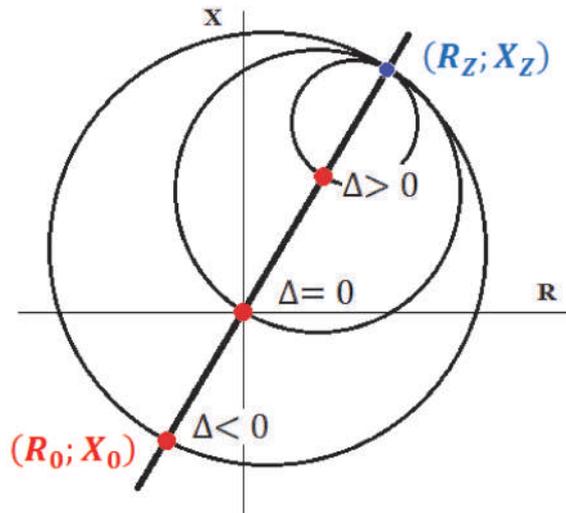


Рисунок 4. Зависимость размера ОС от величины коэффициента смещения

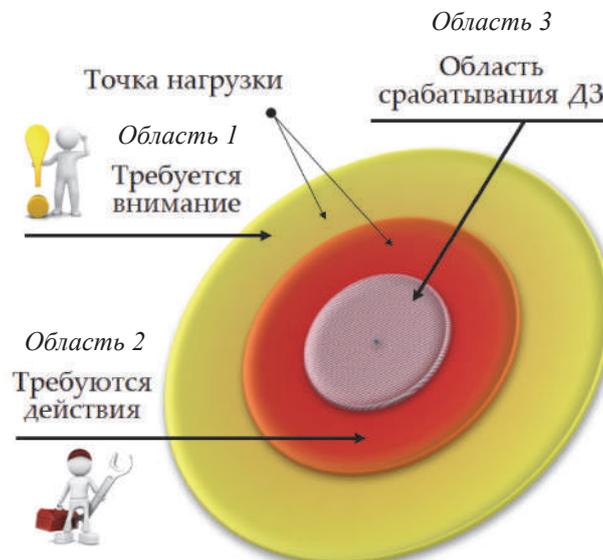


Рисунок 5. Области сигнализации

ции), то фиксируется приближение $TH(t)$ к области D .

Поскольку ОС имеет эллиптическую форму, то радиус r напрямую зависит от величины угла α . Величина $\delta = \mu \cdot Z_{TH(t)}$ — радиус отстройки от нагрузки $TH(t)$, μ — коэффициент отстройки, $Z_{TH(t)}$ — полное сопротивление в точке $TH(t)$.

Алгоритмически область 1 сигнализации фиксируется идентично области 2, отличие заключается лишь в наличии увеличивающего коэффициента для радиуса r .

Фиксация схожести изменения текущей нагрузки с нагрузкой в режиме, который привел к работе ДЗ

Фиксация приближения ТН к ОС ДЗ — основа для мониторинга ДЗ. Такой мониторинг предназначен для общего контроля нагрузочной характеристики и своевременного оповещения диспетчерского персонала о потенциальной работе ДЗ.

При изменении режима работы энергосистемы могут быть предприняты действия, которые впоследствии приведут к работе ДЗ. Информация о таких действиях и их последствиях должна храниться и предоставляться диспетчеру в форме справочных данных.

На основе ретроспективных данных и принимаемой в ОИК ТМ возможно сопоставить текущее поведение ТН с ранее зафиксированными данными и проинформировать диспетчерский персонал о возможных последствиях при ведении нормального или аварийного режима.

Как указано выше, работа ДЗ выполняется при попадании нагрузки $TH(t)$ в область срабатывания D , до сближения с которой $TH(t)$ преодолевает некоторый «предаварийный путь» S .

Линия S — ломанная, соединяющая последовательно точки $TH_i (i = \bar{1}, n)$. $TH_n \in D$ — точка нагрузки, при которой выполнялась работа ДЗ.

Оповещение о схожести выполняется тогда, когда фиксируется траектория изменения нагрузки $TH(t)$, S_{TH} близкая к известной S .

Близость S_{TH} к S определяется по вхождению $TH(t)$ в область D_S (рисунок 6), охватывающую траекторию S ее эквидистантой [6] на расстоянии радиуса ϵ_n области отстройки от $Z_{TH_n} = \sqrt{R^2_{TH_n} + X^2_{TH_n}}$, где $\epsilon_n = \mu \cdot Z_{TH_n}$, μ — коэффициент отстройки от нагрузки, $TH_n \in D_S \cap D$.

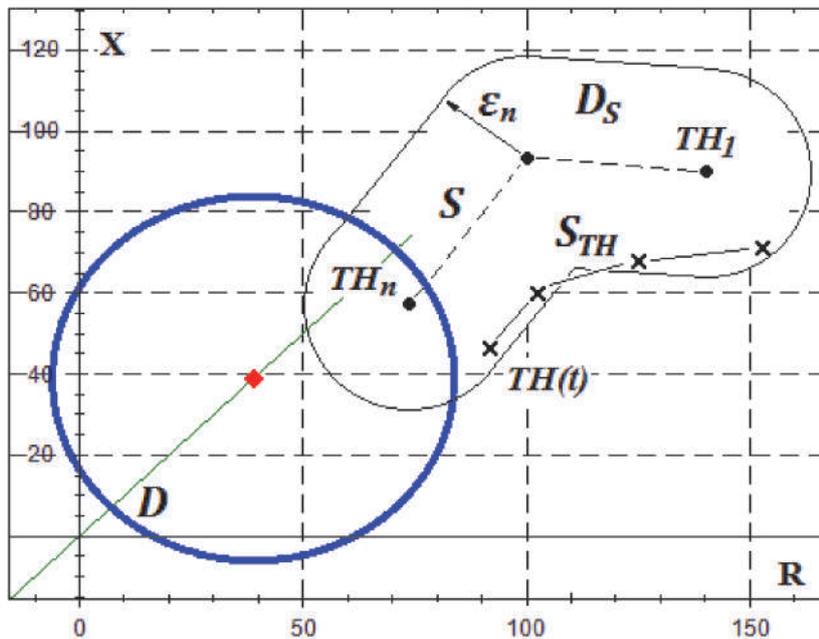


Рисунок 6. Фиксация схожести изменения нагрузки

Фиксация близости S_{TH} к S выполняется, если более 40 % точек S_{TH} принадлежат области D_S (исключение дребезга возле

области D_S) и направление движения $TH(t)$ соответствует направлению изменения траектории S .

Выводы

Программное обеспечение, визуализирующее поведение нагрузочной характеристики относительно области срабатывания ДЗ в режиме реального времени, является эффективным средством мониторинга при ведении режима работы энергосистемы.

Разрабатываемое ПО позволяет: наглядно представить текущее положение точки нагрузки для присоединений на основе ТМ; оценить риски изменения режима работы энергосистемы; заблаговременно зафиксировать схожесть изменения нагрузочной характеристики с нагрузкой в предаварийном

режиме (при его наличии); оценить корректность работы ДЗ на основе ретроспективных данных; исследовать траекторию изменения нагрузочной характеристики; проанализировать текущую область срабатывания ДЗ и скорректировать уставки.

Ключевыми направлениями дальнейшей работы являются формирование справочника объектов мониторинга, реализация многопоточного вычислителя для мониторинга состояния ДЗ и автоматизация настройки области срабатывания ДЗ по расчетным точкам нагрузки в утяжеленном режиме.

Список литературы

1. Оперативно-информационный комплекс СК-2007. Расширение функциональности. Пятигорск: АО «Монитор Электрик», 2018. Т. 9. 140 с.
2. Шпаргалка ZedGraph. URL: <https://jenyay.net/Programming/ZedGraph>.
3. Волынский Б.А., Зейн Е.Н., Шатерников В.Е. Электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1987. 528 с.
4. Общая электротехника: учеб. пособие для вузов / Под ред. А.Т. Блажкина. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 592 с.
5. Понарин Я.П. Аффинная и проективная геометрия. М.: МЦНМО, 2009. 288 с.
6. Арнольд В.И. Особенности каустик и волновых фронтов. М.: ФАЗИС, 1996. 334 с.

cement]. Pyatigorsk, АО «Монитор Электрик», 2018. Vol. 9. 140 p. [in Russian].

2. *Shpargalka ZedGraph* [Cheat Sheet ZedGraph]. URL: <https://jenyay.net/Programming/ZedGraph>. [in Russian].

3. Volynskiy B.A., Zeyn Ye.N., Shaternikov V.Ye. *Elektrotekhnika* [Electrical Engineering]. Moscow, Energoatomizdat, 1987. 528 p. [in Russian].

4. *Obshchaya elektrotekhnika: ucheb. posobiye dlya vuzov* [General Electrical Engineering: Manual for Universities]. Ed. by A.T. Blazhkina. Leningrad, Energoatomizdat, 1986. 592 p. [in Russian].

5. Ponarın Ya.P. *Affinnaya i proyektivnaya geometriya* [Affine and Projective Geometry]. Moscow, MTSNMO, 2009. 288 p. [in Russian].

6. Arnol'd V.I. *Osobennosti kaustik i volnovykh frontov* [Singularities of Caustics and Wave Fronts]. Moscow, FAZIS, 1996. 334 p. [in Russian].

References

1. *Operativno-informatsionnyy kompleks SK-2007. Rasshireniye funktsional'nosti* [Operative-Information Complex SK-2007. Enhanc-



Шуваева А. О.
Shuvaeva A. O.

ассистент кафедры

*«Теория машин и оборудования»,
ФГБОУ ВО «Камчатский государственный
технический университет»,
г. Петропавловск-Камчатский,
Российская Федерация*



Меньшенин И. С.
Menshenin I. S.

курсант учебной группы

*по специальности «Электромеханика»,
ФГБОУ ВО «Камчатский государственный
технический университет»,
г. Петропавловск-Камчатский,
Российская Федерация*

УДК 621.311:629.12

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-47-53

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ УСТРОЙСТВА КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ С АВТОНОМНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ

В статье проведен обзор основных существующих систем электрохимической защиты трубопроводов. Проведен географический анализ основных нефтегазовых месторождений Российской Федерации. Выявлены существующие трудности, связанные с транспортировкой минеральных ресурсов от места добычи к потребителю, основной из которых являются коррозионные разрушения стальных магистральных трубопроводов. Приведен основной метод борьбы с коррозионными разрушениями, который регламентируется государственным стандартом РФ на всех этапах проектирования и эксплуатации, — электрохимическая защита. Приведена существующая принципиальная схема действия системы электрохимической катодной защиты, имеющая источник постоянного тока, подключенный к защищаемому сооружению и анодному электроду. Рассмотрены структура и принцип работы устройства, сконструированного авторами, которое позволяет обеспечить электрохимическую защиту нефтегазовых сооружений и конструкций. В качестве автономного источника питания системы электрохимической защиты был выбран емкостной накопитель — ионисторный модуль, целесообразность и эффективность использования которого обоснованы авторами. Разработана электрическая модель работы устройства электрохимической защиты, состоящая из таких основных элементов, как источник электрической энергии, повышающий преобразователь напряжения для заряда аккумулятора, понижающий преобразователь ионисторного модуля, ионистор и силовой инвертор. На основе электрической модели была разработана и сконструирована макетная модель предлагаемого устройства. С помощью осциллографа марки АКИП исследованы зависимости основных электрических параметров макетной установки от времени — силы тока и напряжения системы заряда ионисторного модуля. Рассмотрена совместная работа импульсного стабилизатора напряжения и емкостного накопителя. Выявлен положительный эффект разработанной электрической системы по сравнению с существующими аналогами.

Ключевые слова: транспортная система, коррозия, трубопровод, электрохимическая защита, катодная защита, автономный источник, резервное питание, ионисторный модуль, преобразователь напряжения, силовой инвертор.

DEVELOPMENT AND TESTING OF A CATHODIC PROTECTION DEVICE WITH AN AUTONOMOUS POWER SOURCE

The article reviews the main existing systems of electrochemical protection of pipelines. A geographical analysis of the main oil and gas fields of the Russian Federation is carried out. The existing difficulties associated with the transportation of mineral resources from the place of production to the consumer, the main of which is the corrosion damage of steel pipelines, are identified. The basic method of combating corrosion damage, which is regulated by state standard of the Russian Federation at all stages of design and operation, is given — electrochemical protection. Present circuit diagram of operation of electrochemical cathode protection system, having DC source connected to protected structure and anode electrode, is shown. The structure and operation principle of the device designed by the authors, which allows to provide electrochemical protection of oil and gas structures and structures, are considered. As an autonomous power source of the electrochemical protection system, a capacitive storage device – an ionizer module – was chosen, the expediency and efficiency of which are justified by the authors. An electrical model of operation of an electrochemical protection device has been developed, consisting of such basic elements as an electric energy source, an increasing voltage converter for charging a battery, a lowering converter of an ionizer module, an ionizer and a power inverter. Based on the electrical model, a mock-up model of the proposed device has been developed and constructed. Using the oscilloscope of AKIP grade, the dependencies of the main electric parameters of the mock-up plant on time — current intensity and voltage of the charge system of the ionizer module — were investigated. Joint operation of pulse voltage stabilizer and capacitive accumulator is considered. The positive effect of the developed electrical system compared to existing analogues was revealed.

Key words: transport system, corrosion, pipeline, electrochemical protection, cathodic protection, autonomous source, backup power supply, ionistor module, voltage converter, power inverter.

На сегодняшний день в России доля трубопроводного транспорта в грузообороте всей транспортной системы составляет более 48 %, превышая при этом долю железнодорожного транспорта — 45 %.

Основную часть транспортируемых продуктов составляет топливное сырье — нефть и газ. Транспортировка осуществляется от месторождения углеводородного сырья до потребителя по магистральным трубопроводам. Подавляющее большинство отечественных трубопроводов, входящих в транспортную систему эксплуатации, — металлические, главной причиной разрушения которых является коррозия. По данным специалистов, убытки от коррозии могут составлять от 3 % до 5 % ВВП стран с развитой промышленностью.

Система коррозионной защиты трубопроводов должна обеспечивать их бесперебойную и безаварийную работу на весь заявленный период эксплуатации.

Магистральные трубопроводы являются единственным видом трубопроводов, корро-

зионная защита которых регламентируется национальным стандартом ГОСТ Р 51164-98 [1], согласно которому все магистральные трубопроводы РФ подлежат обязательной электрохимической защите на всех стадиях — от проектирования до эксплуатации и ремонта.

Эффективность работы систем электрохимической защиты доказана годами эксплуатации подземных сооружений по всему миру.

Главная задача электрохимической защиты наружной поверхности трубопровода сводится к устранению анодных зон путем повышения потенциала трубопровода до величины, достаточной для того, чтобы остановить анодное разложение, при этом поверхность трубопровода будет содержать лишь катодные участки. Есть два основных метода для решения этой задачи:

1. Протекторная защита: установка протекторных групп на коррозионно-опасные участки;
2. Катодная защита: принудительная катодная поляризация всей поверхности тру-

бопровода посредством источника постоянного тока – станции катодной защиты (СКЗ) [2].

Катодная защита основывается на создании поляризации, которая позволяет уменьшить скорость разложения металла. Электрический ток проводится между поверхностью металла и грунтом. Это мероприятие существенно снижает скорость коррозии.

На сегодняшний день различают два основных способа реализации катодной защиты:

1. С использованием внешних источников тока, соединяющихся с защищаемым объектом и с анодным заземлением;
2. С использованием гальванического метода, который реализуется за счет протекторов, позволяющих обеспечить защиту объекта [3].

Наиболее эффективным видом катодной защиты трубопроводов является защита с использованием внешних источников постоянного тока. Но данный вид защиты не всегда может быть реализован ввиду некоторых особенностей. Так, для территории РФ этой особенностью является географическое расположение углеводородных месторождений.

Большая часть углеводородных месторождений сосредоточена на территориях с исключительно тяжелыми климатическими условиями, такими как продолжительный зимний период с низкими отрицательными температурами и вечной мерзлотой. В летний период значительный процент этих территорий покрыт реками, озерами и болотами, а это существенно затрудняет доступ к промышленным объектам.

Условия, перечисленные выше, создают состояние низкой надежности источников электроснабжения или их полное отсутствие [4].

Для решения сложившейся проблемы было разработано и сконструировано устройство электрохимической защиты с автономным источником питания для обеспечения защиты стальных магистральных трубопроводов и подземных металлических сооружений.

Источник электрохимической защиты, вырабатывающий постоянный ток, подключен минусом к защищаемому сооружению, а плюсом — к анодным электродам, расположенным в среде (почве) [5]. Схема данного подключения представлена на рисунке 1.

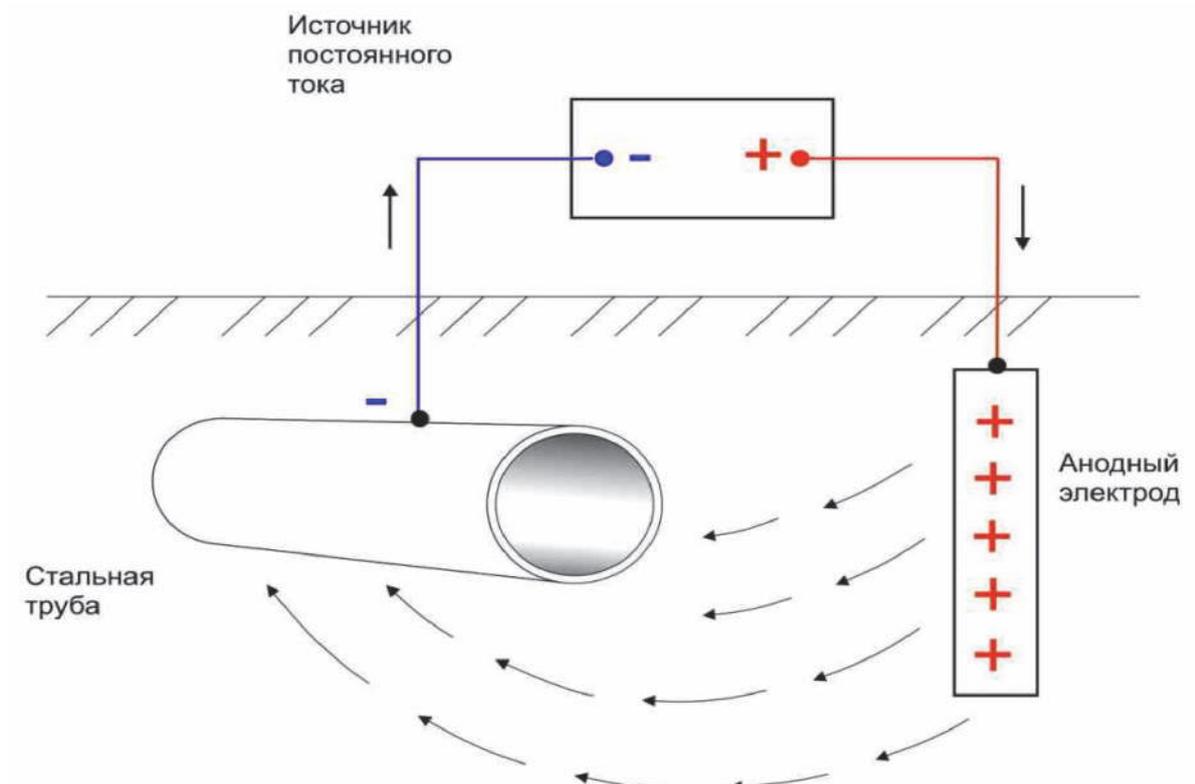


Рисунок 1. Принцип действия электрохимической катодной защиты

Станция катодной защиты вырабатывает электрический ток для системы защиты с автономным источником питания, который представляет собой специализированный блок. Станция подключается к источнику электрической энергии и вырабатывает ток с необходимыми заданными параметрами.

Ввиду своего потенциала и распространенности в качестве источника энергии был выбран возобновляемый источник энергии — ветер. Для преобразования механической энергии ветра была использована вертикально-осевая (роторная) ветроэнергетическая установка (ВЭУ) [6].

После проведения обзора существующих автономных устройств катодной защиты было выявлено, что большинством из них являются катодные станции, которые включают в свой состав блоки автоматического регулирования электрических параметров защиты, а в качестве питающего элемента системы выступает аккумулятор.

Авторами в качестве главного накопителя энергии используется ионисторный модуль для питания системы катодной защиты. Его применение обусловлено возможностью эксплуатации в жестких температурных условиях и высокой надёжностью. Аккумуляторные батареи не допускают глубокого разряда, требуют специальных режимов заряда и термостабилизации при температурах ниже $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. В свою очередь, ионисторы лишены перечисленных выше недостатков. Так, диапазон рабочих температур ионисторов находится в пределах от минус $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, а число циклов заряда-разряда достигает 10^6 [7]. Более того, ионисторы не требуют обслуживания при эксплуатации, что актуально для труднодоступных территорий.

На рисунке 2 представлена разработанная электрическая схема автономного устройства питания катодной защиты с использованием ионисторного модуля.

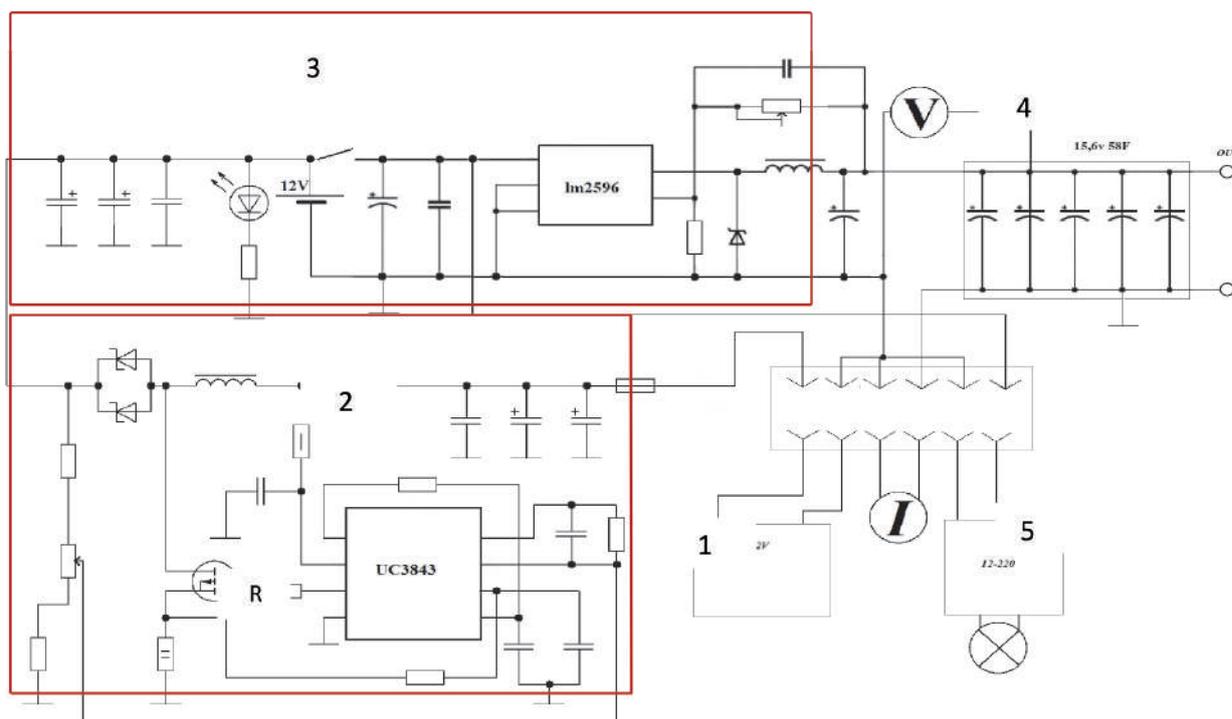


Рисунок 2. Электрическая схема устройства катодной защиты с автономным источником питания

Электрическая схема устройства состоит из следующих основных блоков: 1 — источник электрической энергии; 2 — повышающий преобразователь напряжения для заряда аккумулятора; 3 — понижающий преобразователь ионисторного модуля; 4 — ионистор; 5 — силовой инвертор.

На основе разработанной электрической схемы было собрано автономное устройство для питания катодной защиты. Силовая часть устройства представлена на рисунке 3.

Электрическая энергия поступает от ветрогенератора 1 на повышающий преобразователь напряжения 2, который обеспечи-



Рисунок 3. Автономное устройство для питания катодной защиты

вает стабильное выходное напряжение, исходя из параметров аккумулятора. Для данной установки был взят аккумулятор Delta DTM 1207 с выходным напряжением 12 В и емкостью 7 Ач.

Схема преобразователя напряжения построена на базе ШИМ-контроллера UC3843, который через резистор R управляет затвором полевого транзистора, устанавливая прямоугольные импульсы с примерной частотой 120 кГц и КПД около 93 %. Данный преобразователь напряжения может работать от минимального значения напряжения $U_{\min} = 9$ В до установленного максимального напряжения на выходе $U_{\max} = 14,4$ В. При этом максимальная выходная сила тока I_{\max} составляет 5 А.

Преобразователь напряжения заряжает аккумулятор устройства, об этом будет сигнализировать светодиодный индикатор.

В процессе работы установки напряжение с аккумулятора поступает на импульсный источник питания — повышающий преобразователь 3, обеспечивающий процесс заряда ионистора. Для установки был взят ионистор фирмы Maxwell BMOD0058 E016 B02 емкостью $C = 58$ Ф и номинальным напряжением $U = 15,6$ В. Понижающий преобразователь, имеющий регулируемое устанавливаемое напряжение на выходе от 0,15 В до напряжения на аккумуляторе, построен на базе микросхемы LM2596, которая при своих минимальных размерах позволяет получить требуемый высокий выходной ток и обеспечить зарядный ток ионистора I_3 до 4 А.

С помощью осциллографа были получены следующие электрические зависимости силы тока и напряжения на выходе ионистора (рисунок 4).

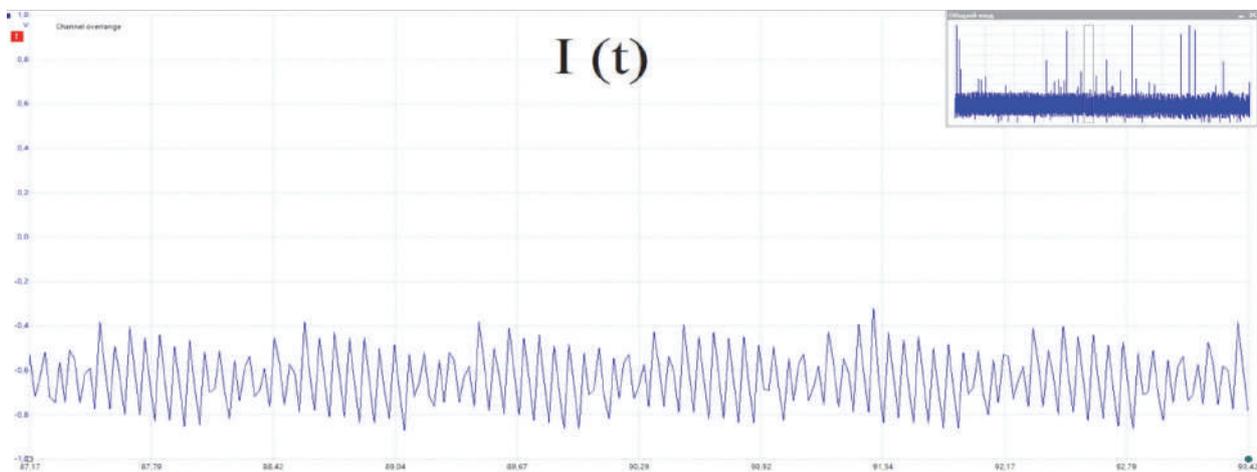
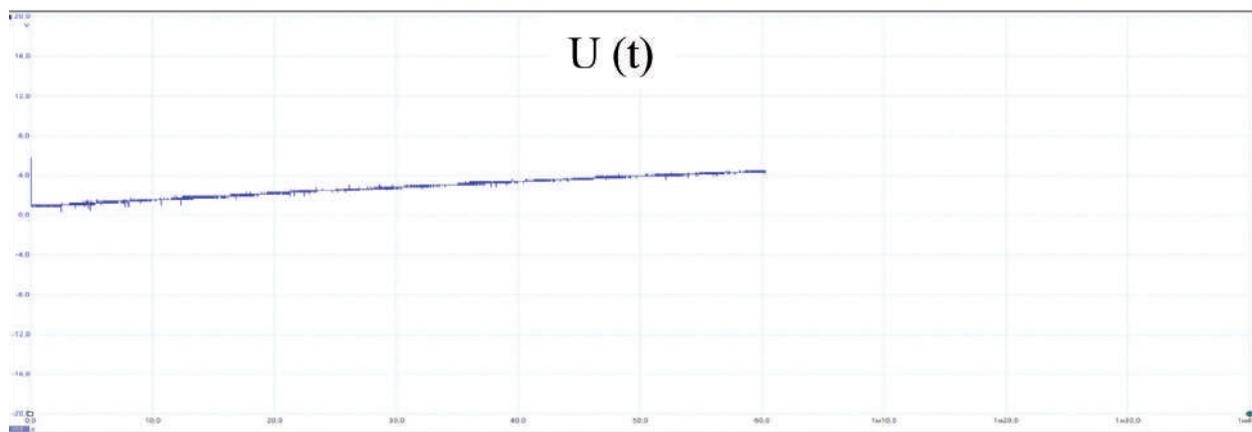
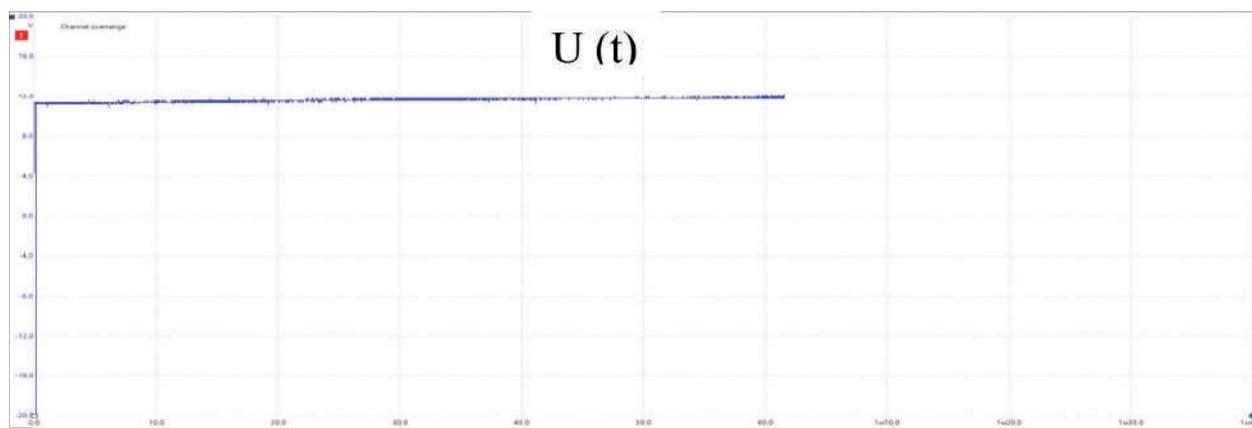


Рисунок 4. Осциллограмма зарядного тока ионистора с модуля



а)



б)

Рисунок 5. Зависимость выходного значения установленного напряжения на ионисторе: начало процесса заряда ионистора (а), установившееся напряжение (б)

На рисунке 5 представлена зависимость напряжения ионистора от времени заряда. Напряжение экспоненциально возрастает до установленного значения 12 В.

Так как ионистор — очень энергоемкое устройство, дающее высокий защитный ток, возможно подключение резервного питания от аккумулятора на случай аварии, ремонта или нештатных ситуаций.

Выводы

1. В разработанном авторами испытательном макете станции катодной защиты конструктивно реализована максимальная простота, при этом повышена ее надежность за счет внедрения в систему ионисторного

модуля, а также расширены эксплуатационные возможности.

2. Сконструированный источник электрической энергии на основе ионисторного модуля будет иметь стабильные выходные электрические сигналы. При сравнении с существующими аналогами имеет следующие преимущества:

- отсутствие необходимости постоянного обслуживания;
- широкий диапазон рабочих температур: от минус 45 °С до 70 °С;
- стабильный выходной электрический сигнал.

Список литературы

1. ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Изд-во стандартов, 1998. 18 с.
2. Ермаков А.В. Разработка и испытания композиционных анодных заземлителей для

электрохимической защиты от коррозии // Территория Нефтегаз. 2013. № 11. С. 30–37.

3. Труднев С.Ю., Шуваева А.О. Исследование работы импульсного стабилизатора напряжения для питания катодной защиты морских платформ // Вестник Гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. 2018. № 4 (50). С. 818–827.

4. Жолудева Ю.К., Мальцев М.В. Математическая модель ветрогенератора // Научный альманах. 2017. № 4 (30). С. 63–67.

5. Arcangelo M. Local Diagnoses in Modal Analysis through Additional Poles // *Mechanic of Advanced Materials and Structures*. 2017. Vol. 24, No. 6. P. 271–286.

6. Кузнецов В.П., Панькина О.С., Мачковская Н.И. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство // *Компоненты и технологии*. 2005. № 6.

7. Dar M., Yusuf A. Experimental Study on Innovative Sections for Cold Formed Steel Beams // *Steel and Composite Structures*. 2015. Vol. 19, No. 6. P. 545–554.

References

1. GOST R 51164-98. *Truboprovody stal'nyye magistral'nyye. Obshchiye trebovaniya k zashchite ot korrozii* [State Standard R 51164-98. Steel Main Pipelines. General Requirements for Corrosion Protection]. Moscow, Izd-vo standartov, 1998. 18 p. [in Russian].

2. Yermakov A.B. Razrabotka i ispytaniya kompozitsionnykh anodnykh zazemlitley dlya elektrokhimicheskoy zashchity ot korrozii [Development and Testing of Composite Anode Grounding Conductors for Electrochemical Corrosion Protection]. *Territoriya Neftegaz — Territory Neftegaz*, 2013, No. 11, pp. 30–37. [in Russian].

3. Trudnev S.Yu., Shuvayeva A.O. Issledovaniye raboty impul'snogo stabilizatora napryazheniya dlya pitaniya katodnoy zashchity morskikh platform [The Investigation of Operation Pulse Voltage Regulator for Supplying Cathodic Protection of Offshore Rigs]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova — The Scientific Journal «Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova»*, 2018, No. 4 (50), pp. 818–827. [in Russian].

4. Zholudeva Yu.K., Mal'tsev M.V. Matematicheskaya model' vetrogeneratora [Mathematical Model of a Wind Generator]. *Nauchnyy al'manakh — Scientific Almanac*, 2017, No. 4 (30), pp. 63–67. [in Russian].

5. Arcangelo M. Local Diagnoses in Modal Analysis through Additional Poles. *Mechanic of Advanced Materials and Structures*, 2017, Vol. 24, No. 6, pp. 271–286.

6. Kuznetsov V.P., Pan'kina O.S., Machkovskaya N.I. Kondensatory s dvoynym elektricheskim sloyem (ionistory): razrabotka i proizvodstvo [Capacitors with a Double Electric Layer (Ionistors): Development and Production]. *Komponenty i tekhnologii — Components and Technologies*, 2005, No. 6. [in Russian].

7. Dar M., Yusuf A. Experimental Study on Innovative Sections for Cold Formed Steel Beams. *Steel and Composite Structures*, 2015, Vol. 19, No. 6, pp. 545–554.



Ле Ван Тунг
Le Van Tung

аспирант кафедры «Электроэнергетика и электромеханика», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация



Буй Чунг Кьен
Bui Trung Kien

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника», Куангниньский промышленный университет, г. Куангнинь, Социалистическая Республика Вьетнам

УДК 621.314.57

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-54-61

ПРЯМОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТОКОМ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ПОВЫШЕНИЕМ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА НЕПОСРЕДСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В настоящее время частотные преобразователи с диодными выпрямителями широко используются благодаря таким преимуществам, как отсутствие блока управления, низкая стоимость, недорогой ремонт, высокая эффективность передачи напряжения. Однако диодный выпрямитель имеет недостаток, заключающийся в том, что он создает гармоники в сети, энергия обменивается только в одном направлении, коэффициент мощности низкий. Исследование преобразователей частоты с использованием полностью управляемых выпрямителей или активных выпрямителей имеет много преимуществ по сравнению с неуправляемыми выпрямителями (диодными мостами). Выпрямитель с широтно-импульсной модуляцией методом управления напряжением для обеспечения синусоидального входного тока характеризуется следующими параметрами: коэффициент мощности $\cos \varphi = 1$; стабильность напряжения постоянного тока на выходе; обмен энергией между нагрузкой и сетью двунаправленный. Сначала необходимо рассчитать напряжение, а затем управлять током, обеспечивая ток вдоль координатной оси $i_q = 0$, соответствующий коэффициенту мощности $\cos \varphi = 1$.

В статье анализируются преимущества метода управления током в цепи выпрямителя в сочетании с инвертором при работе с двигателем переменного тока. Метод прямого управления моментом двигателя улучшается путем выбора новой таблицы переключения, заменяющая базовую таблицу переключения на 6 секторов напряжения. Следовательно, регулятор момента поддерживает электромагнитный момент и уменьшает ошибки во время работы при изменении момента нагрузки. Чтобы сформировать целостную систему электропривода с улучшенной рабочей эффективностью, необходимо объединить источник — цепь активного выпрямителя — инвертор — двигатель — нагрузку. Имитационное моделирование выполнялось в Matlab & Simulink. Результаты моделирования и их анализ представлены в статье.

Ключевые слова: трехфазный ШИМ выпрямитель, управление током, прямое управление моментом, трехфазный инвертор, имитационное моделирование, Matlab & Simulink.

DIRECT CURRENT CONTROL OF THE ACTIVE RECTIFIER WITH IMPROVE METHOD DIRECT TORQUE CONTROL AC MOTOR

Currently, frequency converters with diode rectifiers are widely used due to such advantages as the absence of a control unit, low cost, low repair, high transmission efficiency. However, the diode rectifier has the disadvantage that it creates harmonics in the network, energy is exchanged in only one direction, and the power factor is low. The study of frequency converters using a fully controllable rectifier or active rectifier has many advantages over uncontrolled rectifiers (diode bridges). A rectifier with pulse-width modulation by the voltage control method to ensure a sinusoidal input current is characterized by the following parameters: power factor $\cos \varphi = 1$; stability of DC voltage at the output; the energy exchange between the load and the grid is bidirectional. First you need to calculate the voltage, and then control the current, providing a current along the coordinate axis $i_q = 0$, corresponding to the power factor $\cos \varphi = 1$. The article analyzes the advantages of the method of controlling the current in the rectifier circuit in combination with an inverter when working with an AC motor. The direct motor torque control method is improved by selecting a new switching table, replacing the basic switching table with six voltage sectors. Therefore, the torque regulator maintains the electromagnetic moment and reduces errors during operation when the load torque changes. In order to form a complete electric drive system with improved working efficiency, it is necessary to combine the source — active rectifier circuit — inverter — motor — load. The simulation was performed in Matlab & Simulink. The simulation results and their analysis are presented in the article.

Key words: three-phase PWM rectifier, current control, direct torque control, three-phase inverter, simulation modeling, Matlab & Simulink.

Введение

В настоящее время активные выпрямители напряжения (АВН) с использованием переключателей IGBT с быстрой частотой переключения разрабатываются и применяются в преобразователях частоты. Эти выпрямители управляют током заряда конденсатора как по амплитуде, так и по фазе. Необходимо убедиться, что коэффициент мощности $\cos \varphi = 1$ на входе, обмен энергией между нагрузкой и сеткой в двух направлениях и низкий гармонический ток [1, 2].

Метод управления активным выпрямителем сетевого тока Direct Current Control (DCC) по положению обобщенного вектора сетевого напряжения Voltage Oriented Control (VOC) с преимущественно постоянной частотой переключения, поэтому блок входного фильтра имеет простую конструкцию и используется метод модуляции ШИМ, что обеспечивает низкую стоимость.

Комбинирование активного выпрямителя с инвертором для управления скоростью двигателя трехфазного переменного тока обеспечивает обмен энергией в двух направлениях между сетью и нагрузкой.

Во время работы двигатель может работать в режиме двигателя или генератора.

Метод прямого управления моментом (DTC — Direct Torque Control) имеет преимущество работы на низкой скорости, магнитный момент быстро меняется в соответствии с моментом нагрузки, момент от слишком маленькой регулировки, постоянная частота переключения [3, 4]. В статье представлен метод управления DTC, для которого используется таблица переключения, имеющая 12 секторов напряжений, в отличие от таблицы переключателя, имеющей 6 секторов напряжений. Это увеличивает рабочую скорость регулятора момента и магнитного потока, поскольку момент нагрузки постоянно меняется (рисунок 1).

Сочетание метода управления активным выпрямителем с инвертором и прямого управления моментом двигателя улучшит качество передачи электропривода на практике.

Метод управления током (DCC)

Структура управления DCC использует токовый контур управления, основанный на преобразовании между фиксированной системой координат α - β и вращающейся системой координат d - q . Управляющая структура DCC использует токовый контур управления, основанный на преобразовании

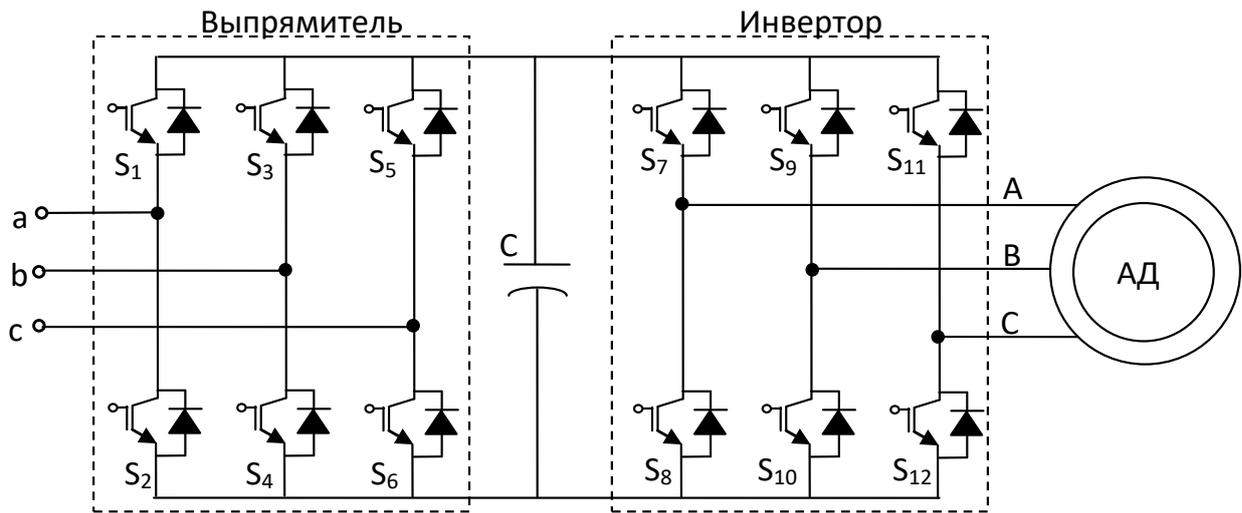


Рисунок 1. Схема преобразователя частоты с активным выпрямителем

между фиксированной системой координат α - β и вращающейся системой координат d - q . Измерение тока и напряжения в системе координат abc сначала преобразуется в статическую систему координат α - β , затем преобразуется во вращающуюся систему координат d - q , как показано на рисунке 2 [5, 6].

На рисунке 2: n — нагрузка; PI — ток регулятора по оси d - q и регулятор постоянного тока; PWM — генератор импульсов управления IGBT; L — индуктивное сопротивление катушки; ИТиОН — измерение тока и оценка напряжения.

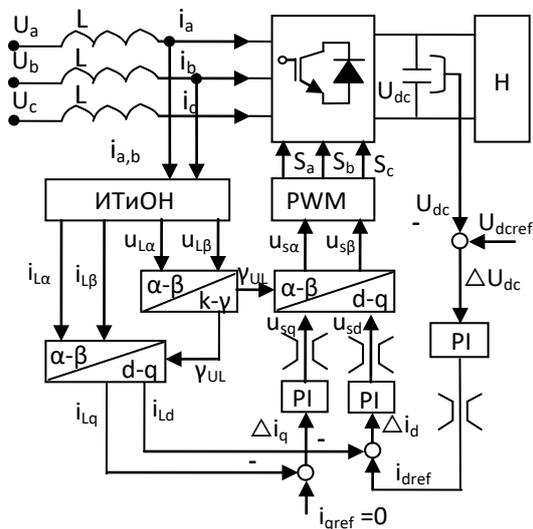


Рисунок 2. Схема управления активным выпрямителем

В системе координат d - q напряжение сети рассчитывается следующим образом:

$$u_{Ld} = Ri_{Ld} + L \frac{di_{Ld}}{dt} + u_{sd} - \omega Li_{Lq}, \quad (1)$$

$$u_{Lq} = Ri_{Lq} + L \frac{di_{Lq}}{dt} + u_{sq} + \omega Li_{Ld}. \quad (2)$$

Полагая, что входное сопротивление очень мало по сравнению с входной индуктивностью, формула преобразуется в:

$$u_{Ld} = L \frac{di_{Ld}}{dt} + u_{sd} - \omega Li_{Lq}, \quad (3)$$

$$u_{Lq} = L \frac{di_{Lq}}{dt} + u_{sq} + \omega Li_{Ld}. \quad (4)$$

Ток i_{qref} установлен на 0, чтобы всегда гарантировать, что коэффициент мощности на входе всегда равен 1, и в результате получается формула:

$$u_{Ld} = L \frac{di_{Ld}}{dt} + u_{sd}, \quad (5)$$

$$0 = u_{sq} + \omega Li_{Ld}. \quad (6)$$

В управляющей структуре значение тока i_{qref} является постоянным, цель состоит в том, что для близкого управления требуется интегральная фаза для устранения статических отклонений. Поэтому выберем регулятор тока с структурой PI , чтобы устранить шум и устранить статическое отклонение. При разделении тока по двум осям d - q между осями будет индуктивное напряжение. Чтобы устранить эти перекрестные компоненты, мы используем разделитель каналов, как показано на рисунке 3.

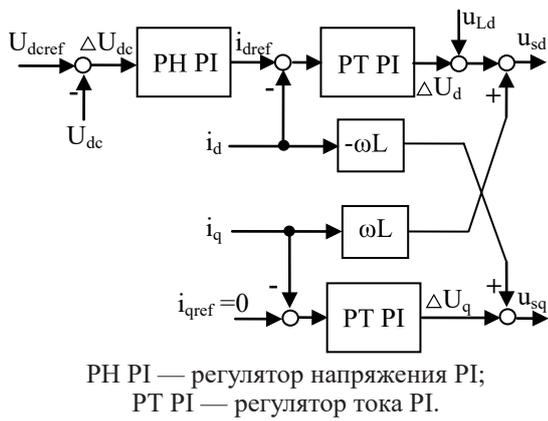


Рисунок 3. Управление разделным током активного выпрямителя

Совершенствование метода прямого управления моментом трехфазного асинхронного двигателя

В настоящее время метод прямого управления моментом DTC широко используется в промышленности. Преимущества состоят в следующем: очень малое время отклика момента, отсутствие необходимости переноса системы координат, высокая надежность и возможность использовать формулы для определения скорости вращения ротора без использования датчика скорости.

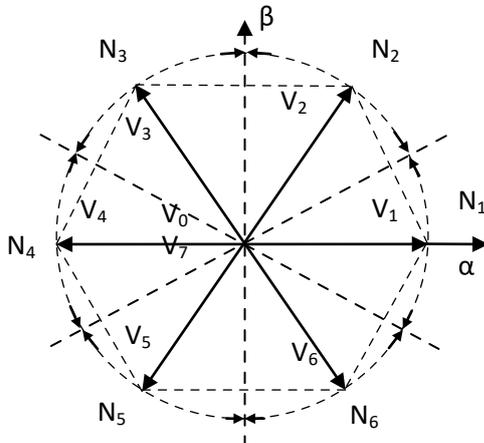


Рисунок 4. Разбиение фазовой плоскости на 6 секторов

Прямое управление моментом всегда гарантирует, что амплитуды вектора потока статора и момента находятся в допустимом диапазоне. Ошибка между двумя этапами расчета зависит от частоты дискретизации. Основным методом управления DTC с использованием таблицы из шести секторов (рисун

ок 4) имеет много недостатков, таких как создание только двух областей управления: увеличение и уменьшение момента, поэтому отклик контроллера будет медленным, когда момент загрузки часто меняется [7].

Таблица 1. Таблица переключений коммутаторов на 6 секторов

dΨ	dM	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆
FI	MI	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₁
	M	V ₀	V ₇	V ₀	V ₇	V ₀	V ₇
	MD	V ₆	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅
FD	MI	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₁	V ₂
	M	V ₇	V ₀	V ₇	V ₀	V ₇	V ₀
	MD	V ₅	V ₆	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄

В этой статье предлагается новая таблица переключения с 12 секторами напряжения, которые будут генерировать 4 области управления соответственно: зона резкого снижения момента (D), зона легкого снижения момента (SD), зона легкого увеличения момента (SI), зона резкого повышения момента (I). Таким образом, контроллер будет реагировать быстрее, когда колебания крутящего момента и амплитуды поддерживаются на необходимом уровне, процесс управления будет более точным (рисунок 5).

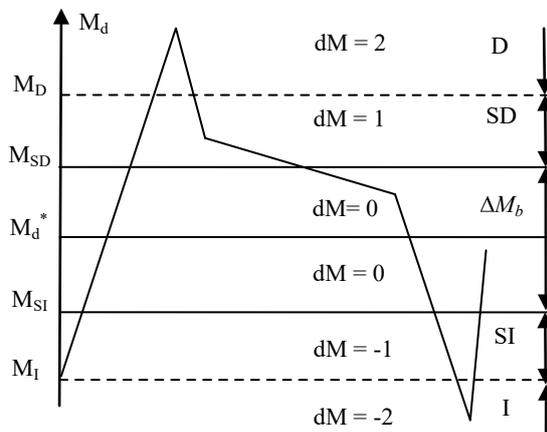


Рисунок 5. Область управления моментом M_d

$$\Delta M = M_d^* - M_d,$$

где M_d — действующее значение момента на валу двигателя; M_d* — задание по моменту; ΔM — зона нечувствительности регулятора момента.

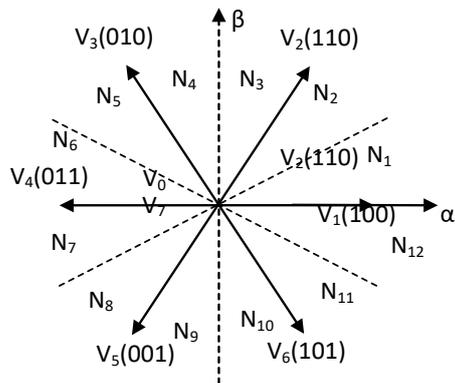


Рисунок 6. Разбиение фазовой плоскости на 12 секторов

В системе DTC в контуре регулирования момента необходимо использовать 4-уровневый регулятор. Статическая характеристика такого регулятора показана на рисунке 7.

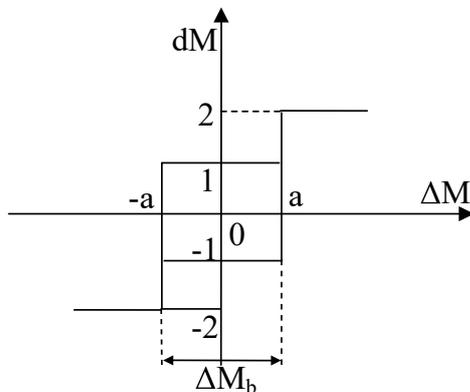


Рисунок 7. Статическая характеристика четырехпозиционного регулятора момента

Выходной сигнал 4-уровневого регулятора в зависимости от величины расогласования объясняется следующим образом:

$$dM = 2, \text{ если } \Delta M > M_D - M_d;$$

$$dM = 1, \text{ если } 0,5(M_D - M_d) < \Delta M < M_{SD};$$

$$dM = 0, \text{ если } \Delta M < 0,5(M_{SD} - M_{SI});$$

$$dM = -1, \text{ если } -M_{SI} < \Delta M < 0,5(M_I - M_d);$$

$$dM = -2, \text{ если } \Delta M < M_I - M_d.$$

Из приведенных выше соображений видно, что регулятор момента представляет собой четырехпозиционное реле с зоной нечувствительности. Границы установки реле (dM_1 , dM_2 , $-dM_2$, $-dM_1$) соответствуют заданиям по малому и резкому уменьшению момента, а также резкому и малому увеличению момента (рисунок 7).

Таким образом, амплитуда момента поддерживается на требуемом уровне, а точность управления повысится. Таблица переключений при 12-секторном разбиении фазовой плоскости четырехпозиционного регулятора момента показана в таблице 2.

Таблица 2. Таблица переключений коммутаторов с 12 секторами

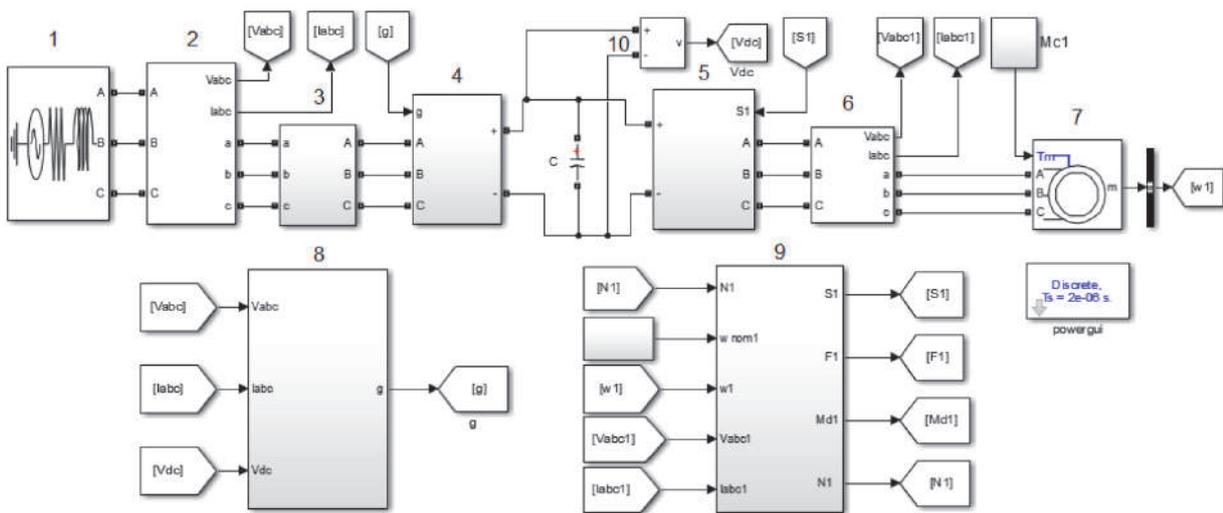
$d\psi$	dM	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}	N_{11}	N_{12}
FI	$M_I = 2$	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2
	$M_{SI} = 1$	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1
	$M_{SD} = -1$	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6
	$M_D = -2$	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6
FD	$M_I = 2$	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3
	$M_{SI} = 1$	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3
	$M_{SD} = -1$	V_7	V_5	V_0	V_6	V_7	V_1	V_0	V_2	V_7	V_3	V_0	V_4
	$M_D = -2$	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5

Таблица 3. Параметры асинхронного двигателя

Мощность, кВт	2,2
Напряжение, В	220/380
Частота, Гц	50
Частота вращения, об/мин	1436
Момент инерции (J), кг·м ²	0,05
Момент загрузки (Mc), Н·м	14,6

Таблица 4. Параметры активного выпрямителя

Источник напряжения, В	220
Частота сети, Гц	50
Ток I_{dc} , А	15
Конденсатор на выходе (C), μF	3900
Индуктивность на входе (L), Гн	0,005
Постоянное напряжение на выходе (U_{dc}), В	690



1 — трехфазный источник; 2, 6 — датчики тока и напряжения; 3 — реактор; 4 — активный выпрямитель (IGBT); 5 — инвертор (IGBT); 7 — асинхронный двигатель; 8 — синтетический блок управления выпрямителем; 9 — синтетический блок прямого управления моментом двигателя; 10 — датчик постоянного напряжения; Mc1 — момент нагрузки

Рисунок 8. Схема управления DTC с активным выпрямителем

Результаты моделирования

Для оценки качества работы выпрямителя и инвертора предположим, что скорость и момент возрастают, а затем резко уменьшаются. Это два наиболее серьезных изменения, когда асинхронный двигатель работает (рисунки 9, 10). Результаты исследования представлены на рисунках 11–21.

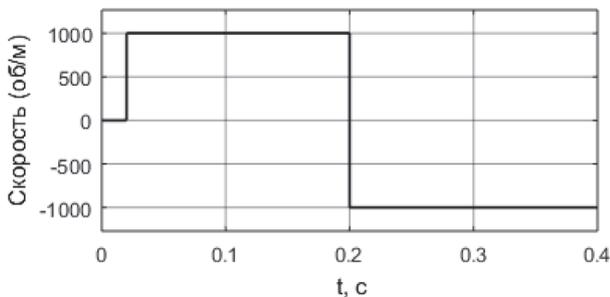


Рисунок 9. Заданная скорость

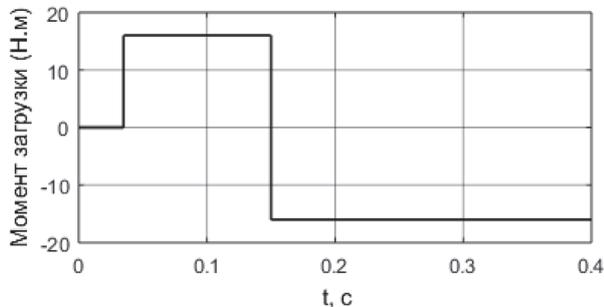


Рисунок 10. Момент нагрузки

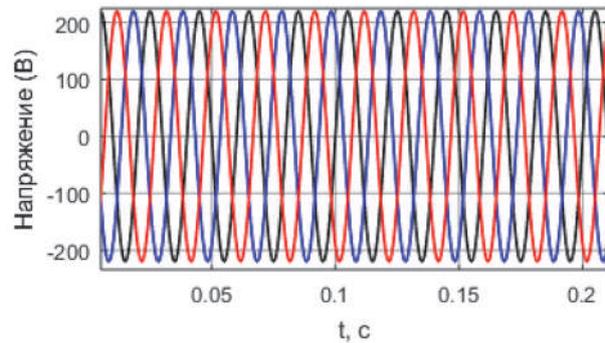


Рисунок 11. Напряжение на входной АВН

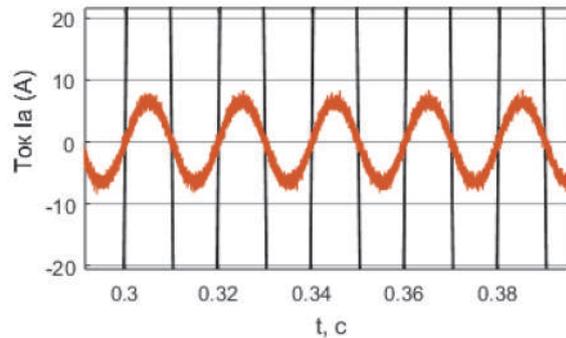


Рисунок 12. Ток на входной АВН (ток и напряжение имеют одинаковый фазный угол)

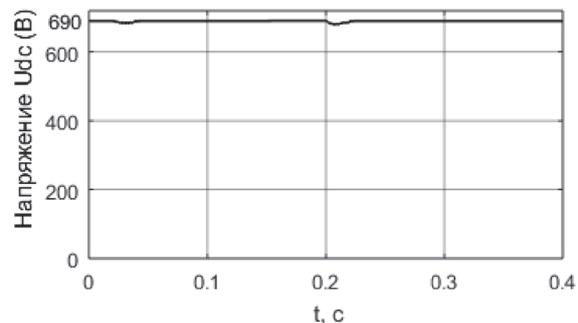


Рисунок 13. Постоянное напряжение на выходной АВН

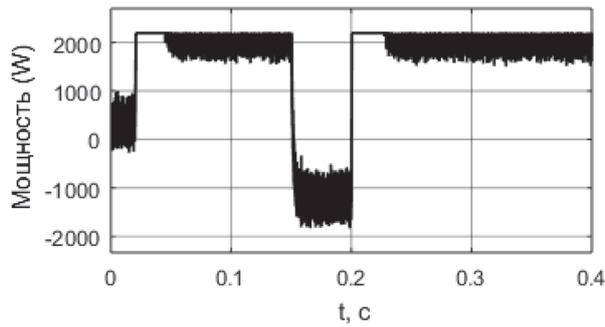


Рисунок 14. Активная мощность на входной АВН

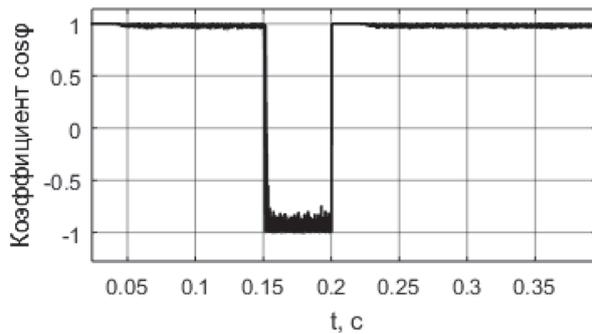
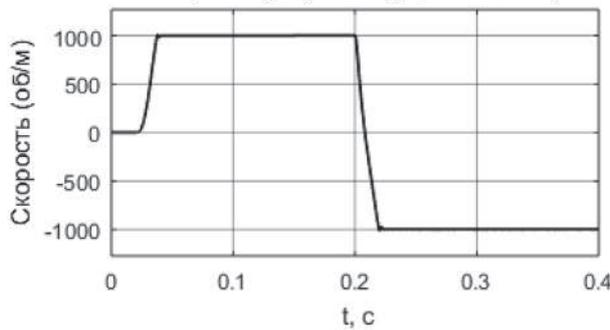
Рисунок 15. Характеристика коэффициента мощности $\cos\varphi$ 

Рисунок 16. Характеристика скорости работы

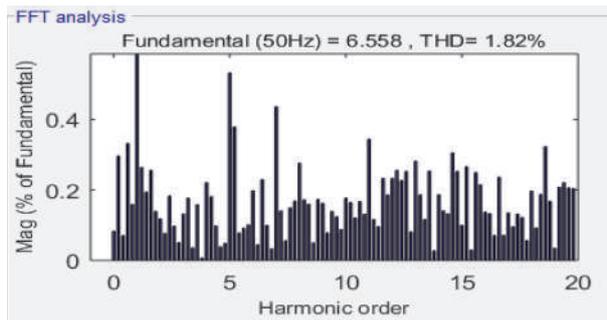


Рисунок 17. Коэффициент искажения тока на входе

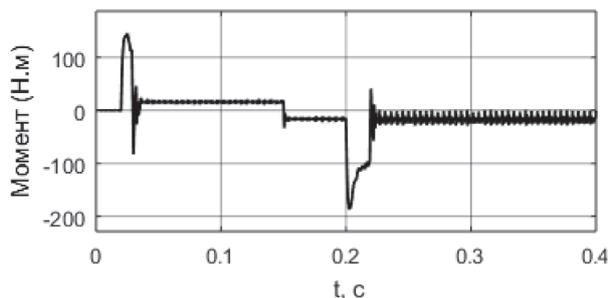


Рисунок 18. Графики момента с 6 сдвинутыми секторами

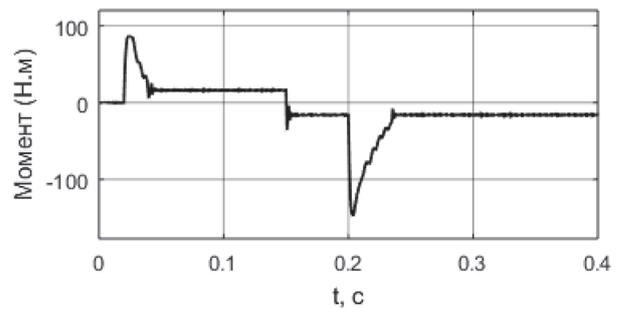


Рисунок 19. Графики момента с 12 секторами

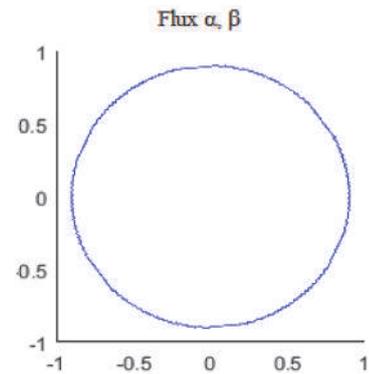


Рисунок 20. Годограф потокосцепления с 6 сдвинутыми секторами

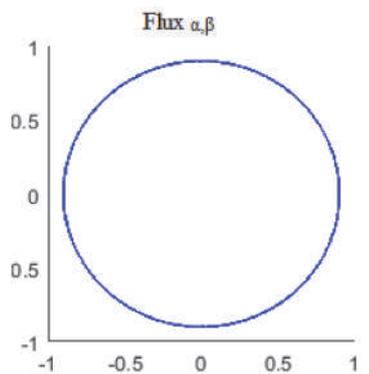


Рисунок 21. Годограф потокосцепления с 12 секторами

Выводы

Теоретический анализ и результаты, полученные в MathLab, показывают, что преобразователь частоты с активным выпрямителем имеет много преимуществ по сравнению с преобразователем частоты, использующим выпрямитель диода на практике. Выпрямитель с широтно-импульсной модуляцией методом управления напряжения характеризуется обменом энергией в двух направлениях между сетью и нагрузкой, коэффициент мощности равен 1, ток синусоидальной сети.

Метод управления DTC обеспечивает качество системы электропривода, поскольку скорость всегда соответствует заданному

значению, магнитный момент быстро реагирует на изменения момента нагрузки. Предложен метод управления ДТС в преобразовании частоты 4Q путем изучения таблицы переключения управляющего напряжения для увеличения скорости отклика магнитного момента по сравнению с изменением нагрузки.

Список литературы

1. Шрейнер Р.Т. Прогнозирующее релейно-векторное управление активным выпрямителем напряжения // Электротехника. 2001. № 12. С. 47–52.
2. Malinowski M. *Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifiers*. Ph. D. Thesis. Warsaw, 2001. P. 1–128.
3. Hableter T.G., Profumo F., Pastorelli M., Tolbert L.M. Direct Torque Control of Induction Machines Using Space Vector Modulation // *IEEE Trans. Ind. Applicat.* 1992. Vol. 28. P. 1045–1053.
4. Bogdan. Y., Le Van Tung. Research on the Switching Algorithm of Voltage Vectors in the Direct Torque Control System // *IEEE Trans.* 2018. P. 80–87.
5. Howmik S. Sensorless Current Control for Active Rectifiers // *IEEE-IAS Conf.* 1996. P. 898-905.
6. Чаплыгин Е.Е. Двухквadrантные преобразователи с активной коррекцией коэффициента мощности // *Практическая силовая электроника*. 2003. № 10. С. 9–16.
7. Безносенко Д.М. Математическая модель системы прямого управления моментом частотно-регулируемого асинхронного электропривода // *Известия вузов. Приборостроение*. 2004. Т. 47. № 11. С. 16–23.

References

1. Shreyner R.T. *Prognoziruyushcheye releyno-vektornoye upravleniye aktivnym vypryamitelem napryazheniya* [Predictive Relay Vector Control of an Active Voltage Rectifier]. *Elektrotekhnika – Electrical Engineering*, 2001, No. 12, pp. 47–52. [in Russian].
2. Malinowski M. *Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifiers*. Ph. D. Thesis. Warsaw, 2001. P. 1–128.
3. Hableter T.G., Profumo F., Pastorelli M., Tolbert L.M. Direct Torque Control of Induction Machines Using Space Vector Modulation. *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, 1992, Vol. 28, pp. 1045–1053.
4. Bogdan. Y., Le Van Tung. Research on the Switching Algorithm of Voltage Vectors in the Direct Torque Control System. *IEEE Trans.*, 2018, pp. 80–87.
5. Howmik S. Sensorless Current Control for Active Rectifiers. *IEEE-IAS Conf.* 1996, pp. 898-905.
6. Chaplygin Ye.Ye. *Dvukhkvadrantnyye preobrazovateli s aktivnoy korrektsiyey koeffitsiyenta moshchnosti* [Two-Quadrant Converters with Active Power Factor Correction]. *Prakticheskaya silovaya elektronika — Practical Power Electronics*, 2003, No. 10, pp. 9–16. [in Russian].
7. Beznosenko D.M. *Matematicheskaya model' sistemy pryamogo upravleniya momentom chastotno-reguliruyemogo asinkhronnogo elektroprivoda* [A Mathematical Model of a System for Direct Control of the Torque of a Frequency-Controlled Asynchronous Electric Drive]. *Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye — Journal of Instrument Engineering*, 2004, Vol. 47, No. 11, pp. 16–23. [in Russian].



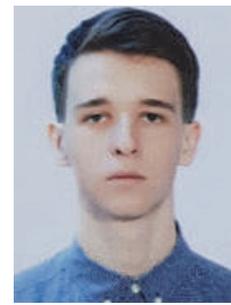
Муравьева Е. А.
Muraveva E. A.

доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация



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



Кубряк А. И.
Kubryak A. I.

студент 4 курса кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

УДК 621.395.66

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-62-68

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДОБЫЧИ НА НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

На протяжении достаточно долгого периода прослеживается тенденция к повышению выработываемости месторождений, поэтому повышение нефтеотдачи месторождений является основной задачей для топливно-энергетического комплекса.

В настоящее время нейронные сети находят все большее применение в различных отраслях. Преимуществом нейронных сетей является работа с большим количеством данных, однако для ее работы должно быть достаточно собранных и подготовленных наборов данных, за счет чего и достигается высокая точность решения.

При разработке нефтяных и газовых месторождений главной задачей является обеспечение максимальной добычи с экономической и физической точек зрения. Добыча нефти на нефтегазовых месторождениях различается по объемам, сложности, условиям эксплуатации и т.д., поэтому необходимо находить оптимальные условия добычи для каждого месторождения.

На данный момент основными проблемами при добыче нефти на нефтегазовых месторождениях являются: длительное время обработки данных, собираемых со скважин, повышенные риски эксплуатации этих скважин, а также невысокое количество добываемой нефти.

Основной целью данного исследования является разработка метода с использованием искусственного интеллекта для управления процессом добычи на нефтегазовых месторождениях с учетом перечисленных выше факторов с целью максимизации добычи нефти.

В ходе данного исследования разработана нейронная сеть прямого распространения, которая применяется для повышения добычи нефти на нефтегазовых месторождениях, с учетом всех факторов. Полученная нейронная сеть, без перенастройки весов связей, формирует выходные сигналы при подаче на вход сети любого набора входных сигналов из обучающего множества.

Полученная нейронная сеть выражает закономерности, которые присутствуют во входных данных. Данная сеть оказывается функциональным эквивалентом некоторой модели зависимостей между переменными.

Ключевые слова: нефть, добыча, скважина, месторождение, нейронная сеть, повышение эффективности, управление, оптимизация, разработка, Matlab.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CONTROLLING THE PRODUCTION PROCESS IN OIL AND GAS FIELDS USING NEURAL NETWORKS

For a long time there has been a tendency to increase field productivity, therefore, increasing oil recovery is the main task for fuel and energy complex.

Currently, neural networks are increasingly used in various industries. The advantage of neural networks is to work with a large amount of data, however, for its work there must be enough collected and prepared data sets, due to which high accuracy of the solution is achieved.

When developing oil and gas fields, the main task is to ensure maximum production from an economic and physical point of view. Oil production at oil and gas fields varies in volume, complexity, operating conditions, etc., therefore, it is necessary to find the optimal production conditions for each field.

At the moment, the main problems in oil production at oil and gas fields are: the long processing time of data collected from wells, the increased risks of operating these wells, as well as the low amount of oil produced.

The main objective of this study is to develop a control method using artificial intelligence to control the production process in oil and gas fields, taking into account all factors, in order to maximize oil production.

In the course of this study, direct transmission to the neural network was obtained, which allows oil to be extracted at oil and gas fields, taking into account all factors. The resulting neural network, without reconfiguring weighted connections, generates output signals when applied to the input to the network.

The resulting neural network expresses the patterns that are present in the input data. This network turns out to be the functional equivalent of some model of dependencies between variables.

Key words: oil, production, well, field, neural network, efficiency improvement, controlling, optimization, development, Matlab.

Повышение нефтеотдачи скважин на данный момент является основным требованием при разработке и эксплуатации нефтяных месторождений. Однако этому препятствует ряд причин, таких как малый объем добываемой нефти, медленная скорость передачи информации на пункты управления и низкая эффективность процесса закачки воды в пласт. Все эти проблемы можно попытаться решить с помощью искусственного интеллекта. Нейронная сеть должна сократить количество скважин и проводимых анализов для определения характеристик месторождения, что сократит финансовые расходы и позволит сэкономить временные ресурсы.

Искусственным нейронным сетям (ИНС) с каждым днем находят новое применение. Они представляют собой наборы элементарных нейроподобных преобразователей

информации (нейронов), соединенных друг с другом каналами обмена информации для их совместной работы. Данные сети способны обрабатывать большое количество данных с высокой скоростью.

Для построения нейронной сети необходимо подготовить наборы данных, которые будут использоваться для решения поставленных проблем.

После сбора данных происходит процесс обучения нейронной сети, где уточняются значения весовых коэффициентов для отдельных узлов на основе постепенного увеличения объема входной и выходной информации. Обучение происходит до тех пор, пока ошибка не достигнет приемлемо низкого уровня. Затем проводится тестирование полученной модели ИНС на независимых примерах.

Описание технологического процесса

Все данные о добыче на месторождении, необходимые для обучения нейронной сети, получают из отдела разведки и добычи нефтяных компаний, поэтому эта информа-

ция зависит от реальных данных, полученных в ходе работы скважин. Пример сетки-карты исследуемой области, откуда берут данные, представлен на рисунке 1.

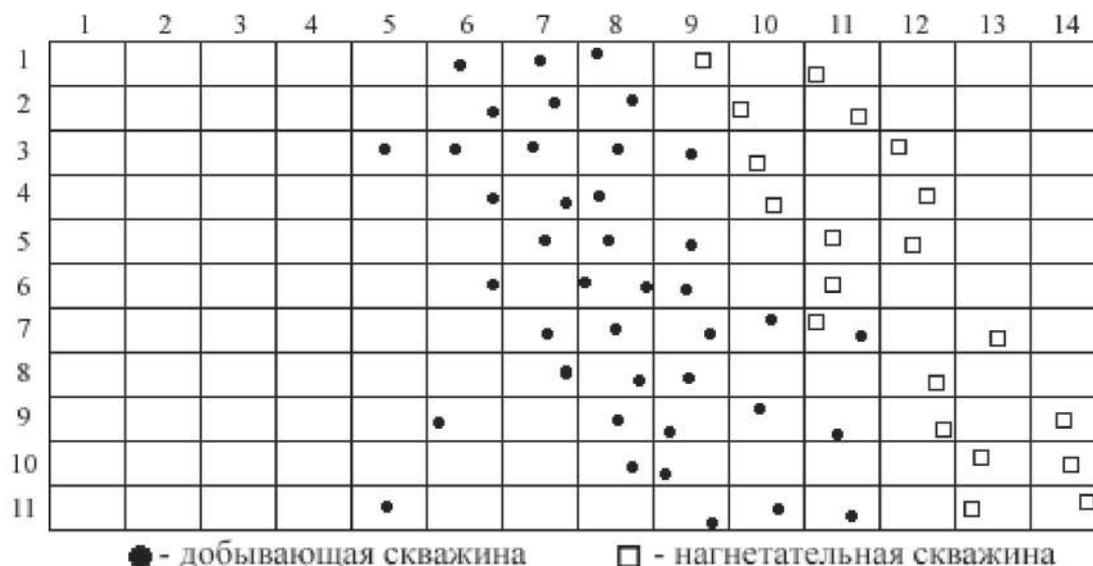


Рисунок 1. Сетка-карта исследуемой области

Входные данные имеют значения в следующих пределах:

1. Количество нагнетательных скважин — 1–5;
2. Количество добывающих скважин — 1–10;
3. Коэффициент впрыска (соотношение нагнетательных скважин к добывающим) — 0,1–5;
4. Нефтяная фракция в составе сырой нефти — 0,833667–1,0;
5. Количество закачиваемой воды, м³/день — 61685–26994661;
6. Количество выкачиваемой воды, м³/день — 521,2129–3896482.

Основными проблемами данного технологического процесса являются низкое количество добываемой нефти и малая эффективность процесса закачки воды в пласт.

Эти проблемы можно попытаться решить, если для управления процессом добычи использовать нейронную сеть. Так как благодаря быстрой передаче информации на пункты управления растет эффективность использования фонда скважин, снижаются эксплуатационные расходы, оптимизируется закачка воды в пласт, а также увеличиваются объем и скорость добычи.

Разработка системы управления на основе нейронных сетей

Разработка системы в среде Matlab R2015b началась со сбора данных, которые используются в качестве входных наборов данных, включая данные о добыче на известных скважинах. Затем были выбраны наилучшие непрерывные условия добычи, исключая периоды обслуживания, перерывы в работе и т.д.

Для сбора данных на карте расположения скважин выбирается точка, относительно которой рассматривается эксплуатация остальных скважин, затем производится сбор данных со всех рассмотренных скважин.

Суть метода заключается в том, что обрабатываются данные, полученные сразу с нескольких скважин, а не с каждой скважины по отдельности. За счет этого и способности нейронной сети обрабатывать большие значения за один раз значительно сокращается время обработки данных [1–4].

Сбор данных

Для создания обучающего набора для разрабатываемой нейронной сети будем использовать данные и формулу, полученные опытным путем:

$$V = \frac{(V_3 - V_B)}{n} * k_n * k_d * f, \quad (1)$$

где V — количество добываемой нефти; n — коэффициент впрыска (соотношение нагнетательных скважин к добывающим); V_3 , V_B — количество закачанной и выкачанной воды соответственно; k_n , k_d — количество нагнетательных и добывающих скважин соответственно; f — нефтяная фракция в составе сырой нефти.

Обработка и подготовка данных

Используя формулу (1), создадим таблицу с обучающим набором данных. Она будет состоять из 500 примеров.

Таблица 1. Обучающий набор данных

№	Вход						Выход
	Количество нагнетательных скважин	Количество добывающих скважин	Коэффициент впрыска	Нефтяная фракция в составе сырой нефти	Количество закачанной воды, м ³ /день	Количество выкачанной воды, м ³ /день	Количество добываемой нефти, м ³ /день
1	5	4	1,25	0,978875	9115227	2118141	17123181
2	5	1	5,0	0,998705	12541155	2581183	24867685
3	2	2	1,0	0,977392	9029387	2242921	2653215
4	4	6	0,7	0,955479	14140388	823860	21375754
5	3	4	0,8	0,943319	10538808	2708967	7090596
6	5	8	0,6	0,910067	16324000	963036	33550815
7	5	1	5,0	0,924735	18851974	647894	42084875
8	2	9	0,2	0,998692	11473443	166511	4065171
9	2	5	0,4	0,911984	7441365	1130555	2302143
10	5	6	0,8	0,95820	7986699	1967742	13841675
...							
991	3	2	1,5	0,951441	16370755	1643203	12611157
992	3	4	0,8	0,927891	14868662	1161867	12209675
993	5	7	0,7	0,951967	11442481	2618506	20580326
994	4	2	2,0	0,954589	14918871	309257	22313883
995	1	3	0,3	0,972896	9394286	230270	802407
996	3	2	1,5	0,903027	18597869	2682456	12934843
997	3	6	0,5	0,984803	3667167	2271887	1236668
998	4	10	0,4	0,956399	14224217	2988849	17192792
999	4	2	2,0	0,964598	13312489	196174	20243154
1000	4	8	0,5	0,904529	3148715	379702	4007444

Выбор типа и архитектуры нейронной сети

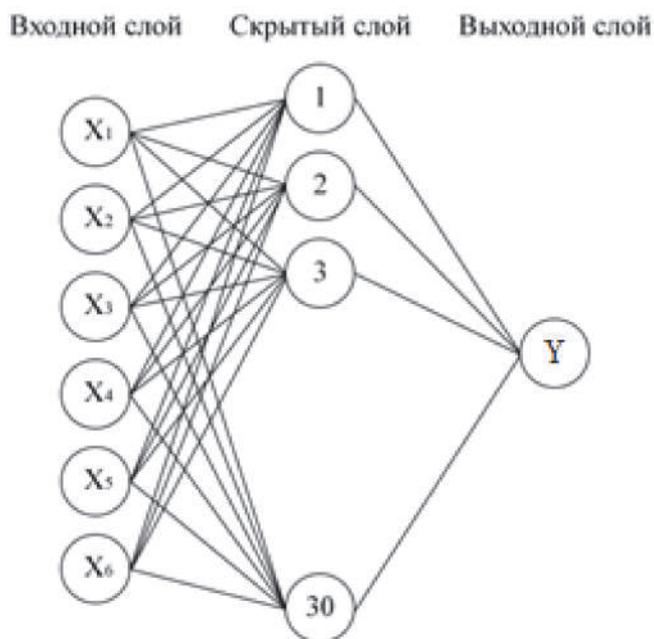
Нейронная сеть прямого распространения, представленная на рисунке 2, имеет прямолинейную структуру, она передает информацию от входа к выходу. Нейроны одного слоя связаны с нейронами другого слоя, но не связаны между собой. Обучение сети про-

На вход нейронной сети будут подаваться 6 значений:

1. Количество нагнетательных скважин;
2. Количество добывающих скважин;
3. Коэффициент впрыска (соотношение нагнетательных скважин к добывающим);
4. Нефтяная фракция в составе сырой нефти;
5. Количество закачиваемой воды;
6. Количество выкачиваемой воды.

На выходе нейронная сеть должна рассчитать количество добываемой нефти.

исходит по методу обратного распространения ошибки `trainFcn = 'trainbr'`, в котором сеть получает множества входных и выходных данных. Если у сети есть достаточное количество скрытых нейронов, то она смоделирует взаимодействие между входным и выходными данными [5].



X_{1-6} — входные данные; 1–30 — нейроны скрытого слоя;
 Y — выходное значение

Рисунок 2. Структура нейронной сети

Построение и обучение нейронной сети в Matlab

Задаем максимальное количество эпох обучения, равное 1000, которое определяет интервал времени, по прошествии которого обучение будет прекращено, количество эпох между показами равно 5, критерий окончания обучения, при котором обучение будет считаться законченным, указываем 0,0001 [6].

Далее реализуем и обучим нейронную сеть в Matlab. Для этого введем команду `uiopen`. Входные данные нейронной сети назовем `input`, а выходные — `output`. Вводим количество входных и выходных данных и количество скрытых слоев (рисунок 3).

С помощью команды `nntstart` будет реализован вход во вкладку «Обучение нейронной сети».

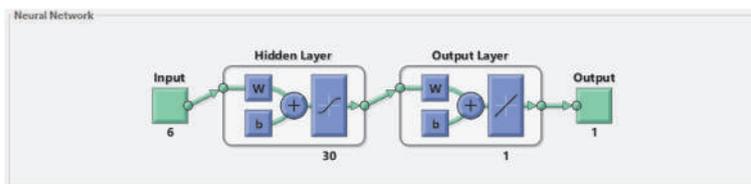


Рисунок 3. Ввод количества скрытых нейронов

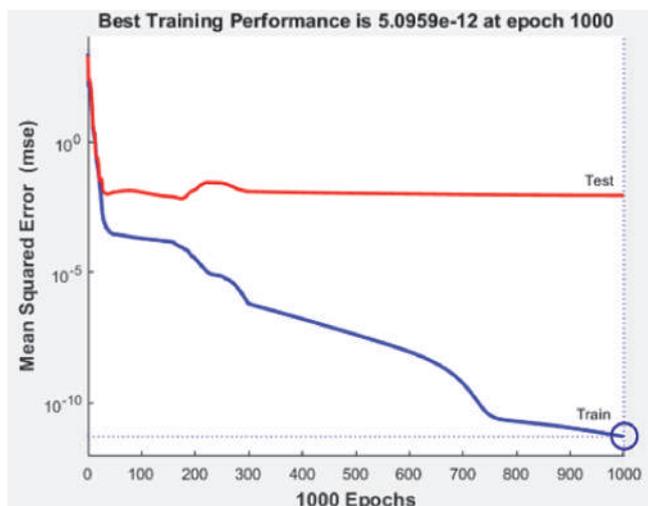


Рисунок 4. Принципиальная схема обучения нейронной сети

После обучения сети получаем график (рисунок 4), на котором показано изменение среднеквадратичной ошибки по отношению к эпохам. По графику видно, что с увеличением количества эпох для обучения и тестирования нейронной сети частота ошибок уменьшается. За 1000 эпох достигнуто значение среднеквадратичной ошибки $5,0959 \cdot 10^{-12}$.

На рисунке 5 показаны графики состояния обучения Training State. Конечное значение коэффициента градиента за 1000 эпох равно $6,6271 \cdot 10^{-5}$, что очень близко к нулю. Чем меньше значение коэффициента градиента, тем лучше будет проводиться обучение и тестирование нейронной сети.

Окончательное значение параметра обучения μ равно 50 за 1000 эпох. График μ показывает, как изменялись переменные регуляризации (μ) выбранного нами метода байесовской регуляризации. Регуляризация представляет собой диапазон числовых значений, необходимый для корректировки значений обучающей выборки и переобучения нейронной сети.

На графике «valfail» показана ошибка обучения, которая равна 0 за 1000 эпох. Ошибка обучения является показателем точности настройки модели на обучающем множестве и может использоваться в качестве условия остановки обучения при достижении указанного значения [7, 8].

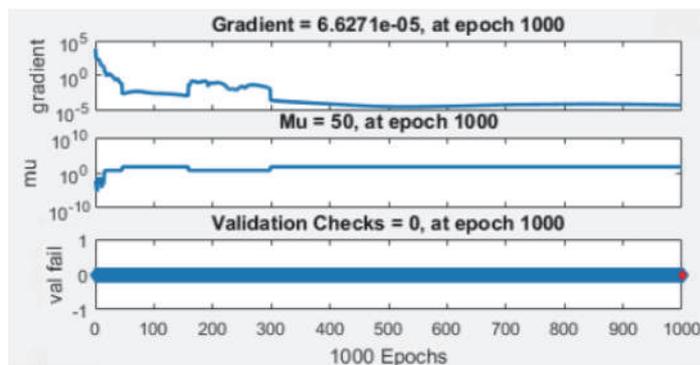


Рисунок 5. Графики обучения сети

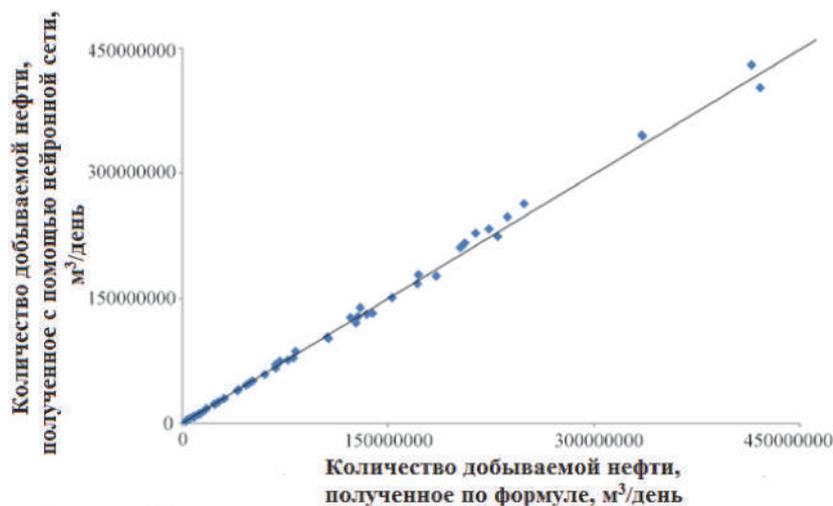


Рисунок 6. Сравнение между количеством нефти, полученным по формуле и с помощью нейронной сети

Из графика, представленного на рисунке 6, видно, что данные, получаемые с помощью нейронной сети, приближены к данным, которые получены путем расчетов, из этого следует, что нейронная система обучена корректно.

Проверка нейронной сети

Для проверки полученной нейронной сети подадим на вход 6 значений с помощью команды `sim(net,[3;6;0,5; 0,966961; 18792218; 1273693])`, в итоге получаем значение $1,5246 \cdot 10^7$, что примерно равно значению 15245757, которое получено по формуле (1).

Из этого можно сделать вывод, что нейронная сеть обучена правильно.

Выводы

Разработанный в данной статье метод управления процессом добычи нефти с использованием искусственного интеллекта помогает увеличить объемы добываемой

нефти, снижает эксплуатационные расходы и позволяет повысить эффективность процесса закачки воды в пласт. Все это позволит открыть новые возможности по разработке новых месторождений или более эффективно использовать существующие инфраструктуры.

Список литературы

1. Муравьева Е.А. Интеллектуальное управление многосвязными объектами, реализованное в ситуационных подпрограммах // Программные продукты и системы. 2012. № 4. С. 145–150.

2. Муравьева Е.А., Шарипов М.И., Каяшева Г.А., Григорьева Т.В., Боев Е.В., Афанасенко В.Г. Системы искусственного интеллекта: учеб. пособие. Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2015. 104 с.

3. Муравьева Е.А., Шарипов М.И. Интеллектуальная система управления для параметров процесса на основе нейронной сети. 2014. С. 47–51.

4. Muravyova E.A., Uspenskaya N.N. Development of a Neural Network for a Boiler Unit Generating Water Vapour Control // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). 2018. Vol. 27. No. 4. P. 297–307.

5. Муравьева Е.А., Соловьев К.А., Семибратченко А.В. Регулирование расхода с помощью нечеткого регулятора с двойной базой правил // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15. № 1. С. 210–215.

6. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления с использованием генетических алгоритмов // Приложение к журналу «Информационные технологии». 2000. № 12. 392 с.

7. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Интеллектуальные информационные системы: учебник. М.: Финансы и статистика, 2004. 423 с.

8. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. М.: Радиотехника, 2009. 392 с.

Programs]. *Programmnyye produkty i sistemy — Software Products and Systems*, 2012, No. 4, pp. 145–150. [in Russian].

2. Murav'yeva Ye.A., Sharipov M.I., Kayasheva G.A., Grigor'yeva T.V., Boyev Ye.V., Afanasenko V.G. *Sistemy iskusstvennogo intellekta: ucheb. posobiye* [Artificial Intelligence Systems: Tutorial]. Ufa, Neftegazovoye delo Publ., 2015. 104 p. [in Russian].

3. Murav'yeva Ye.A., Sharipov M.I. *Intellektual'naya sistema upravleniya dlya parametrov protsessa na osnove neyronnoy seti* [Intelligent Control System for Process Parameters Based on a Neural Network]. 2014, pp. 47–51. [in Russian].

4. Muravyova E.A., Uspenskaya N.N. Development of a Neural Network for a Boiler Unit Generating Water Vapour Control. *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*, 2018, Vol. 27, No. 4, pp. 297–307.

5. Murav'yeva Ye.A., Solov'yev K.A., Semibratchenko A.V. *Regulirovaniye raskhoda s pomoshch'yu nechetkogo regul'yatora s dvoynoy bazoy pravil* [Flow Rate Control Using Fuzzy Controller with Double Rule Base]. *Neftegazovoye delo — Petroleum Engineering*, 2017, Vol. 15, No. 1, pp. 210–215. [in Russian].

6. Vasil'yev V.I., Il'yasov B.G. *Intellektual'nyye sistemy upravleniya s ispol'zovaniyem geneticheskikh algoritmov* [Intelligent Control Systems Using Genetic Algorithms]. *Prilozheniye k zhurnalu «Informatsionnyye tekhnologii» — Appendix to the Journal «Information Technology»*, 2000, No. 12. 392 p. [in Russian].

7. Andreychikov A.V., Andreychikova O.N. *Intellektual'nyye informatsionnyye sistemy: uchebnyk* [Intelligent Information Systems: Textbook]. Moscow, Finansy i statistika, 2004. 423 p. [in Russian].

8. Vasil'yev V.I., Il'yasov B.G. *Intellektual'nyye sistemy upravleniya. Teoriya i praktika* [Intelligent Control Systems. Theory and Practice]. Moscow, Radiotekhnika, 2009. 392 p. [in Russian].

References

1. Murav'yeva Ye.A. *Intellektual'noye upravleniye mnogovyaznymi ob"yektami, realizovannoye v situatsionnykh podprogrammakh* [Intelligent Management of Multiply Connected Objects Implemented in Situational



Самаров Е. К.
Samarov E. K.

кандидат технических наук,
декан факультета инфокоммуникационных систем и технологий,
ГБОУ ВО Московской области «Технологический университет»,
г. Королев Московской области, Российская Федерация

УДК 004.932

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-69-72

ДВУМЕРНОЕ ДИСКРЕТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГАБОРА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ШУМА В ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Программно-аппаратная обработка цифровых изображений — это сложный технологический процесс, состоящий из нескольких этапов. Одним из основных этапов является шумоподавление, причем оно необходимо не только в цифровой обработке изображений, но и во многих других важных разделах современной компьютерной науки. Шумоподавление позволяет улучшить качество визуальной информации, уменьшить влияние артефактов в цифровых изображениях, усилить возможности распознавания образов и интерпретации проведенных измерений, а также просто увеличить количество полезных свойств фотоснимков, полученных из регистрирующих устройств. Кроме перечисленных направлений модуляция шума в цифровых изображениях используется для сокращения объема цифровых изображений с целью обеспечения оптимизации их хранения и передачи по линиям связи, включая Интернет. При этом в прикладных задачах, как правило, допускается определенный уровень потери качества, который компенсируется выгодами от такой оптимизации, например, за счет возможности оперирования большими массивами цифровых изображений. Целый класс направлений современной компьютерной науки вообще не может рассматриваться в отрыве от такого подхода. В первую очередь — это работа с космическими снимками, медицинскими изображениями и практически любые задачи картографии. Все это обуславливает необходимость разработки и применения высокоэффективных алгоритмов подавления шума при обработке цифровых изображений.

Статья посвящена синтезу алгоритма подавления шума при обработке цифровых изображений, основанному на построении специального пространственного линейного фильтра. Предлагаемый в статье фильтр базируется на двумерном дискретном преобразовании Габора, которое применяется к числовым матрицам, моделирующим цифровые фотоснимки. Для полноты изложения статья включает описание двумерного непрерывного преобразования Габора, его двумерный дискретный вариант и общую схему шумоподавления, базирующуюся на нем.

Статья имеет практическую направленность. Приведенная в статье схема линейной фильтрации позволяет эффективно осуществлять шумоподавление в цифровых изображениях. Предложенный алгоритм не привязан к какому-либо конкретному стандарту цифровых изображений и может успешно применяться как для распространенного стандарта JPEG, к которому относится большинство снимков в Интернете, так и для более сложных и продвинутого формата ICER и JPEG 2000, ориентированных в основном на космические изображения, медицинские изображения, а также на научно-технические и технологические фотоснимки большого объема.

Ключевые слова: непрерывное преобразование Габора, линейные отображения, двумерное преобразование Фурье, двумерное дискретное преобразование Габора, числовые матрицы, подавление шума, пространственный линейный фильтр, цифровые изображения, цифровая обработка изображений, цифровая фильтрация.

TWO-DIMENSIONAL DISCRETE GABOR TRANSFORMATION AND ITS APPLICATION TO NOISE SUPPRESSION IN DIGITAL IMAGES

Hardware and software processing of digital images is a complex technological process consisting of several stages. One of the main stages is noise suppression and this process is necessary not only in digital image processing but also in many other important fields of modern computer science. Noise suppression allows you to improve the quality of visual information, to reduce the influence of artifacts in digital images, to increase the possibilities of pattern recognition and interpretation of the measurements as well as simply to increase the number of useful properties of the images obtained from the registered devices. In addition to these areas noise modulation in digital images is used to reduce the volume of digital images in order to optimize their storage and transmission over communication lines including Internet. At the same time in applied problems as a rule a certain level of quality loss is allowed which is compensated by the benefits of such optimization for example due to the possibility of operating large arrays of digital images. A whole class of areas in modern computer science cannot be considered in isolation from such approach. First it is space image processing, medical image processing and almost any task of cartography. Thus that it is very important to develop and apply highly effective noise suppression algorithms for digital image processing.

The article is devoted to the synthesis of noise suppression algorithm in digital image processing based on the design of a special spatial linear filter. The filter is based on the two-dimensional discrete Gabor transformation which is applied to numerical matrices modeling digital photographs. For completeness the article includes the description of the two-dimensional continuous Gabor transformation, its two-dimensional discrete version and general noise reduction scheme based on it.

The article has a practical orientation. The scheme of linear filtering presented in the article allows to make effective noise suppression for digital images. The proposed algorithm is not tied to any specific standard of digital images and can be successfully applied both for the widespread JPEG standard, which includes most of the images in the Internet, and for more complex and advanced formats ICER and JPEG 2000 focused mainly on images for space, medical as well as scientific, technical and technological photographs of large volume.

Key words: continuous Gabor transformation, linear mappings, two-dimensional Fourier transformation, two-dimensional discrete Gabor transformation, numerical matrixes, noise suppression, spatial linear filter, digital images, digital image processing, digital filtration.

Двумерное непрерывное преобразование Габора

Введем следующие обозначения:

a, b_1, b_2 — вещественные числа, заключенные в пределах

$$0 < a < \infty, \quad -\infty < b_1 < +\infty, \\ -\infty < b_2 < +\infty;$$

$\bar{x}, \bar{\omega}, \bar{b}$ — двумерные векторы

$$\bar{x} = (x_1, x_2), \quad \bar{\omega} = (\omega_1, \omega_2),$$

$$\bar{b} = (b_1, b_2);$$

$d\bar{x}, d\bar{\omega}, d\bar{b}$ — дифференциалы

$$d\bar{x} = dx_1 dx_2, \quad d\bar{\omega} = d\omega_1 d\omega_2,$$

$$d\bar{b} = db_1 db_2;$$

$(\bar{\omega} \cdot \bar{x}) = \omega_1 x_1 + \omega_2 x_2$ — скалярное произведение в пространстве \mathbb{R}_2 ;

$(\bar{x} - \bar{b})^2 = (x_1 - b_1)^2 + (x_2 - b_2)^2$ — скалярный квадрат в \mathbb{R}_2 .

Двумерным непрерывным преобразованием Габора [1] называют линейное отображение пространства вещественных функций двух вещественных переменных $\mathbb{L}_2(\mathbb{R}_2)$, которое ставит в соответствие каждой функции $f(\bar{x}) \in \mathbb{L}_2(\mathbb{R}_2)$ функцию $(G_{a,\bar{b}}f)(\bar{\omega})$, зависящую от трех числовых параметров a, b_1, b_2 и задаваемую формулой

$$(G_{a,\bar{b}}f)(\bar{\omega}) = \\ = \frac{1}{4\pi a} \int_{\mathbb{R}_2} f(\bar{x}) e^{-i(\bar{\omega} \cdot \bar{x}) - \frac{(\bar{x} - \bar{b})^2}{4a}} d\bar{x}. \quad (1)$$

Если формулу (1) переписать в виде

$$(G_{a,\bar{b}}f)(\bar{\omega}) = \\ = \int_{\mathbb{R}_2} f(\bar{x}) e^{-i(\bar{\omega} \cdot \bar{x})} g_a(\bar{x} - \bar{b}) d\bar{x}, \quad (2)$$

где символом $g_a(\bar{x})$ обозначена функция Гаусса в двумерном случае

$$g_a(\bar{x}) = \frac{1}{4\pi a} e^{-\frac{\bar{x}^2}{4a}}, \quad (3)$$

то из формул (2) и (3) будет следовать, что преобразование Габора (1) является оконным (взвешенным) двумерным преобразованием Фурье [2] с окном (весовой функцией) Гаусса.

Для преобразования Габора справедливы равенство Парсевала [3]

$$\int_{\mathbb{R}_2} (f(\bar{x}))^2 d\bar{x} = \frac{1}{4\pi^2} \int_{\mathbb{R}_4} ((G_{a,\bar{b}}f)(\bar{\omega}))^2 d\bar{\omega}d\bar{b}$$

и формула обращения

$$f(\bar{x}) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{\mathbb{R}_4} (G_{a,\bar{b}}f) \times \times(\bar{\omega}) e^{i(\bar{\omega} \cdot \bar{x})} g_a(\bar{x} - \bar{b}) d\bar{\omega}d\bar{b}.$$

Двумерное дискретное преобразование Габора

Рассмотрим числовую матрицу $d_{n,m}$, имеющую X_1 строк и X_2 столбцов, элементы которой проиндексированы числами

$$\begin{aligned} n &= 0, 1, \dots, X_1 - 1, \\ m &= 0, 1, \dots, X_2 - 1. \end{aligned} \quad (4)$$

Будем считать, что эта матрица является моделью цифрового фотоснимка [4], и на её примере определим дискретное двумерное преобразование Габора. В отличие от непрерывного двумерного преобразования Габора, определяемого для функций из пространства $\mathbb{L}_2(\mathbb{R}_2)$ по формуле (1), двумерное дискретное преобразование Габора определяется для матриц, и в случае матрицы $d_{n,m}$ обозначается $D_{r,s}$ и вычисляется по формуле

$$D_{r,s} = \sum_{n=0}^{X_1-1} \sum_{m=0}^{X_2-1} d_{n,m} W_{r,s}^{n,m},$$

где

$$W_{r,s}^{n,m} = \exp\left(-i\left(\frac{rn}{X_1} + \frac{sm}{X_2}\right) - \frac{1}{4a}\left(\left(\frac{n-b_1}{X_1}\right)^2 + \left(\frac{m-b_2}{X_2}\right)^2\right)\right),$$

$$r = 0, 1, \dots, X_1 - 1, \quad s = 0, 1, \dots, X_2 - 1.$$

Обратное дискретное двумерное преобразование Габора определяется по формуле

$$d_{n,m} = \frac{1}{X_1 X_2} \sum_{r=0}^{X_1-1} \sum_{s=0}^{X_2-1} D_{r,s} V_{r,s}^{n,m}, \quad (5)$$

где

$$V_{r,s}^{n,m} = \exp\left(i\left(\frac{rn}{X_1} + \frac{sm}{X_2}\right) - \frac{1}{4a}\left(\left(\frac{n-b_1}{X_1}\right)^2 + \left(\frac{m-b_2}{X_2}\right)^2\right)\right). \quad (6)$$

Равенство Парсевала [5] в дискретном двумерном случае имеет вид

$$\sum_{r=0}^{X_1-1} \sum_{s=0}^{X_2-1} (D_{r,s})^2 = \frac{1}{X_1 X_2} \sum_{n=0}^{X_1-1} \sum_{m=0}^{X_2-1} (d_{n,m})^2. \quad (7)$$

Схема шумоподавления

Будем считать выполненными следующие положения:

— фотоснимок $d_{n,m}$, исходное изображение $c_{n,m}$ и шум (помеха) $i_{n,m}$ моделируются числовыми матрицами типа (4), компоненты которых суть случайные величины;

— фотофиксация происходит в соответствии со структурной схемой

$$\boxed{\text{фотоснимок}} = \boxed{\text{исходное изображение}} + \boxed{\text{шум}};$$

— компоненты матриц $c_{n,m}$ и $i_{n,m}$ являются некоррелированными случайными величинами;

— компоненты матрицы $i_{n,m}$ имеют нулевое среднее значение.

Шумоподавление будем осуществлять при помощи пространственного линейного фильтра [6], а именно, матрицы $u_{n,m}$, доставляющей минимум величины

$$\sum_{n=0}^{X_1-1} \sum_{m=0}^{X_2-1} (u_{n,m} - c_{n,m})^2. \quad (8)$$

Из равенства Парсевала (7) вытекает, что двойная сумма (8) равна двойной сумме

$$\sum_{r=0}^{X_1-1} \sum_{s=0}^{X_2-1} (U_{r,s} - C_{r,s})^2, \quad (9)$$

где символами $U_{r,s}$ и $C_{r,s}$ обозначены дискретные двумерные преобразования Габора матриц $u_{n,m}$ и $c_{n,m}$ соответственно. Если дискретное двумерное преобразование Габора матрицы $i_{n,m}$ обозначить $I_{r,s}$, то будет справедливо равенство

$$D_{r,s} = C_{r,s} + I_{r,s}. \quad (10)$$

Для того, чтобы найти минимум величины (9), совершим замену переменного

$$U_{r,s} = T_{r,s} D_{r,s}, \quad (11)$$

где $T_{r,s}$ – числовая матрица. Тогда, воспользовавшись формулой (10), из (11) получаем соотношение

$$U_{r,s} = T_{r,s}C_{r,s} + T_{r,s}I_{r,s},$$

следствием которого является равенство

$$U_{r,s} - C_{r,s} = (T_{r,s} - 1)C_{r,s} + T_{r,s}I_{r,s}. \quad (12)$$

С помощью формулы (12) величина (9) преобразуется к виду

$$\sum_{r=0}^{X_1-1} \sum_{s=0}^{X_2-1} \left((T_{r,s} - 1)C_{r,s} + T_{r,s}I_{r,s} \right)^2. \quad (13)$$

В силу некоррелированности шума и исходного изображения формула (13) принимает вид

$$\sum_{r=0}^{X_1-1} \sum_{s=0}^{X_2-1} \left(\left((T_{r,s} - 1)C_{r,s} \right)^2 + \left(T_{r,s}I_{r,s} \right)^2 \right), \quad (14)$$

откуда вытекает, что минимум величины (14) достигается на такой матрице $T_{r,s}$, каждая компонента которой реализует минимум величины

$$\left((T_{r,s} - 1)C_{r,s} \right)^2 + \left(T_{r,s}I_{r,s} \right)^2. \quad (15)$$

Список литературы

1. Чуи К. Введение в вейвлеты. М.: Мир, 2001. 412 с.
2. Привалов И.И. Ряды Фурье. М.: Едиториал УРСС, 2018. 168 с.
3. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: Солон-пресс, 2010. 400 с.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
5. Самаров Е.К. Исследование и разработка многоканального анализатора качества электроэнергии повышенной точности: дисс. ... канд. техн. наук. Черкизово МО: ГОУ ВПО «Московский государственный университет сервиса», 2006. 144 с.
6. Артюшенко В.М., Самаров Е.К. Применение алгоритма фильтрации Калмана-Бьюси в задачах анализа качества электроэнергии // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2006. Т. 2. № 1. С. 17–23.

References

1. Chui K. *Vvedeniye v veyvlety* [Introduction to Wavelets]. Moscow, Mir Publ., 2001. 412 p. [in Russian].
2. Privalov I.I. *Ryady Fur'ye* [Fourier Series]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2018. 168 p. [in Russian].

Переписывая формулу (15) в виде квадратного трехчлена относительно $T_{r,s}$

$$T_{r,s}^2(C_{r,s}^2 + I_{r,s}^2) - 2T_{r,s}C_{r,s} + C_{r,s}^2, \quad (16)$$

получаем, что минимум величины (16) в зависимости от $T_{r,s}$ достигается при

$$T_{r,s} = \frac{C_{r,s}^2}{C_{r,s}^2 + I_{r,s}^2}. \quad (17)$$

Из формулы (17) с помощью формул (5) и (6) получаем матрицу

$$\tilde{d}_{n,m} = \frac{1}{X_1 X_2} \sum_{r=0}^{X_1-1} \sum_{s=0}^{X_2-1} \frac{C_{r,s}^2 D_{r,s}}{C_{r,s}^2 + I_{r,s}^2} V_{r,s}^{n,m},$$

которая и является искомым отфильтрованным цифровым изображением.

Вывод

Приведена схема линейной фильтрации для эффективного осуществления шумоподавления в цифровых изображениях.

3. D'yakonov V.P. *Veyvlety. Ot teorii k praktike* [Wavelets. From Theory to Practice]. Moscow, Solon-press Publ., 2010. 400 p. [in Russian].

4. Gonsales R., Vuds R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital Image Processing]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2012. 1104 p. [in Russian].

5. Samarov Ye.K. *Issledovaniye i razrabotka mnogokanal'nogo analizatora kachestva elektroenergii povyshennoy tochnosti: diss. ... kand. kand. tekhn. nauk* [Research and Development for the Multichannel Analyzer of the Electric Power Quality with the Increased Accuracy. Cand. Engin. Sci. Diss.]. Cherkizovo MO, GOU VPO «Moskovskiy gosudarstvennyy universitet servisa», 2006. 144 p. [in Russian].

6. Artyushenko V.M., Samarov Ye.K. *Primeneniye algoritma fil'tratsii Kalmana-B'yusi v zadachakh analiza kachestva elektroenergii* [Application of Kalman-Bucy Filtration Algorithm in Problems of Power Quality Analysis]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy — Electrotechnical and Information Complexes and Systems*, 2006, Vol. 2, No. 1, pp. 17–23. [in Russian].



Янбеков Э. Р.
Yanbekov E. R.

*магистрант кафедры «Цифровые технологии в разработке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 681.518.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-73-81

ЦИФРОВАЯ АНАЛИТИКА ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ

В данной работе предметом исследования является практическое применение процесса прогнозирования эффекта от геолого-технических мероприятий и его сравнения с фактическими значениями при помощи современных прикладных средств.

Объектом исследования выступает нефтегазовое месторождение «XXX», по которому необходимо наглядно показать прогноз уровней базовой добычи нефти и темпов ее падения после проведения геолого-технических мероприятий. В статье рассмотрен бизнес-процесс по расчету прогноза базовой и дополнительной добычи нефти от геолого-технических мероприятий. Новизна метода заключается в динамическом построении графиков — «дэшбордов» современными средствами обработки данных и визуализации, такими как Power Query, Power Pivot и Power BI.

Данный процесс делится на несколько частей: выгрузка показателей за определенные промежутки времени из хранилища данных, приведение их к читаемому виду, расчет базовой и прогнозируемой добычи нефти и ее сопоставления с фактическими значениями.

Также рассматривается последовательность процесса преобразования исходных данных, начиная от извлечения информации и заканчивая интерактивным дэшбордом для принятия решений. Рассмотрены программные средства загрузки, хранения и преобразования исходных данных, получаемых из разных источников, таких как СУБД, CRM и ERP системы, локальные файлы и т.д.

Описываются различные геолого-технические мероприятия, включенные в данную работу, с целью анализа эффекта каждого из них.

В ходе проведения бизнес-аналитического процесса можно будет сделать вывод о том, какие из геолого-технических мероприятий являются наиболее часто встречающимися на заданном месторождении и какого эффекта от них ожидать в дальнейшем. Приведенные результаты по анализу фактической и прогнозируемой добычи нефти были выполнены в виде динамического отчета — «дэшборда» при помощи современных прикладных средств выгрузки, обработки и визуализации информации.

Ключевые слова: бизнес-аналитика, геолого-технические мероприятия, базовая добыча нефти, нефтегазовое месторождение, действующий фонд, бизнес-процессы, хранилище данных, дэшборд.

DIGITAL ANALYTICS OF GEOLOGICAL AND ENGINEERING OPERATIONS

In this paper, the subject of research is the practical application of the process of forecasting the effect of geological and engineering operations and its comparison with actual values using modern applied tools.

The object of the study is the «XXX» oil and gas field, on which it is necessary to visually show the forecast of the levels of basic oil production and the rate of its decline after geological and engineering operations. The article discusses the business process for calculating the forecast of basic and additional oil production from geological and engineering operations. The novelty

of the method is the dynamic construction of charts – «dashboards» by modern data processing and visualization tools, such as Power Query, Power Pivot and Power BI.

This process is divided into several parts: uploading indicators for certain periods of time from the data warehouse, bringing them to a readable form, calculating the base and forecasted oil production and its comparison with actual values.

Also, examines the sequence of the process of transforming the source data from information extraction to interactive dashboard for decision making. Software tools for loading, storing and converting source data obtained from various sources, such as DBMS, CRM and ERP systems, local files, etc.

Describes the various geological and engineering operations included in this work in order to analyze the effect of each of them.

During the business analytical process, it will be possible to conclude which of the geological and engineering operations are most often encountered at a given field and what effect will be expected from them in the future. The results of the analysis of the actual and forecasted oil production were made in the form of a dynamic report – a «dashboard» using modern applied means of unloading, processing and visualization of information.

Key words: business intelligence, geological and engineering operations, basic oil production, oil and gas field, producing well stock, business processes, data warehouse, dashboard.

Введение

Нефтяная и газовая промышленность уже начинает внедрять современные интеллектуальные цифровые технологии, такие как аналитика больших данных, облачные сервисы, машинное обучение и т.д., для повышения производительности и безопасности операций, снижения эксплуатационных расходов и смягчения неблагоприятного воздействия на окружающую среду.

Для этого необходимо поддерживать доход на рентабельном уровне, сокращать издержки, улучшать качество реализуемого продукта и увеличивать прибыль компании. Разрешить данный ряд проблем можно посредством бизнес-анализа и различных инструментов бизнес-аналитики.

Ежегодно нефтяные компании проводят целый ряд комплексов по регулированию разработки месторождения и поддержанию рекомендуемых уровней добычи нефти. В основном к этим комплексам относятся геолого-технические мероприятия (ГТМ).

Геолого-технические мероприятия отличаются от прочих мероприятий на нефтяных скважинах тем, что в результате реализации этих мероприятий предприятия, как правило, получают значительный прирост добычи нефти [1].

ГТМ можно проводить на всех этапах разработки месторождения. Самые интенсивные из них осуществляются на более поздних этапах. Особенно актуально стоит

вопрос по проведению ГТМ на старых месторождениях [2].

К геолого-техническим мероприятиям относят следующие работы:

- ГРП — гидроразрыв пласта;
- ОПЗ — обработка призабойной зоны;
- ПВЛГ — перевод на вышележащий горизонт;
- ВНС — ввод новых скважин;
- ОРЭ — одновременно-раздельная эксплуатация;
- ЗБС — зарезка бокового ствола;
- РИР — ремонтные изоляционные работы.

Рассмотрим некоторые из них подробнее.

Гидравлический разрыв пласта может быть определен как механический метод воздействия на продуктивный пласт, при котором порода разрывается по плоскостям минимальной прочности благодаря воздействию на пласт давления, создаваемого закачкой в пласт флюида.

Перевод на вышележащий горизонт применяется с целью выработки вышележащих пластов, так как нижележащие пласты успевают выработываться из-за более раннего срока эксплуатации.

Зарезка боковых стволов — это эффективная технология, позволяющая увеличить добычу нефти на старых месторождениях и коэффициент извлечения нефти из пластов, вернуть в эксплуатацию нефтяные скважины путем бурения дополнительного ответвления

из уже пробуренной скважины, которая не могла быть возвращена в действующий фонд другими методами.

Ввод новых скважин — увеличение буровых работ для дополнительного прироста фонда добывающих скважин с целью вовлечения еще невыработанных запасов нефти.

Данные мероприятия обязательно должны оцениваться на их эффективность путем измерения продолжительности полученного эффекта, изменяющегося дебита и дополнительно полученной нефти [3].

Благодаря полученным данным специалист сможет оценить экономический эффект, полученный в ходе ГТМ, и провести бизнес-анализ полученной информации.

В данной работе в качестве бизнес-аналитических программ используются следующие средства обработки и визуализации информации:

— пакеты Power Query и PowerPivot позволяют заменить привычные функции Excel, импортировать, обрабатывать и анализировать большие объемы данных;

— Power BI — средство, отвечающее за преобразование полученных значений в интерактивные динамические панели «дэшборды» для удобного анализа.

Цель исследования

Сферой задач бизнес-аналитики является анализ применяемых в компании бизнес-процессов с последующим обнаружением

слабых мест, из-за которых и происходят неоправданные расходы, потери ресурсов и рабочего времени.

Так, в качестве исследования был выбран процесс визуализации прогноза базовой и дополнительной добычи нефти от геолого-технических мероприятий посредством современных прикладных средств.

Данный процесс делится на четыре основополагающие части:

1. Выгрузка месячного эксплуатационного рапорта (МЭР) и дат проведения геолого-технических мероприятий по заданному месторождению за определенный временной промежуток;

2. Составление прогноза базовой добычи нефти на следующий временной промежуток;

3. Составление прогноза добычи после проведения геолого-технических мероприятий;

4. Сопоставление прогнозируемой базовой добычи нефти и добычи с учетом проведения геолого-технических мероприятий с фактической добычей.

Преобразование данных

Полный процесс проектирования бизнес-аналитической системы, начиная от выгрузки информации и заканчивая ее формированием в интерактивный динамический дэшборд, выглядит следующим образом (рисунок 1).

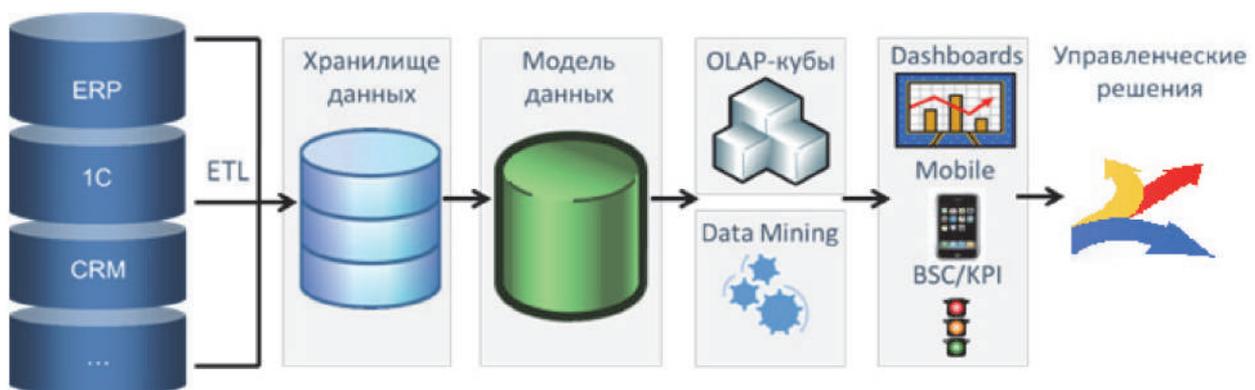


Рисунок 1. Этапы преобразования аналитических данных

Данная архитектура позволяет быстро и своевременно выгружать и преобразовывать имеющуюся информацию, что в последствии снижает количество трудозатрат в разы по сравнению с ручным заполнением [4].

Перед началом загрузки в хранилище имеющиеся данные могут храниться в различных источниках:

- БД (Oracle, PostgreSQL, MySQL и т.д.);
- CRM и ERP системах;

- электронных архивах;
- локальных документах форматов .doc, .xlsx, .csv и т.д.

Следовательно, появляется необходимость в объединении и структуризации полученной информации.

Помочь в данном вопросе сможет система ETL — «Extract, Transform, Load», что в переводе означает «извлечение, преобразование и загрузка». Данная технология позволит экспортировать данные и преобразовать их в общий структурированный вид. Это нужно для того, чтобы вся имеющаяся информация могла храниться упорядоченно в одном и том же месте для более быстрого обращения к ней, а также с целью минимизации различных ошибок, связанных со случайным вводом, несовместимостью кодировки, несоответствием формата и типом данных и т.д.

После преобразования информация должна транспортироваться в хранилище данных (Data Warehouse — DWH). Хранилищем данных могут выступать как один, так и несколько серверов, которые могут располагаться в одном месте, т.е. локально, или же в нескольких местах, т.е. удаленно, в зависимости от архитектуры хранилища. Как правило, вся имеющаяся информация крупных предприятий хранится именно в нем для дальнейшего бизнес-анализа прошедших действий [5].

Для работы с загруженными данными используется технология «online analytical processing» (OLAP), позволяющая выгрузить модель интересующей нас информации в табличном виде. Также данная модель может настраиваться средствами Excel (Power Query и Power Pivot) в виде сводных таблиц для дальнейших расчетов.

Сперва выгрузим информацию по месторождению, а именно: объект месторождения, номер скважины, необходимый временной интервал работы (с 2012–2014 и 2015–2017 гг.), дебит нефти за этот период, даты проведения и виды ГТМ.

Выгруженные данные представлены в виде сводной таблицы (рисунок 2) [6].

Построение связей

После выгрузки всех данных полученная информация разделяется на определенные таблицы, в которых рассчитываются агрегированные показатели по объекту месторождения, например: накопленная добыча нефти за оба периода, накопленная добыча от определенного ГТМ по каждой скважине, базовая и прогнозная добыча, а также темпы падения. Чтобы информация по скважинам не перепуталась и была согласована друг с другом, необходимо построить связи между таблицами. Помочь в этом сможет программный комплекс Power BI. Логические связи, построенные средствами Power BI, представлены на рисунке 3.

МестОбъектРазр		Объект		Даты.Даты (несколько элементов)	
Нескв	Месяц	Значения			
		Qн МЭР Ср - м3 сут			
2	дек2011	5,1			
2	январь2012	6,7			
2	февраль2012	5,2			
2	март2012	4,9			
2	апрель2012	6,1			
2	май2012	6,0			
2	июнь2012	7,0			
2	июль2012	5,7			
2	август2012	5,1			
2	сентябрь2012	4,1			
2	октябрь2012	3,1			
2	ноябрь2012	3,3			
2	декабрь2012	4,5			

Рисунок 2. Выгрузка данных по объекту месторождения

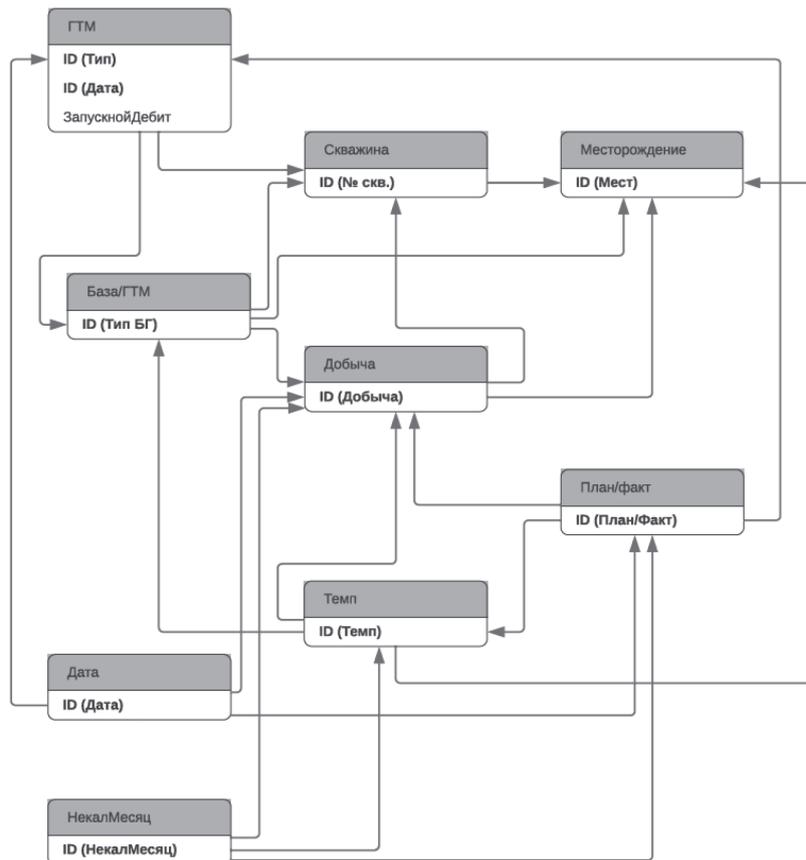


Рисунок 3. Логическая модель для расчетов

Данная модель зависимостей между таблицами необходима для точного соблюдения показателей расчета.

Так как каждая скважина имеет свой темп падения, временной интервал работы, фактический дебит, информацию о проведении ГТМ, то можно спрогнозировать базовую и дополнительную добычу нефти за второй промежуток времени с 2015 по 2018 гг. относительно работы скважин за первый период с 2012 по 2014 гг.

После составления логических связей между таблицами необходимо провести расчет базовой и дополнительной добычи нефти [7].

Расчет базовой и дополнительной добычи нефти

Все исходные данные для расчетов берутся с закрытия месяца из официальных отчетов месячного эксплуатационного рапорта (МЭР) работы скважин.

МЭР является первичным документом оперативного учета добычи нефти, газа, конденсата, воды.

Базовая добыча — добыча нефти и попутного газа в течение установленного периода

планирования, полученная из действующих, по состоянию на 1 января 1-го года планирования/отчета, скважин при выполнении:

- ряда ремонтов и операций, направленных на поддержание работоспособности подземного и наземного оборудования, сохранение существующих притоков скважин;
- мероприятий по поддержанию необходимых объемов и условий закачки для поддержания пластового давления.

Дополнительная добыча — добыча нефти и попутного газа, полученная за счет выполнения ремонтов и операций, направленных на:

- увеличение притока (превышения над притоком, существовавшим на начало проведения ремонта/операции) из действующих, по состоянию на 1 января 1-го года планирования/отчета, скважин;
- получение притока из бездействующих, по состоянию на 1 января 1-го года планирования/отчета, скважин;
- получение притока из новых, по состоянию на 1 января 1-го года планирования/отчета, скважин.

Темп падения — изменение падения дебита скважины от первоначального с течением времени [8].

Параметры:

Q_n — дебит нефти, т/сут;

$Q_{н\ общ\ скв}$ — общая добыча нефти по скважине (всего), т;

$Q_{н\ баз\ скв}$ — базовая добыча нефти по скважине, т;

$Q_{н\ доп\ скв}$ — дополнительная добыча нефти по скважине, т;

$Q_{н\ доп\ пласта}$ — дополнительная добыча нефти по пласту, т;

$T_{раб\ скв\ общ}$ — общее время работы скважины, ч;

$\% пад_{базов}$ — темп падения базовых дебитов нефти, д.ед.

Расчет дополнительной добычи (рисунок 4):

— определяем общую добычу нефти по скважине:

$$Q_{нефти\ общ\ скв} = Q_n * \frac{T_{раб\ скв\ общ}}{24}; \quad (1)$$

— определяем базовую добычу нефти по скважине:

$$Q_{нефти\ баз\ скв} = Q_n * \frac{T_{раб\ скв\ общ}}{24} * K_{пад\ базов}; \quad (2)$$

где $K_{пад\ базов}$ определяется по формуле:

$$K_{пад\ баз} = 1 - \frac{\%пад_{баз.год}}{100}; \quad (3)$$

— определяем дополнительную добычу нефти по скважине:

$$Q_{нефти\ доп\ скв} = Q_{нефти\ общ\ скв} - Q_{нефти\ баз\ скв}; \quad (4)$$

— определяем дополнительную добычу нефти по пласту:

$$Q_{нефти\ доп\ пласта} = \sum Q_{нефти\ доп\ скв}. \quad (5)$$

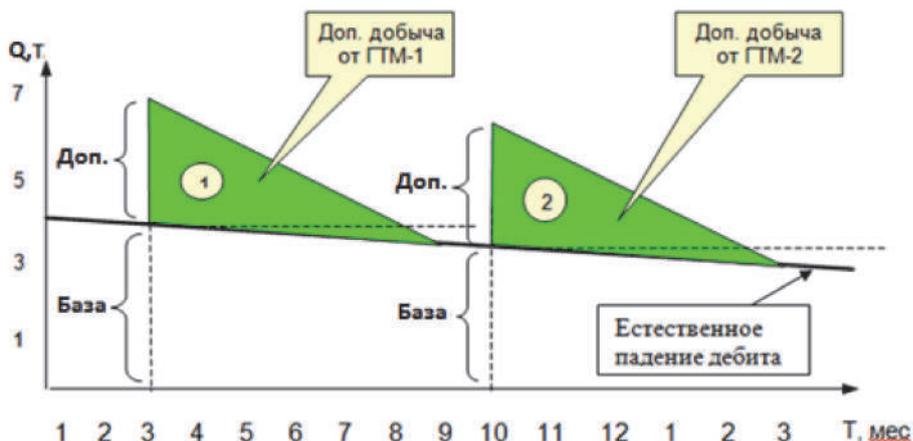


Рисунок 4. Схема расчета дополнительной добычи нефти от проведения ГТМ с закончившимся эффектом

Было необходимо рассчитать входной базовый дебит на первый период для того, чтобы рассчитать темп падения базы. Входом для базовой добычи является вся добыча по МЭР декабря предыдущего года (рисунок 5).

В дальнейшем эти темпы были учтены при расчете прогноза базы на 2015–2017 гг.

Чтобы рассчитать уровни базовой добычи в период на 2015–2017 гг., необходимо умно-

жить полученные темпы на входной дебит базы на 2015 г. Для этого было необходимо рассчитать входной дебит базы на 2015 г. (рисунок 6).

Затем было необходимо рассчитать входной дебит ГТМ по каждому типу на 2012 г., чтобы рассчитать темпы падения ГТМ (рисунок 7).

Дата	1.2 Количество
01.12.2011	2354,216933

Рисунок 5. Входная добыча базы на 2012 г.

Дата	1.2 ДебитВходной2015
01.12.2014	1788,931988

Рисунок 6. Входная добыча базы на 2015 г.

A ^B C	Название	1.2 Количество
1	ГРП	173,1301107
2	ЗБС	62,64501163
3	Новые	173,3802258
4	ПВЛГ	251,0976154

Рисунок 7. Входные показатели добычи на 2012 г. по типу ГТМ

Так как темпы ГТМ были рассчитаны для некалендарных месяцев, то было необходимо привести их к календарным датам, при этом учитывая, что каждый тип ГТМ для каждой скважины происходил в разные даты [9].

После приведения дат на каждую скважину был составлен прогноз добычи ГТМ на 2015–2017 гг. (рисунок 8).

Результаты исследования и их обсуждение

Все полученные данные были подгружены в современный инструмент аналитической визуализации MS Power BI для построения динамических графиков — «дэшбордов» [10].

Далее нам нужно сравнить фактическую базовую добычу с 2015 по 2017 гг. с ранее

прогнозируемой за 2012–2014 гг. Из графика можно наблюдать на сколько фактические показатели накопленной добычи отличаются от прогнозируемых (рисунок 9). Мы видим, что прогнозируемые показатели чуть больше фактических. Это изменение вызвано из-за того, что фактические темпы падения с 2012 по 2014 гг. были выше чем за период с 2015 по 2017 гг. Благодаря полученному отчету, бизнес-аналитик сможет сконструировать план действий по выбранному варианту разработки, что в дальнейшем позволит учесть ошибки неправильной эксплуатации объекта месторождения и повысить коэффициент извлечения нефти [11].

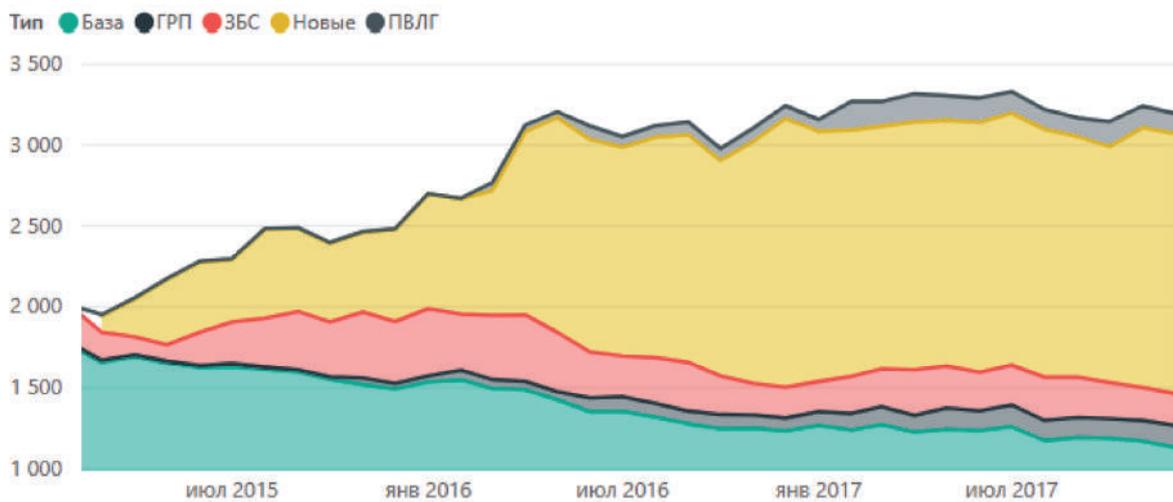


Рисунок 8. Итоговый график прогноза базовой добычи и добычи от ГТМ по типам на 2015–2017 гг.

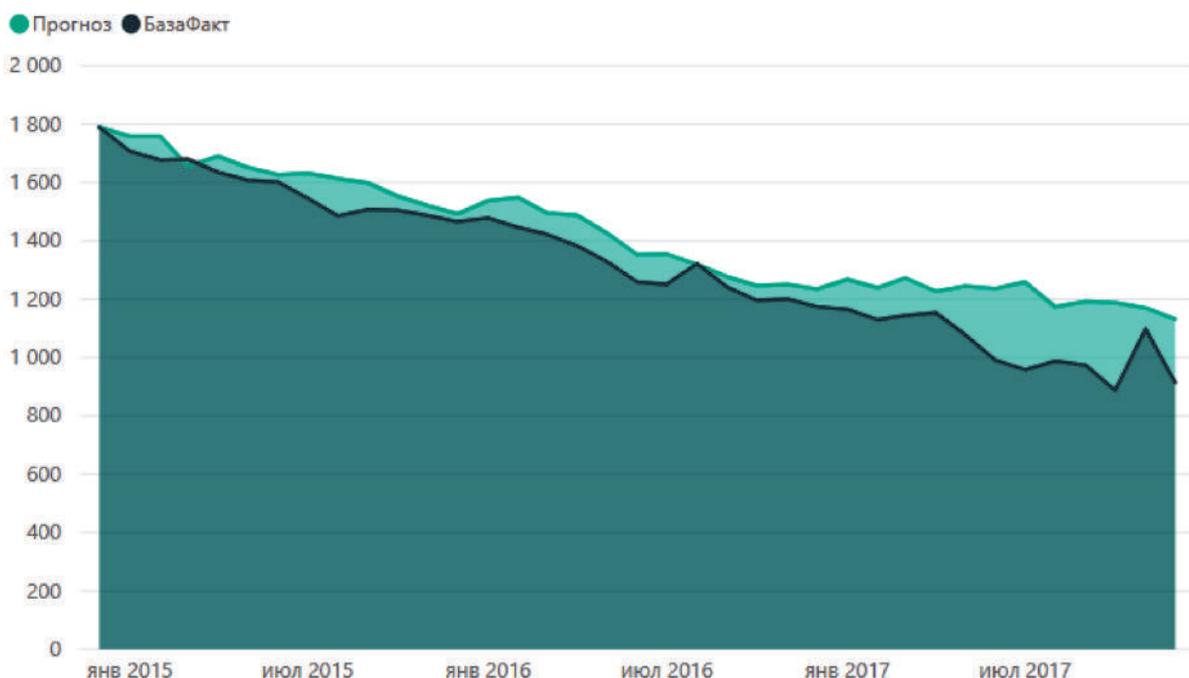


Рисунок 9. Сравнение прогноза и факта базовой добычи на 2015–2017 гг.

Вывод

В ходе проделанной работы рассматривались геолого-технические мероприятия, программные средства выгрузки и обработки данных, полный путь процесса формирования интерактивного отчета из исходных данных, а также приведен пример расчета и прогнозирования дебитов нефти в ходе геолого-технических работ.

На основе анализа предметной области сформулирована задача по прогнозированию базовой и дополнительной добычи нефти от геолого-технических мероприятий.

Для прогнозирования и визуализации данных по скважинам были применены совре-

менные программные средства, такие как Power Query, Power Pivot и Power BI.

Таким образом, в ходе анализа бизнес-аналитического отчета — «дэшборда» можно будет сделать вывод о том, какие из геолого-технических мероприятий являются часто встречающимися на заданном месторождении и какого эффекта от них ожидать в дальнейшем.

Бизнес-анализ можно применять не только в нефтегазовой сфере, но и во многих других отраслях, где нужно наглядно увидеть плюсы и минусы применяемых методов, тем самым делая вывод об их эффективности. Это и подразумевает собой процесс бизнес-аналитики.

Список литературы

1. Гарипов Т.Р. Прогнозирование эффективности геолого-технических мероприятий на месторождениях нефти на основе системного подхода // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2010. № 2. С. 45–47.
2. Ситников А.Н., Асмандияров Р.Н., Пустовских А.А., Шеремеев А.Ю., Зулькарниев Р.З. Формирование программ геолого-технических мероприятий с помощью цифровой информационной системы «подбор ГТМ» // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2017. № 2 (4). С. 39–46.
3. Попов Н.И., Скарედнов А.А., Халин А.А. Анализ эффективности применения геолого-технических мероприятий на юрских отложениях // Достижения современной науки: матер. науч.-практ. конф. / Отв. ред. проф. А.И. Вострецова. София: Изд-во «СОРОС», 2018. С. 30-35.
4. Основные методы в бизнес-аналитике. URL: <https://studfiles.net/preview/5022763/page:2> (дата обращения: 15.10.2019).
5. Гулулян А.Г. Оценка экономической эффективности использования технологий цифровых месторождений при принятии управленческих решений в нефтегазовом производстве: дис. ... канд. экон. наук. М.: Изд-во РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2017. 163 с.
6. Атнагулов А.Р., Вавилов Н.В., Здольник С.Е., Незговоров С.В., Киреев Г.А., Шарипов Р.Ф., Галкин О.А., Скороходов А.А. Автоматизация производственных бизнес-процессов ПАО АНК «Башнефть» на базе корпоративной геоинформационной системы // Нефтяное хозяйство. 2016. № 1. С. 102-105. URL: https://oil-industry.net/Journal/archive_detail.php?art=228063.
7. Xudong Y., Oladele B., Lei Y., Derek B., Roberto F. Intelligent Oilfield – Cloud Based Big Data Service in Upstream Oil and Gas // International Petroleum Technology Conference held in Beijing, China, 26-28 March 2019. IPTC-19418-MS.
8. Методические указания по расчету добычи нефти, газа и стабильного конденсата для формирования регламентной отчетности, учет движения фонда скважин: П1-01 С-001 М-007. 2007. 87 с.
9. Power BI: как автоматизировать аналитику, готовить отчеты и объединять данные. URL: <https://l-a-b-a.com/blog/show/269> (дата обращения: 25.10.2019).
10. Цифровое месторождение интеллектуальная система управления ТОРО. URL: <http://itpss.ru/docs/pos-materials/201710-Digital-Oilfield-Design-and-Implementation.pdf>.
11. Азбуханов А.Ф., Волков М.Г., Соловьев А.А., Халфин Р.С., Чермянин П.И. Бизнес-аналитика механизированного фонда нефтяных скважин // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Вып. 4 (110). С. 111–118. DOI: 10.17122/ntj-oil-2017-4-111-118.

References

1. Garipov T.R. Prognozirovaniye effektivnosti geologo-tekhnicheskikh meropriyatiy na mestorozhdeniyakh nefi na osnove sistemnogo podkhoda [Systematic Approach as the Basis for Prognosis of Effectiveness of Geological-Technical Measures in Oil Fields]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy — Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 2010, No. 2, pp. 45–47. [in Russian].
2. Sitnikov A.N., Asmandiyarov R.N., Pustovskikh A.A., Sheremeyev A.Yu., Zul'karniyev R.Z. Formirovaniye programm geologo-tekhnicheskikh meropriyatiy s pomoshch'yu tsifrovoy informatsionnoy sistemy «podbor GTM» [The Formation of Programs of Geological and Technical Measures Using the Digital Information System «Selection of Geological and Technical Measures»]. *PRONEFT'. Professional'no o nefi – PRONEFT'. Professionally About Oil*, 2017, No. 2 (4), pp. 39–46. [in Russian].
3. Popov N.I., Skarednov A.A., Khalin A.A. Analiz effektivnosti primeneniya geologo-tekhnicheskikh meropriyatiy na yurskikh otlozheniyakh [Analysis of the Effectiveness of the Use of Geological and Technical Measures on Jurassic Sediments]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Dostizheniya sovremennoy nauki»* [Materials of Scientific and Practical Conference «The Achievements of Modern Science»]. Ed. by A.I. Vostretsova. Sofiya, SORoS Publ., 2018, pp. 30–35. [in Russian].
4. Osnovnyye metody v biznes-analitike [The Main Methods in Business Analytics]. URL: <https://studfiles.net/preview/5022763/page:2> (accessed 15.10.2019). [in Russian].
5. Gululyan A.G. *Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti ispol'zovaniya tekhnologiy tsifrovyykh mestorozhdeniy pri prinyatii upravlencheskikh resheniy v neftegazovom proizvodstve: dis. ... kand. ekon. nauk* [Evaluation of the Economic Efficiency of the Use of Digital Field Technologies when Making Management Decisions in Oil and Gas Production: Cand. Econ. Sci. Dis.]. Moscow, Izd-vo RGU nefi i gaza (NIU) imeni I.M. Gubkina, 2017. 163 p. [in Russian].
6. Atnagulov A.R., Vavilov N.V., Zdol'nik S.Ye., Nezgovorov S.V., Kireyev G.A., Sharipov R.F., Galkin O.A., Skorokhodov A.A. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh biznes-protsessov PAO ANK «Bashneft'» na baze korporativnoy geoinformatsionnoy sistemy [Automation of Production Business Processes on the Basis of Corporate GIS Database, PJSOC Bashneft]. *Neftyanoye khozyaystvo – Oil Industry*, 2016, No. 1, pp. 102–105. URL: https://oil-industry.net/Journal/archive_detail.php?art=228063. [in Russian].
7. Xudong Y., Oladele B., Lei Y., Derek B., Roberto F. Intelligent Oilfield — Cloud Based Big Data Service in Upstream Oil and Gas. *International Petroleum Technology Conference held in Beijing, China, 26–28 March 2019*. IPTC-19418-MS.
8. *Metodicheskiye ukazaniya po raschetu dobychi nefi, gaza i stabil'nogo kondensata dlya formirovaniya reglamentnoy otchetnosti, uchet dvizheniya fonda skvazhin: P1-01 S-001 M-007* [Guidelines for the Calculation of Oil, Gas and Stable Condensate for the Formation of Regulatory Reporting, Accounting for the Movement of the Well Stock: P1-01 S-001 M-007]. 2007. 87 p. [in Russian].
9. *Power BI: kak avtomatizirovat' analitiku, gotovit' otchety i ob'yedinyat' dannyye* [Power BI: How to Automate Analytics, Prepare Reports and Combine Data]. URL: <https://l-a-b-a.com/blog/show/269> (accessed 25.10.2019). [in Russian].
10. *Tsifrovoye mestorozhdeniye intellektual'naya sistema upravleniya TORO* [Digital mine intelligent management system TORO]. URL: <http://itpss.ru/docs/pos-materials/201710-Digital-Oilfield-Design-and-Implementation.pdf>. [in Russian].
11. Azbukhanov A.F., Volkov M.G., Solov'yev A.A., Khalfin R.S., Chermyanin P.I. Biznes-analitika mekhanizirovannogo fonda neftyanykh skvazhin [Business Intelligence of the Mechanized Oil Well Stock]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov – Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2017, Issue 4 (110), pp. 111–118. DOI: 10.17122/ntj-oil-2017-4-111-118. [in Russian].



Андреанов А. В.
Andrianov A. V.
начальник лаборатории,
АО «Таганрогский
научно-исследовательский
институт связи»,
г. Таганрог,
Российская Федерация



Зикий А. Н.
Zikiy A. N.
кандидат технических
наук, старший научный
сотрудник,
доцент кафедры
«Информационная
безопасность
телекоммуникационных
систем» Института
компьютерных технологий
и информационной
безопасности,
ФГБОУ ВО «Южный
федеральный
университет»,
г. Таганрог,
Российская Федерация



Кочубей А. С.
Kochubey A. S.
инженер-конструктор
3 категории,
АО «Таганрогский
научно-исследовательский
институт связи»,
г. Таганрог,
Российская Федерация

УДК 621.375.4

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-82-88

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ ДЕЦИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Проведено экспериментальное исследование усилителя средней мощности на биполярных транзисторах. Измерены амплитудно-частотная характеристика в диапазоне частот 0,3–1300 МГц, амплитудные характеристики на частотах 500 и 1000 МГц, уровни второй и третьей гармоник за пределами рабочего диапазона частот. Коэффициент усиления в диапазоне рабочих частот 0,1–1 ГГц составляет не менее 46 дБ, максимальная мощность в режиме насыщения на частоте 500 МГц равна 23 дБм (200 мВт), на частоте 1000 МГц максимальная мощность не менее 22 дБм.

Усилитель состоит из шести каскадов, построенных по схеме Дарлингтона. Каскады усилителя охвачены отрицательной обратной связью как по высокой частоте, так и по постоянному току. Отрицательная обратная связь по высокой частоте служит для согласования каскадов с линией передачи 50 Ом. Отрицательная обратная связь по постоянному току стабилизирует режимы работы транзисторов в широком диапазоне температур.

Благодаря высоким электрическим параметрам усилитель может найти применение в приёмно-передающей и измерительной аппаратуре. Сравнение с другими моделями усилителей показывает явное преимущество по коэффициенту усиления и выходной мощности.

Конструктивно усилитель представляет собой корпус чашечного типа, в котором закреплены поликоровые печатные платы. На платы напаяны транзисторы и конденсаторы, а резисторы напылены (гибридная технология). Для защиты от климатических и механических воздействий корпус закрывается двумя крышками, запаянными по контуру.

Сложный характер амплитудной характеристики по второй гармонике (наличие падающего участка) можно объяснить прямым детектированием сигнала, изменением режима

работы каскадов усилителя по постоянному току, изменением угла отсечки и перераспределением мощности между гармониками.

Учитывая большой уровень гармоник на выходе усилителя (около 10 мВт), в некоторых случаях его можно использовать в качестве умножителя частоты.

Ключевые слова: усилитель, биполярный транзистор, диапазон рабочих частот, гармоника, эксперимент, амплитудно-частотная характеристика.

BROADBAND MEDIUM POWER AMPLIFIER FOR DECIMETER WAVES

An experimental study of an average power amplifier using bipolar transistors was conducted. The measured amplitude-frequency characteristic in the frequency range of 0.3–1300 MHz, amplitude of the frequencies 500 and 1000 MHz, second and third harmonics outside the frequency range. The gain in the operating frequency range of 0.1–1 GHz is at least 46 dB, the maximum power in saturation mode at 500 MHz is 23 dBm (200 mW), at 1000 MHz the maximum power is at least 22 dBm.

The amplifier consists of six stages built according to the Darlington scheme. The amplifier stages are covered by negative feedback for both high frequency and direct current. Negative feedback at a high frequency is used for matching cascades with a 50 Ohm transmission line. Negative DC feedback stabilizes the operation modes of transistors over a wide temperature range.

Due to the high electrical parameters, the amplifier can be used in receiving-transmitting and measuring equipment. Comparison with other models of amplifiers shows a clear advantage in terms of gain and output power.

Structurally, the amplifier is a Cup-type housing, in which polycore printed circuit boards are fixed. Transistors and capacitors are soldered to the boards, and resistors are sprayed (hybrid technology). For protection from climatic and mechanical influences, the case is closed with two lids sealed along the contour.

The complex nature of the amplitude characteristic for the second harmonic (the presence of a falling section) can be explained by direct detection of the signal, changing the mode of operation of the amplifier stages by direct current, changing the cut-off angle and redistributing power between harmonics.

Given the high level of harmonics at the output of the amplifier (about 10 mW), in some cases it can be used as a frequency multiplier.

Key words: amplifier, bipolar transistor, operating frequency range, harmonic, experiment, amplitude-frequency response.

Введение

Усилители средней мощности нашли широкое применение в гетеродинных трактах приёмников, в промежуточных и оконечных каскадах усилителей мощности передатчиков, в измерительной аппаратуре. Их исследованию посвящен ряд монографий и учебных пособий [1–6], статьи [7, 8] и другие издания. Однако потребности практики всегда шире, чем номенклатура усилителей мощности, предлагаемых на рынке России [9, 10], поэтому их исследование является актуальным.

Объектом исследования является транзисторный многокаскадный усилитель дециметровых волн. Целью исследования является получение амплитудной и амплитудно-

частотной характеристики (АЧХ), а также оценка уровней третьей и второй гармоник.

К усилителю предъявляются следующие требования:

- диапазон рабочих частот 0,1–1,0 ГГц;
- максимальная выходная мощность около 200 мВт (23 дБм);
- коэффициент усиления не менее 40 дБ;
- напряжение питания минус 12,6 В;
- входной и выходной соединители – тип IX по ГОСТ13317.

Схема и конструкция

Усилитель построен из двухтранзисторных каскадов по схеме Дарлингтона. Обратная связь по высокой частоте обеспечивает коррекцию частотной характеристики и согласование входа и выхода усилителя

с СВЧ трактом 50 Ом. Обратная связь по постоянному току обеспечивает стабилизацию режимов транзисторов при работе в широком диапазоне температур. Усилитель имеет 6 каскадов усиления.

Эксперимент

Первый эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 1. Основной прибор – измеритель комплексных коэффициентов передачи «Обзор-103». Для исключения перегрузки

усилителя с большим коэффициентом усиления и прибора «Обзор-103» измерительная установка включает аттенюаторы 30 дБ и 20 дБ. «Обзор-103» калибровался вместе с аттенюаторами, поэтому поправки в АЧХ вносить не требуется. Результат измерения амплитудно-частотной характеристики показан на рисунке 2. Из этого рисунка видно, что коэффициент усиления усилителя составляет не менее 47 дБ в полосе от 0,1 до 1 ГГц.

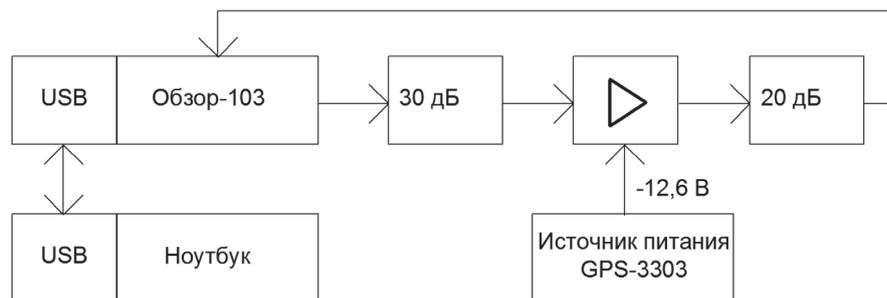


Рисунок 1. Структурная схема измерительной установки

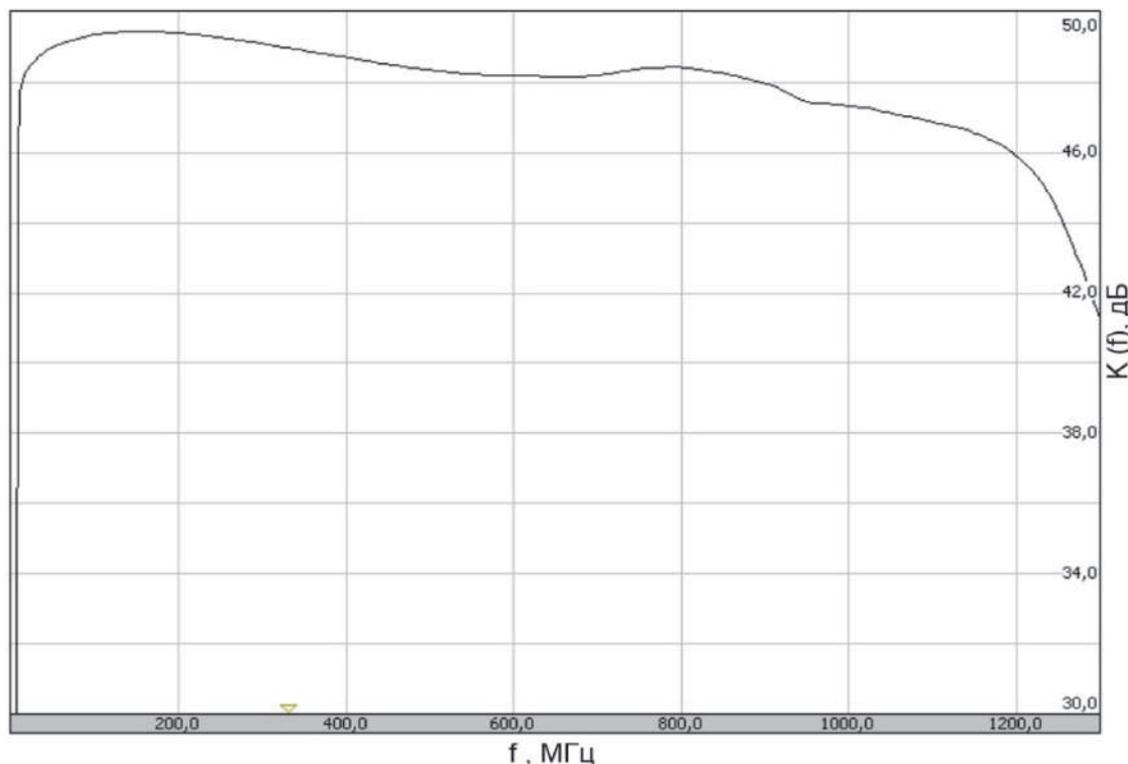


Рисунок 2. АЧХ усилителя в полной полосе прибора «Обзор-103»

Второй эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 3. В качестве источника сигнала использован генератор сигналов высокочастотный ГСВЧ-3000. В качестве индикатора частоты и мощности выходного сигнала применён анализатор спектра типа GSP-827.

Результаты измерения выходной мощности заносились в таблицу 1, второй и четвёртый столбцы. В третий и пятый столбцы внесено расчётное значение мощности на выходе усилителя, учитывающее затухание в аттенюаторе 10 дБ. По данным третьего и пятого столбцов построены амплитудные характе-

ристики на рисунке 4. Из этого рисунка видно, что мощность насыщения на частоте

500 МГц составляет 23 дБм (200 мВт), а на частоте 999 МГц – 22,6 дБм.

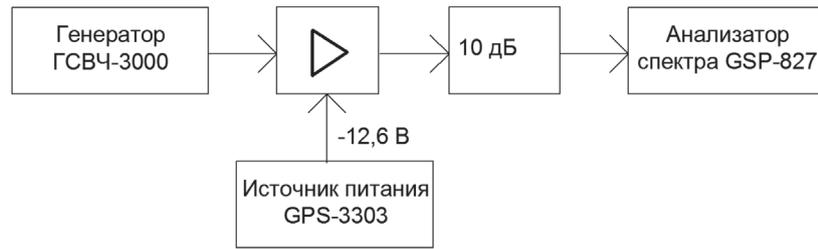


Рисунок 3. Измерительная установка для снятия амплитудной характеристики

Таблица 1. Амплитудные характеристики усилителя

Рвх, дБ	АХ на частоте 500 МГц		АХ на частоте 999,0 МГц	
	Измеренная Рвых, дБм (после аттенюатора 10 дБ)	Пересчитанная Рвых, дБм	Измеренная Рвых, дБм (после аттенюатора 10 дБ)	Пересчитанная Рвых, дБм
-30	3,8	13,8	4,8	14,8
-29	4,8	14,8	5,7	15,7
-28	5,8	15,8	6,5	16,5
-27	7,0	17,0	7,3	17,3
-26	7,9	18,0	7,9	17,9
-25	8,9	18,9	8,4	18,4
-24	9,7	19,7	9,0	19,0
-23	10,3	20,3	9,3	19,3
-22	10,8	20,8	9,7	19,7
-21	11,1	21,1	10,0	20,0
-20	11,5	21,5	10,5	20,5
-19	11,8	21,8	10,9	20,9
-18	12,2	22,2	11,1	21,1
-17	12,3	22,3	11,7	21,7
-16	12,5	22,5	12,2	22,2
-15	12,7	22,7	12,3	22,3
-14	12,9	22,9	12,5	22,5
-13	13,0	23,0	12,6	22,6
-12	13,0	23,0	12,6	22,6

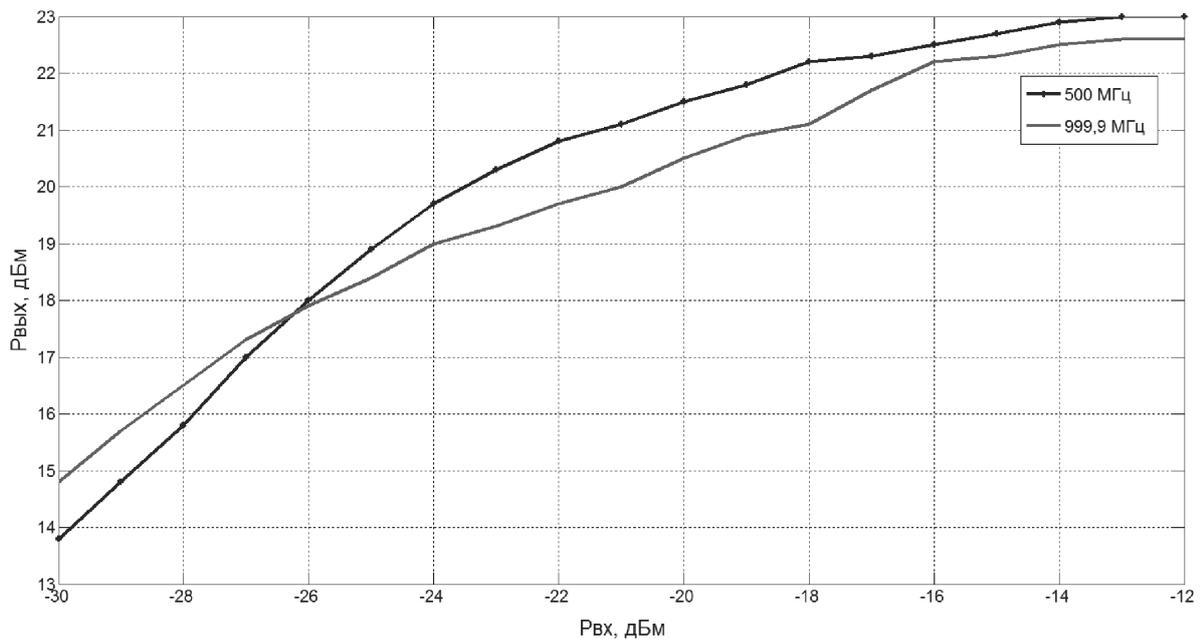


Рисунок 4. Амплитудные характеристики усилителя

Третий эксперимент по измерению мощности второй и третьей гармоник проводился на установке, показанной на рисунке 3. Сперва на вход усилителя подавался сигнал на частоте 999,9 МГц, а снимался уровень сигнала на выходе усилителя на частоте 1999,8 МГц. Результаты измерения уровня второй гармоники занесены в таблицу 2. Потом на вход усилителя подавался сигнал с

Таблица 2. Уровень второй гармоники при частоте на входе 999,9 МГц

Рвх, дБ	Измеренная Рвых, дБм	Пересчитанная Рвых, дБм
-30	-35,0	-25,0
-29	-29,1	-19,1
-28	-23,3	-13,3
-27	-17,7	-7,7
-26	-14,2	-4,2
-25	-11,2	-1,2
-24	-9,0	1,0
-23	-7,0	3,0
-22	-5,4	4,6
-21	-4,2	5,8
-20	-3,2	6,8
-19	-2,4	7,6
-18	-1,9	8,1
-17	-2,1	7,9
-16	-3,1	6,9
-15	-3,9	6,1
-14	-4,8	5,2
-13	-5,6	4,4
-12	-6,5	3,5
-11	-7,4	2,6
-10	-8,2	1,8
-9	-8,9	1,1
-8	-9,3	0,7
-7	-9,4	0,6
-6	-9,2	0,8
-5	-9,1	0,9
-4	-8,7	1,3
-3	-8,2	1,8
-2	-7,8	2,2
-1	-7,5	2,5
0	-6,9	3,1

частотой 500 МГц. На выходе усилителя оценивался уровень сигнала на частоте 1500 МГц. Результаты измерения уровня третьей гармоники занесены в таблицу 3. По данным из третьих столбцов таблиц 2 и 3 на рисунке 5 построены амплитудные характеристики для второй и третьей гармоник.

Кривая для второй гармоники имеет падающий участок.

Таблица 3. Уровень третьей гармоники при частоте на входе 500 МГц

Рвх, дБ	Измеренная Рвых, дБм	Пересчитанная Рвых, дБм
-30	-35,9	-25,9
-29	-33,0	-23,0
-28	-29,2	-19,2
-27	-25,7	-15,7
-26	-21,2	-11,2
-25	-16,4	-6,4
-24	-12,9	-2,9
-23	-11,1	-1,1
-22	-10,1	-0,1
-21	-9,6	0,4
-20	-9,0	1,0
-19	-8,6	1,4
-18	-7,7	2,3
-17	-6,8	3,2
-16	-5,7	4,3
-15	-4,7	5,3
-14	-3,0	7,0
-13	-1,8	8,2
-12	-1,1	8,9
-10	-0,7	9,3
-11	-0,5	9,5
-9	-0,4	9,6
-8	-0,2	9,8
-7	-0,2	9,8
-6	-0,3	9,7
-5	-0,2	9,8
-4	-0,1	9,9
-3	-0,1	9,9
-2	-0,1	9,9
-1	-0,1	9,9
0	-0,1	9,9

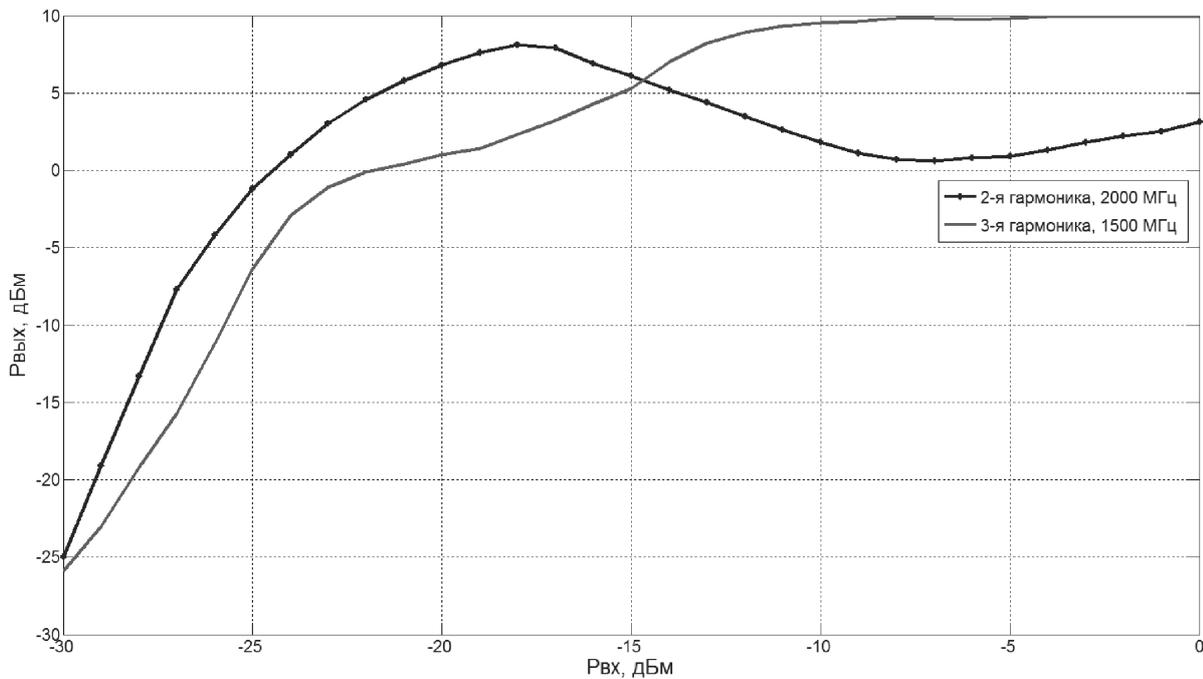


Рисунок 5. Амплитудные характеристики для второй и третьей гармоник

Выводы

1. В таблице 4 проведено сравнение заданных и достигнутых в эксперименте параметров усилителя.

Из этой таблицы видно, что все требования к усилителю выполняются.

2. Сложный характер амплитудной характеристики второй гармоники можно объяснить прямым детектированием сиг-

нала, изменением режима работы каскадов усилителя по постоянному току, изменением угла отсечки и перераспределением мощности между гармониками.

3. Учитывая большой уровень гармоник на выходе усилителя (~10 мВт), в некоторых случаях его можно использовать в качестве умножителя частоты.

Таблица 4. Основные параметры усилителя

Наименование параметра, размерность	Задано	Эксперимент
Диапазон рабочих частот, МГц	100–1000	100–1200
Максимальная мощность выходного сигнала в режиме насыщения, дБм	23	23
Максимальный коэффициент усиления в режиме слабого сигнала, дБ, не менее	40	46
Напряжение питания, В	-12,6	-12,6
Максимальный ток потребления, мА	850	750
Входной и выходной соединители	тип IX	
ГОСТ13317	тип IX	
ГОСТ13317		
Подавление третьей гармоники при входной мощности -12 дБм на частоте сигнала 500 МГц, дБ	-	14
Подавление второй гармоники при входной мощности -12 дБм на частоте сигнала 999,9 МГц, дБ	-	19

Список литературы

1. Титов А.А. Транзисторные усилители мощности МВ и ДМВ. Расчёт, изготовление, настройка. М.: Солон-Пресс, 2006. 328 с.

2. Титов А.А., Ильюшенко В.Н. Схемотехника сверхширокополосных и полосовых усилителей мощности: учеб. пособие. М.: Радиотехника, 2007. 208 с.

3. Титов А.А. Повышение выходной мощности усилителей радиопередающих устройств. М.: Горячая линия – Телеком, 2013. 142 с.

4. Ровдо А.А. Схемотехника усилительных каскадов на биполярных транзисторах. М.: Изд. дом «Додэка XXI», 2002. 256 с.

5. Ежков Ю.А. Справочник по схемотехнике усилителей. М.: ИП Радио Софт, 2002. 272 с.

6. Романюк В.А. Аналоговые устройства приёмопередатчиков. М.: Солон-Пресс, 2018. 144 с.

7. Зикий А.Н., Давтян А.Д., Падалко А.Д., Ронис В.Н., Шутов И.И. Полосовой усилитель мощности УКВ диапазона // Инновации в науке и практике: матер. X Междунар. науч.-практ. конф.: в 4 ч./ Отв. ред. А.Р. Халиков. 2018. С. 61–69.

8. Зикий А.Н., Зламан П.Н., Мамченко С.О., Пустовалов А.И. Два малошумящих усилителя // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4731.

9. Карпов Ю. Отечественные транзисторные усилители СВЧ // Компоненты и технологии. 2007. № 1.

10. Белов А.А. Устройства формирования СВЧ сигналов и их компоненты. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 320 с.

References

1. Titov A.A. *Tranzistornyye usiliteli moshchnosti MV i DMV. Raschot, izgotovleniye, nastroyka* [MV and DMV Transistor Power Amplifiers. Calculation, Manufacturing, Tuning]. Moscow, Solon-Press Publ., 2006. 328 p. [in Russian].

2. Titov A.A., Il'yushenko V.N. *Skhemotekhnika sverkhshirokopolosnykh i polosovykh usiliteley moshchnosti: ucheb. posobiye* [Circuitry of Ultra-wideband and Strip Power Amplifiers: Textbook]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2007. 208 p. [in Russian].

3. Titov A.A. *Povysheniye vykhodnoy moshchnosti usiliteley radioperedayushchikh ustroystv* [Increase the Output Power of Amplifiers of Radio Transmitting Devices]. Moscow,

Goryachaya liniya — Telekom Publ., 2013. 142 p. [in Russian].

4. Rovdo A.A. *Skhemotekhnika usilitel'nykh kaskadov na bipolyarnykh tranzistorakh* [Circuitry of Amplifier Stages on Bipolar Transistors]. Moscow, Dodeka XXI Publ., 2002. 256 p. [in Russian].

5. Yezhkov Yu.A. *Spravochnik po skhemotekhnike usiliteley* [Handbook of Amplifier Circuitry]. Moscow, IP Radio Soft, 2002. 272 p. [in Russian].

6. Romanyuk V.A. *Analogovyye ustroystva priyomoperedatchikov* [Analog Transceiver Devices]. Moscow, Solon-Press Publ., 2018. 144 p. [in Russian].

7. Zikiy A.N., Davtyan A.D., Padalko A.D., Ronis V.N., Shutov I.I. *Polosovoy usilitel' moshchnosti UKV diapazona* [VHF Band Power Amplifier]. *Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Innovatsii v nauke i praktike»: v 4 ch.* [Materials of X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Science and Practice»: in 4 Ch.]. Ed. by A.R. Khalikov. 2018, pp. 61–69. [in Russian].

8. Zikiy A.N., Zlaman P.N., Mamchenko S.O., Pustovalov A.I. *Dva maloshumyashchikh usiliteleya* [Two Low-Noise Amplifiers]. *Inzhenernyy vestnik Dona — Engineering Bulletin of Don*, 2018, No. 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4731. [in Russian].

9. Karpov Yu. *Otechestvennyye tranzistornyye usiliteli SVCh* [Domestic Microwave Transistor Amplifiers]. *Komponenty i tekhnologii — Components and Technologies*, 2007, No. 1. [in Russian].

10. Belov A.A. *Ustroystva formirovaniya SVCh signalov i ikh komponenty* [Microwave Signal Generating Devices and Their Components]. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI, 2010. 320 p. [in Russian].



Шулаева Е. А.
Shulaeva E. A.
кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», ФГБОУ ВО «Уфимский нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация



Маштанов Н. М.
Mashtanov N. M.
студент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», ФГБОУ ВО «Уфимский нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация



Иванов А. Н.
Ivanov A. N.
аспирант, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», г. Уфа, Российская Федерация

УДК 004.94

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-89-96

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ РТУТНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАУСТИЧЕСКОЙ СОДЫ МЕТОДОМ ИМИТАЦИИ ОТЖИГА

В данной статье представлена оптимизация процесса работы ртутного электролизера. Наиболее эффективным из электрохимических методов получения каустической соды является электролиз с жидким ртутным катодом. Каустическая сода, полученная таким методом, значительно чище, полученной диафрагменным способом, а сам процесс гораздо проще, чем мембранный метод.

Ртутный электролиз является сложным процессом с множеством взаимосвязанных параметров, которые, к тому же, нередко представляют собой графики с множеством локальных экстремумов. Поэтому оптимизация процесса электролиза является многокритериальной оптимизацией, в которой опасно или просто невозможно игнорировать отдельные параметры.

Для эффективной оптимизации сложных процессов с множеством взаимосвязанных параметров можно использовать метод имитации отжига.

Метод имитации отжига — это один из основных методов многомерной оптимизации, которая использует регламентированный случайный поиск на подобию с процессом формирования вещества кристаллической структуры с выделением минимальной энергии при охлаждении.

Преимуществом данного метода оптимизации служит вероятность исключения локальных минимумов оптимизирующей функции, а также возможность применения для оптимизации процессов со сложным рельефом функций значений и с большим количеством критериев оптимизации.

Оптимизация режима работы ртутного электролизера позволит найти такие значения входных параметров, при которых каустическая сода будет иметь необходимую чистоту, соблюдая при этом требования безопасности работы электролизера для предотвращения катастрофических последствий.

Целью данной работы является многокритериальная оптимизация режима работы ртутного электролиза при заданных условиях.

В ходе работы было разработан и реализован на языке Python алгоритм реализации оптимизации работы модели ртутного электролизера на основе нейронных сетей. В результате многокритериальной оптимизации были установлены оптимальные входные и получены оптимальные выходные параметры режимов работы ртутного электролизера.

Ключевые слова: ртутный электролизёр, каустическая сода, многомерная оптимизация, метод имитации отжига, Python.

MULTI-CRITERIAL OPTIMIZATION OF THE WORK OF A MERCURY ELECTROLYZER FOR PRODUCING CAUSTIC SODA BY ANNEALING SIMULATIONS

This article presents the optimization of the mercury electrolyzer operation process. The most effective of the electrochemical methods for producing caustic soda is electrolysis with a liquid mercury cathode. Caustic soda obtained by this method is much cleaner than the obtained by diaphragm method, and the process is much simpler than the membrane method.

Mercury electrolysis is a complex process with many interrelated parameters, which, moreover, are often plots with many local extremes. Therefore, optimization of the electrolysis process is a multi-criteria optimization in which it is dangerous or simply impossible to ignore individual parameters.

To effectively optimize complex processes with many interrelated parameters, you can use the annealing simulation method.

The method of simulated annealing is one of the main methods of multidimensional optimization, which uses a regulated random search on similarity with the process of forming a substance of a crystal structure with the release of minimal energy during cooling.

The advantage of this optimization method is the probability of excluding local minima of the optimizing function, as well as the possibility of using it to optimize processes with complex relief of value functions, and with a large number of optimization criteria.

Optimization of the operation mode of a mercury electrolyzer will allow one to find input parameter values at which caustic soda will have the necessary purity, while observing the safety requirements of the electrolyzer to prevent catastrophic consequences.

The aim of this work is multicriteria optimization of the operation mode of mercury electrolysis under given conditions.

In the course of work, an algorithm for optimizing the operation of a model of a mercury electrolyzer based on neural networks was developed and implemented in Python. As a result of multicriteria optimization, the optimal input parameters were established and the optimal output parameters of the operating modes of the mercury cell were obtained.

Key words: mercury electrolyzer, caustic soda, multidimensional optimization, annealing simulation method, Python.

Многие практические задачи имеют комплексный многомодальный состав функций значений, содержащих локальные экстремумы [1, 2].

Некоторые вычислительные методы непригодны для нахождения абсолютного максимума подобных функций.

Переборный метод является весьма неэффективным, так как при увеличении шага уменьшается точность и за максимальное значение принимается глобальный минимум. При уменьшении шага точность начинает расти, как и время его расчета. Случайный метод также имеет невысокую точность [3].

Наиболее соответствующим способом для решения многомерной оптимизации данного процесса служит метод имитации отжига [4].

Для конкретной схемы метода отжига необходимо определить следующие параметры: закон изменения температуры $T(k)$, где k — номер шага; вероятностное распределение $Q(x; T)$; функция вероятности принятия $h(\Delta E; T)$.

В данной работе принят следующий алгоритм имитации отжига:

— Начальная точка $x = x^0$; $x^0 \in S$. Текущее значение энергии системы E устанавливается как $f(x^0)$.

- Шаги основного цикла k-ой итерации:
 - а) Сравнение E в состоянии x с определенным на текущий момент глобальным минимумом. Если $E = f(x)$ меньше, то значение глобального минимума необходимо изменить.
 - б) Генерация $x^1 = G(x; T(k))$.
 - в) Вычисление $E^1 = f(x^1)$.
 - г) Генерация случайного числа α из $[0; 1]$.
 - д) Если $\alpha < h(E^1 - E; T(k))$, то $x \leftarrow x^1$; $E \leftarrow E^1$ и осуществляется переход к следующей итерации. Иначе повторяется шаг (б), пока не будет определена точка x^1 , удовлетворяющая условию.

Решение данной задачи было осуществлено на языке Python. IPython составляют интерактивная оболочка с большим набором

возможностей и ядро для Jupyter, которое является командной веб-оболочкой для Python, и применяет идею консольного подхода к интерактивным вычислениям [5].

На рисунке 1 представлен выбор нейросетей для оптимизации в Jupyter Notebook. При этом выбрав оптимальную нейронную сеть, оставляем возможность проведения оптимизации и на других нейронных сетях.

Зададим интервалы вариации входных и выходных параметров (рисунок 2): `intervals / out_intervals` — массив оптимальных значений для каждого из входных/выходных параметров; `in_intervals / out_hard_intervals` — массив граничных условий для входных/выходных параметров процесса, выход за которые является недопустимым.

```
In [8]: # Электричество
# parser.setneuronet(r'Нейросеть [8 x 40 x 4]', parse=True)
parser.setneuronet(r'Нейросеть [8 x75 x75 x 4] эл', parse=True)
# parser.setneuronet(r'Нейросеть [8 x 635 x 4]', parse=True)

nw_electric = neuronet()
nw_electric.loader(parser.neurodata)

In [9]: # Анолит
# parser.setneuronet(r'Нейросеть [8 x 2000 x 2]', parse=True)
# parser.setneuronet(r'Нейросеть [8 x 183 x 2]', parse=True)
parser.setneuronet(r'Нейросеть [8 x 63 x 63 x 2]', parse=True)

nw_anolit = neuronet()
nw_anolit.loader(parser.neurodata)

In [10]: # Хлор
# parser.setneuronet(r'Нейросеть [8 x 40 x 4] хлор', parse=True)
# parser.setneuronet(r'Нейросеть [8 x75 x75 x 4]', parse=True)
parser.setneuronet(r'Нейросеть [8 x 912 x 4] хлор', parse=True)

nw_chlore = neuronet()
nw_chlore.loader(parser.neurodata)
```

Рисунок 1. Выбор нейросетей

<pre>In [12]: # Интервалы вариации #intervals = parser.neurodata['inp_norm'] intervals = [[0, 5], [0, 500], [0, 1.6], [0, 100], [0, 100], [265, 315], #[290, 315] [0, 1250], [0, 12]] in_intervals = [[2.5, 3.5], [300, 500], [0.5, 0.8], [30, 50], [70, 85], [290, 315], [600, 900], [7.5, 10.5]]</pre> <p>а)</p>	<pre>In [15]: # Выходные интервалы out_intervals = [[80, 85], [3, 4.9], [3, 4.9], [3, 4.9], [3, 4.9], [0, 1.5], [96, 100], [60, 80], [15, 75], [260, 320]] out_hard_intervals = [[-50, 150], [0, 5], [0, 5], [0, 5], [0, 5], [0, 4], [0, 100], [0, 100], [0, 100], [0, 330]]</pre> <p>б)</p>
---	---

Рисунок 2. Интервалы вариации: входных параметров (а), выходных параметров (б)

Далее необходимо представить оптимизирующий функционал в математической форме. При этом будем учитывать тот факт, что оптимальным значением для каждого из входных/выходных параметров является его нахождение внутри оптимального диапазона, которые были заданы в переменных `in_intervals` и `out_intervals`. При этом если значение данного параметра находится в центре оптимального диапазона, будем считать данное значение наиболее оптимальным. В центре диапазона ошибка оптимизации должна быть равна 0. При удалении ошибки от центра ошибка должна расти. С целью того, чтобы функционал оптимизации имел производную, зависимость должна быть как минимум квадратической. Поставим, что на границах оптимального диапазона функционал ошибки будет принимать значение 1. Тогда функционал ошибки представляет собой параболу с вершиной в центре оптимального диапазона, имеющем значение 0, и при значениях на границах 1. В таком случае пусть a и b — границы оптимального диапазона. Тогда $\frac{a+b}{2}$ — это середина диапазона. Расстояние от центра диапазона до каждой из границ может быть выражено формулой $b - \frac{a+b}{2}$ — данное значение будет являться коэффициентом масштаба для нашей параболы. В таком случае наше значение параметра x в данный момент времени находится на удалении от центра $x - \frac{a+b}{2}$, тогда соотношение будет следующее: $\left(\frac{x - \frac{a+b}{2}}{b - \frac{a+b}{2}}\right)^2$. Далее мы получаем следующую формулу ошибки отклонения: $\left(\frac{x - \frac{a+b}{2}}{1/2(b-a)}\right)^2 = \left(\frac{2(x - \frac{a+b}{2})}{b-a}\right)^2$. Эта формула описывает функционал ошибки для параметра, оптимальное значение которого мы будем принимать строго в центре интервала.

Однако существуют параметры, для которых оптимальное значение находится на границе интервалов. Например, для параметра, отвечающего за выход по напряжению, допустимая граница в интервале от 0 до 5. Необходимо стремиться, чтобы значение выхода

по току было оптимальным. В таком случае коэффициент оптимизации будем описывать как полупараболу, вершины которой находятся на оптимальной границе. Если оптимальное значение находится на нижней границе, то формула приобретает вид $to_min\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2$. Если же оптимальной является верхняя граница, тогда функционал оптимизации принимает значение $to_max\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2$. Данный функционал оптимизации работает для каждого параметра отдельно. Чтобы вывести общий удельный функционал оптимизации, нам необходимо найти взвешенную сумму частных функционалов оптимизации (рисунок 3).

В нашем случае мы будем считать веса всех функционалов одинаковыми и равными 1/8 для входных и 1/10 для выходных параметров, что соответствует доле данного параметра из общего количества. Найдя взвешенную сумму, мы получаем общий функционал оптимизации как для входных, так и для выходных параметров. Сумма данных функционалов будет являться единым функционалом оптимизации для всего процесса. Таким образом, при решении нашей задачи мы оптимизируем как входные, так и выходные параметры по оптимальным диапазонам в соответствии с рабочим регламентом ведения процесса.

На следующем шаге задаем математическую модель процесса ртутного электролиза и его минимизирующий функционал. Рассматриваем весь диапазон входных параметров. При этом лимит эпох равен 10000, а начальная температура равна 0,000001 (рисунок 4).

В ходе работы мы видим, что значение критерия оптимизации не меняется на протяжении заданного предельного количества эпох оптимизации, что является условием окончания моделирования. Таким образом, было получено 10000 эпох (рисунок 5).

После завершения поиска оптимума были получены следующие значения входных и выходных параметров технологического процесса (рисунки 6, 7).

```
In [16]: # Оптимизирующий функционал

def otklonenie(val, interval):
    medium = sum(interval) / 2
    return (2 * (val - medium) / (interval[1] - interval[0])) ** 2

def otklonenie_to_min(val, interval):
    return ((val - min(interval)) / (interval[1] - interval[0])) ** 2

def otklonenie_to_max(val, interval):
    return ((max(interval) - val) / (interval[1] - interval[0])) ** 2

def func(x, y):
    coeffs = [1 / len(y)] * len(y)
    coeffs_x = [1 / len(x)] * len(x)
    regular = 1.0

    err = 0
    # 0 - температура анолита
    i = 0
    err += coeffs[i] * otklonenie(y[i], out_intervals[i])
    # 1 - напряжение рамы электролизера № 1
    i = 1
    err += coeffs[i] * otklonenie(y[i], out_intervals[i])
    # 2 - напряжение рамы электролизера № 2
    i = 2
    err += coeffs[i] * otklonenie(y[i], out_intervals[i])
    # 3 - напряжение рамы электролизера № 3
    i = 3
    err += coeffs[i] * otklonenie(y[i], out_intervals[i])
    # 4 - напряжение рамы электролизера № 4
    i = 4
    err += coeffs[i] * otklonenie(y[i], out_intervals[i])
    # 5 - объемная доля водорода в хлоргазе
    i = 5
    err += coeffs[i] * otklonenie_to_min(y[i], out_intervals[i])
    # 6 - концентрация хлора в хлоргазе
    i = 6
    err += coeffs[i] * otklonenie_to_max(y[i], out_intervals[i])
    # 7 - температура хлоргаза
    i = 7
    err += coeffs[i] * otklonenie(y[i], out_intervals[i])
    # 8 - разряжение хлоргаза
    i = 8
    err += coeffs[i] * otklonenie(y[i], out_intervals[i])
    # 9 - концентрация NaCl в анолите
    i = 9
    err += coeffs[i] * otklonenie(y[i], out_intervals[i])

    err_x = 0
    for i in range(len(x)):
        err_x += coeffs_x[i] * otklonenie(x[i], in_intervals[i])

    return err + regular * err_x
```

Рисунок 3. Оптимизирующий функционал

```
In [66]: # Задаем математическую модель
opt.model = model
# Задаем минимизирующий функционал
opt.func = func
# В качестве начальной точки - пример входных данных
opt.initialize(sample)
# Интервалы вариации
opt.intervals = intervals
# Все входные параметры - вариативные
opt.var = [True] * 8
# Ограничение эпох - включено
opt.epochs = True
# Лимит эпох
opt.epochs_limit = 10000
# Начальная температура, К
opt.t0 = 0.000001
# Метод "остывания" системы - Больцмана
opt.method = 'boltzman'
# opt.method = 'koshi'
# Минимизация
opt.maximization = False
# Печать логов - включена
opt.print_log = True
```

Рисунок 4. Настройка параметров оптимизации

```
In [69]: opt.start()

step: 9998      energy: 0.09433185810345197      t: 1.8857479937066469e-07
input: [2.840531879523406, 376.89527499968074, 0.7631148502995393, 41.00083039732445, 79.53763973890986, 299.82035079856524,
751.2081712813939, 9.625186994493784]
output: [81.89564205452318, 4.419997794692439, 4.408013582793546, 4.054211212122675, 4.427767680494308, 1.066662104456877, 9
8.60771031244761, 73.48907585008274, 19.604799353761255, 281.8103968920167]

step: 9999      energy: 0.09433185810345197      t: 1.8857362047581294e-07
input: [3.013725610648771, 407.282905366418, 0.7436577266852411, 41.23902169962652, 75.49676714299271, 301.05847673767755, 71
4.8462609190193, 9.381456699830366]
output: [80.65757641811153, 3.51519537657867, 3.978568471200705, 3.8957519063319594, 3.6802716432679397, 1.0905732894567972,
98.59720293406232, 73.42325177171, 0.00031864921499580795, 261.7029751346488]

step: 10000     energy: 0.09433185810345197      t: 1.8857244172444134e-07
input: [2.9291684047170037, 418.0481691576798, 0.6938862925659454, 33.847450393225344, 83.00852715481952, 298.95181887057424,
770.4688199038977, 8.973193403328974]
output: [81.85757289249133, 4.419997974409704, 4.401475803765544, 3.9314156880979185, 4.428151816551787, 1.2135070108710246,
98.52552835176178, 51.24194550697449, 2.4644580432883223, 284.309925983136]
```

Рисунок 5. Полученные эпохи

```
In [71]: # Оптимальные входные параметры

for i in range(len(opt.val)):
    print(parser.neurodata['inp_names'][i], opt.val[i], sep='\t\t')

pH:                2.966211790724382
I:                 394.76445592333215
Q_aqua:            0.6768685383818174
T_aqua:            38.80657612238932
T_ras:             78.41678816842165
C_NaCl_ras:        300.6776378841346
Q_ras:             778.5287091005944
Q_Hg:              9.078987439780846
```

Рисунок 6. Оптимальные входные параметры

```
In [72]: # Оптимальные выходные параметры
out_names = ['T_anolit', 'E1', 'E2', 'E3', 'E4', 'C_H2_in_C12', 'C_C12', 'T_C12', 'P_C12', 'C_NaCl_anolit']

for i in range(len(opt.out)):
    print(out_names[i], opt.out[i], sep='\t\t')

T_anolit:          81.90187497250359
E1:                3.9177894610502277
E2:                4.0005746438330725
E3:                4.027660023779239
E4:                3.931769483224573
C_H2_in_C12:       1.0285757406604321
C_C12:             98.60640275402054
T_C12:             72.4734469360902
P_C12:             42.79118882606082
C_NaCl_anolit:     297.09172593031235
```

Рисунок 7. Оптимальные выходные параметры

С прохождением 10000 эпох значение оптимизирующего функционала в точке оптимума достигает 0,09433185810345197 (рисунок 8).

На рисунках 9, 10 показано изменение входных/выходных параметров процесса в ходе оптимизации методом имитации отжига. Отображаются входные/выходные параметры для наиболее эффективного ведения процесса.

Рисунок 11 иллюстрирует, как меняется минимальный функционал оптимизации и как осуществляется процесс минимизации функционала оптимизации.

В результате многокритериальной оптимизации было установлено, что оптималь-

ными входными значениями являются: водородный показатель pH рассола на электролизеры 2,966 pH; сила тока на электролизер 394,68 кА; расход обессоленной воды в передние карманы электролизной ванны 0,6769 м³/ч; температура обессоленной воды 38,807 °С; температура рассола на электролизеры 78,417 °С; концентрация NaCl в рассоле 300,68 г/л; объемный расход рассола на электролизеры 778,53 м³/ч; объемный расход ртути в электролизере 9,079 м³/ч.

При данных входных параметрах получены следующие значения выходных параметров: температура анолита 81,9 °С; напряжение рамы электролизера № 1 — 3,917 В; напряжение рамы электролизера № 2 — 4 В;

```
In [73]: # Значение оптимизирующего функционала в точке оптимума
print(opt.error)
0.09433185810345197
```

Рисунок 8. Значение оптимизирующего функционала в точке оптимума

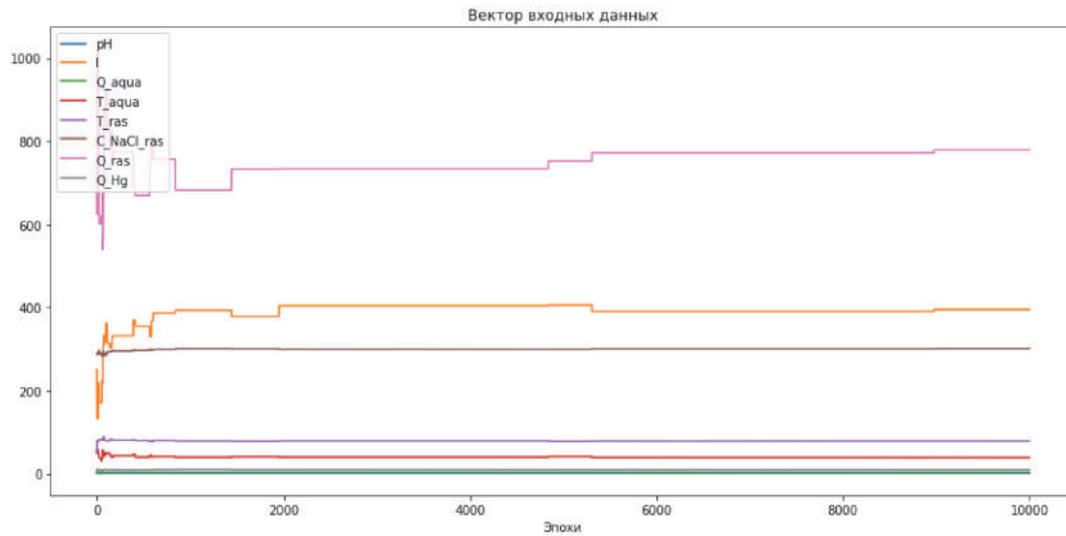


Рисунок 9. Вектор входных данных

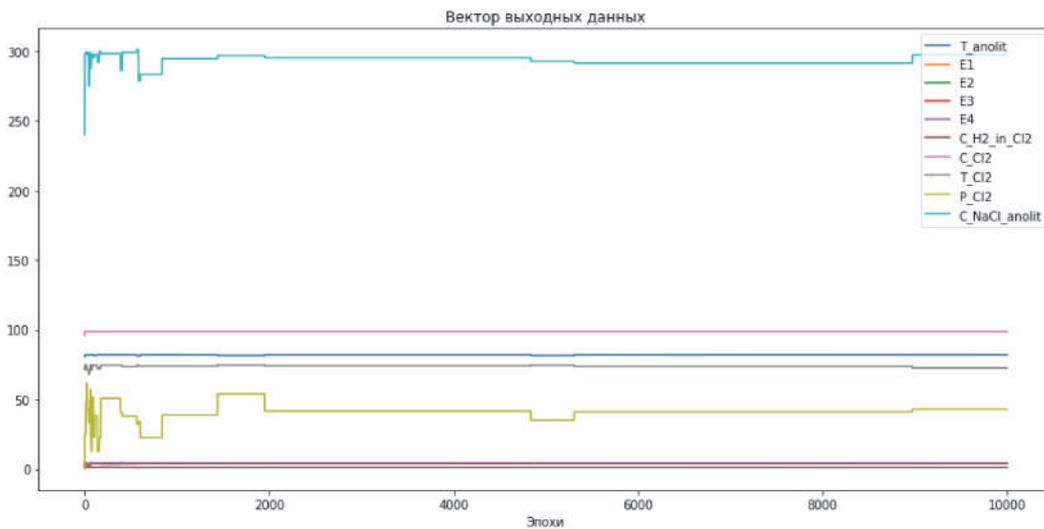


Рисунок 10. Вектор выходных данных

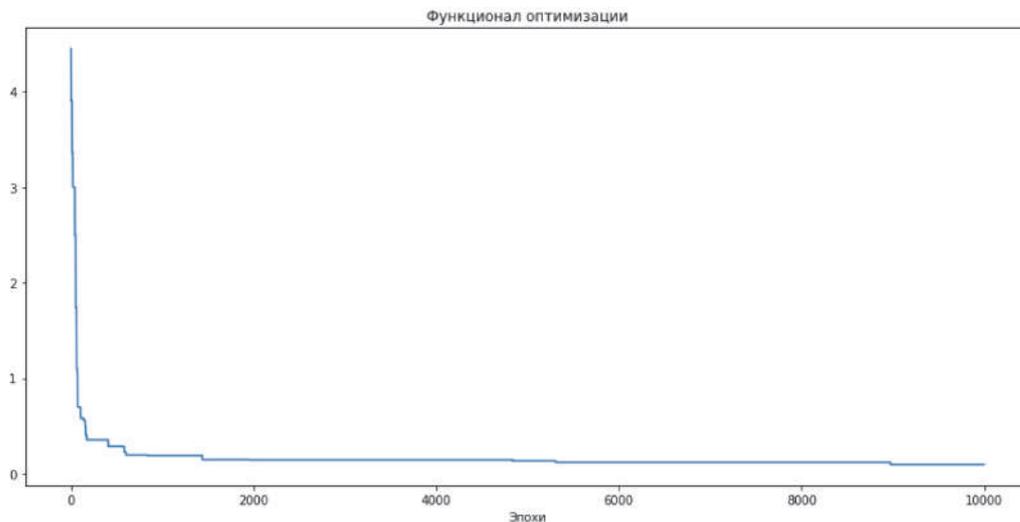


Рисунок 11. Функционал оптимизации

напряжение рамы электролизера № 3 — 4,0277 В; напряжение рамы электролизера № 4 — 3,9318 В; объемная доля водорода в хлорогазе 1,0286 % об.; концентрация хлора в хлорогазе 98,6064 % об.; температура хлорогаза 72,4734 °С; разряжение хлорогаза 42,7912 мм.вод.ст.; концентрация NaCl в анолите 297,0917 г/л.

Значение ошибки оптимизации равно 0,0943.

Список литературы

1. Черных С.В. Многопараметрическая оптимизация многомодальных функций // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2010. № 10. С. 94-103.
2. Бесчатнов М.В., Соколов В.М., Кац М.И. Аварии в химических производствах и меры их предупреждения. М.: Химия, 1976. 368 с.
3. Стивен С. Скиена. Алгоритмы. Руководство по разработке: Пер. с англ. 2-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 720 с.
4. Джонс М.Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях. М.: ДМК Пресс, 2004. С. 25-42.
5. Python. Работа с IPython и Jupyter Notebook [Электронный ресурс]. URL: <https://devpractice.ru/python-lesson-6-work-in-jupyter-notebook>.

References

1. Chernykh S.V. *Mnogoparametricheskaya optimizatsiya mnogomodal'nykh funktsiy* [Multiparameter Optimization of Multimodal Functions]. *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo*

Вывод

В ходе данной работы была проведена оптимизация процесса электролиза каустической соды ртутным методом с заданными условиями. Таким образом, данный метод оптимизации можно применять для оптимизации процессов со сложным рельефом функций значений и с большим количеством критериев оптимизации.

universiteta im. I. Kanta. Seriya: Fiziko-matematicheskiye i tekhnicheskkiye nauki – Bulletin of the Baltic Federal University named for I. Kant. Series: Physics, Mathematics, and Engineering, 2010, No. 10, pp. 94-103. [in Russian].

2. Beschatnov M.V., Sokolov V.M., Kats M.I. *Avarii v khimicheskikh proizvodstvakh i mery ikh preduprezhdeniya* [Accidents in Chemical Industries and Measures to Prevent Them]. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 368 p. [in Russian].

3. Stiven S. *Skiyena. Algoritmy. Rukovodstvo po razrabotke: Per. s angl.* [Algorithms Development Guide: Transl. from Eng.]. 2nd Ed. Saint-Petersburg, BKHV-Peterburg Publ., 2011. 720 p. [in Russian].

4. Dzhons M.T. *Programmirovaniye iskusstvennogo intellekta v prilozheniyakh* [Artificial Intelligence Programming in Applications]. Moscow, DMK Press Publ., 2004. p. 25-42. [in Russian].

5. *Python. Rabota s IPython i Jupyter Notebook* [Python. Work with IPython and Jupyter Notebook] [Electronic Resource]. URL: <https://devpractice.ru/python-lesson-6-work-in-jupyter-notebook>. [in Russian].



Важдаев К. В.
Vazhdaev K. V.

кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Инфокоммуникационные
технологии и
нанoeлектроника»,
ФГБОУ ВО «Башкирский
государственный
университет»,
доцент кафедры
«Водоснабжение
и водоотведение»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация



Ураксеев М. А.
Urakseev M. A.

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



Мартяшева В. А.
Martyasheva V. A.

кандидат технических
наук, доцент кафедры
«Водоснабжение
и водоотведение»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация

УДК 681.518.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-97-105

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ УТЕЧКИ ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПРОВОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Исследование возможности применения сетевых технологий в жилищно-коммунальном хозяйстве с разработкой конкретных технических решений в настоящее время является весьма актуальной задачей. В информационно-измерительных технологиях интернет вещей используются различные типы датчиков и преобразователей, в том числе акустооптические датчики.

Предлагаемая информационная автоматизированная система контроля утечки газа в зданиях и сооружениях – это новый подход безопасности. Сжиженный газ состоит из смеси пропана и бутана, который является легковоспламеняющимся химическим веществом. Это газ без запаха. Для обнаружения этого газа в качестве сильной отдушки добавляется этантиол.

В одном корпусе объединены электронный счетчик учета бытового газа и датчики утечки газа, температуры (высокой температуры, возникающей при пожаре) и дыма. При возникновении одного из сигналов от датчиков система блокирует подачу газа в здание и сооружение, посылает сигнал на телефон и личный кабинет физического лица, а также на пульт дежурного оператора, у которого на экране монитора появляется информация об утечке бытового газа/пожаре с геолокацией (улица, дом, квартира). После задержки в несколько миллисекунд вытяжной вентилятор также включается для выброса газа.

Система работает автономно. Питание осуществляется от встроенных аккумуляторов. Обмен данными осуществляется по беспроводному каналу от встроенного LPWAN-радиомодема. Эффективная дальность передачи показаний составляет 10 км в условиях плотной городской застройки и 50 км на открытой местности. А благодаря высокой проникающей способности сигнал способен легко проходить через бетонные стены и металли-

ческие шкафы. Энергоэффективная технология экономно расходует ресурс батареи. Один источник питания обеспечивает 10 лет автономной работы.

В статье рассматриваются и обосновываются следующие основные цели исследования:

- исследование возможностей мониторинга и удаленного управления подачи и контроля газа жилых зданий;
- исследование возможностей удаленной диагностики состояния газовой системы здания или объекта;
- сравнительный анализ технологий передачи данных от приборов учета и контроля газа у потребителей к контролируемому органу.

Ключевые слова: «Интернет вещей» (IoT), Wi-Fi-модуль, LPWAN- технологии, энерго- и ресурсосбережение, автоматизация зданий, управление теплоснабжением, Ethernet контроллер, автоматизация бытовых газовых систем.

AUTOMATED MULTIFUNCTIONAL GAS LEAKAGE CONTROL SYSTEM USING WIRELESS TECHNOLOGY

The study of the possibility of applying network technologies in housing and communal services with the development of specific technical solutions is a very urgent task. In the information-measuring technologies of the Internet of things, various types of sensors and transducers, including acousto-optical sensors, are used.

The proposed informational automated gas leakage control system in buildings and structures is a new safety approach. Liquefied gas consists of a mixture of propane and butane, which is a flammable chemical. Ethanethiol is added as a strong perfume to detect this gas.

In one case, an electronic meter for household gas metering and sensors of gas leaks, temperature (high temperature that occurs during a fire) and smoke are combined. If one of the signals from the sensors occurs, the system blocks the gas supply to the building and structure, sends a signal to the telephone and personal account of the individual, as well as to the desk of the operator on duty, on which the information on a gas leak/fire with geolocation appears on the monitor screen (street, house, flat). After a delay of several milliseconds, the exhaust fan is also turned on to release gas.

The system works autonomously. Power is supplied with built-in batteries. Data exchange is carried out wirelessly from the built-in LPWAN-radio modem. The effective transmission range is 10 km in dense urban areas and 50 km in open areas. Due to its high penetrating ability, the signal is able to easily pass through concrete walls and metal cabinets. Energy-efficient technology saves battery life. One power supply provides 10 years of battery life.

The following main research objectives are considered and substantiated in the article:

- study of the possibilities of monitoring and remote control of gas supply and control of residential buildings;
- study of the possibilities of remote diagnostics of the state of the gas system of a building or object;
- comparative analysis of data transfer technologies from gas metering and control devices from consumers to the regulatory body.

Key words: «Internet of Things» (IoT), Wi-Fi module, LPWAN technologies, energy and resource saving, building automation, heat management, Ethernet controller, automation of domestic gas systems.

Актуальность научной проблемы исследования

Трудно представить современную жизнь без использования газа, а значит, и без обслуживания, которое на нем работает [1–4]. Газ используется для приготовления пищи, отопления дома и нагрева воды. Но все приборы, использующие газ, являются потенци-

ально опасными, их использование требует строгого соблюдения определенных правил безопасности. Но при всем этом мы постоянно слышим об очередных происшествиях, связанных со взрывом газа. Обычно причиной всех этих аварий и несчастных случаев является утечка газа. И даже у добросовестных потребителей, выполняющих все пра-

вила безопасности использования газовых приборов, может случиться несчастье, поскольку оборудование стареет и периодически выходит из строя [5, 6].

Данная статистика показывает, что при увеличении потребления бытового газа количество таких случаев будет возрастать (рисунки 1, 2).

Причины взрыва бытового газа:

- пришедшее в негодность газовое оборудование;
- самостоятельное подключение газового оборудования;
- нарушения правил эксплуатации оборудования;
- не внимательное отношение к использованию газа;
- другие причины.



Рисунок 1. Количество пожаров с нарушением правил эксплуатации бытовых газовых устройств



Рисунок 2. Количество взрывов газового оборудования

На данный момент существующие системы контролируют одинарные параметры, такие как расход газа, утечку газа и т.д.

Таким образом, задача повышения функциональных возможностей системы сигнализатора загазованности для зданий и сооруже-

ний является актуальной и требует безотлагательного решения.

Целью настоящего проекта является создание беспроводной системы контроля утечки газа для обеспечения безопасности дома. Бытовой газ представляет собой легко воспламеняющуюся смесь углеводородов (состоящую в основном из пропана и бутана), используемую в качестве топлива в бытовых приборах и транспортных средствах, а также в промышленности.

Этот проект обнаруживает утечку бытового газа и предупреждает клиента об утечке и контролирует ее.

Данный проект – это новый подход к безопасности. В одном корпусе объединены электронный счетчик учета бытового газа и датчики (утечки газа, температуры (высокой температуры, возникающей при пожаре) и дыма). При возникновении одного из сигналов от датчиков система блокирует подачу газа в здание и сооружение, посылает сигнал на телефон и личный кабинет физического лица, а также на пульт дежурного оператора, у которого на экране монитора появляется информация об утечке бытового газа/пожаре с геолокацией (улица, дом, квартира).

Утечка газа обнаруживается датчиком газа. Он предупреждает клиента с помощью LPWAN-радиомодема, одновременно активируя сигнализацию и вытяжной вентилятор.

Система работает автономно. Питание осуществляется от встроенных аккумуляторов. Обмен данными осуществляется по беспроводному каналу от встроенного LPWAN-радиомодема. Эффективная дальность передачи показаний составляет 10 км в условиях плотной городской застройки и 50 км на открытой местности. А благодаря высокой проникающей способности сигнал способен легко проходить через бетонные стены и металлические шкафы. Энергоэффективная технология экономно расходует ресурс батареи. Один источник питания обеспечивает 10 лет автономной работы.

Литературный обзор разработок для постановки задачи и выбора эффективных решений

Проанализируем некоторые зарубежные и отечественные литературные источники.

Утечка газа является основной проблемой в промышленном секторе, жилых районах и транспортных средствах, работающих на газе. Одним из превентивных методов предотвращения аварий, связанных с утечкой газа, является установка устройства обнаружения утечки газа в проницаемые места [7]. Целью этой работы является создание устройства, которое может автоматически обнаруживать и останавливать утечки газа в этих проницаемых зонах. Система обнаруживает утечку газа с помощью датчика газа и использует GSM для оповещения человека об утечке газа посредством SMS. Когда концентрация бытового газа в воздухе превышает заданный уровень, газовый датчик определяет утечку газа. Это обнаруживается микроконтроллером, и светодиод и зуммер включаются одновременно. Затем система оповещает клиента, отправив SMS-сообщение на указанный мобильный телефон.

В работе [8] предлагается система, которая может обнаруживать не только утечку газа, но и взрыв, а также пожар. И может предпринять некоторые защитные меры. Система оснащена датчиком газа для обнаружения утечки газа и датчиком пламени для обнаружения взрыва и пожара. Он имеет систему вытяжного вентилятора для очистки утечки газа и электромагнитный клапан для впуска воды или газообразного диоксида углерода (CO₂) в случае взрыва и пожара. Система безопасности взрыва реагирует индивидуально, когда есть только пожар, не имеющий отношения к утечке газа. Если происходит какой-либо инцидент, эта информация отправляется владельцу через беспроводную среду, на дисплее отображается сообщение с предупреждением, и зуммер подает сигнал тревоги. Он оснащен модемом глобальной системы мобильной связи (GSM) в качестве беспроводной среды для отправки информации владельцу через службу коротких сообщений (SMS). Это обеспечивает предупреждающие действия незамедлительно даже при отсутствии людей на месте. Эта система спасения жизни является недорогой и полезной. Это может защитить людей от сжигания заживо.

В проекте [9] предложена эффективная модель системы для интеграции системы обнаружения утечки газа и пожара в централизованную домашнюю сеть M2M с использованием недорогих устройств.

В работе [10] имеется детектор утечки, который отправляет предупреждение заинтересованным людям через SMS. Устройство генерирует звуковое оповещение с помощью зуммера об обнаружении опасной утечки и отправляет SMS-сообщение заинтересованному лицу с помощью веб-сервиса IFTTT. Светодиоды разных цветов используются для определения утечки газа.

Обычная система обнаружения утечек использует локальные сигналы тревоги для предупреждения. В работе [11] предлагается метод обнаружения утечки, при котором информация об утечке также отправляется в первую группу реагирования через беспроводную среду. Система обнаружения использует FPGA, чтобы обнаружить утечку и автоматически инициировать предупреждающий вызов через GSM.

Резюме: в известной литературе, к сожалению, не уделено должного внимания вопросам исследования возможностей удаленной диагностики состояния газовой системы здания или объекта; не проведен сравнительный анализ технологий передачи данных от приборов учета и контроля газа у потребителей к контролирующему органу.

Учитывая потребность в подобных приборах и системах со стороны разработчиков и потребителей можно считать актуальной постановку задачи настоящего исследования.

Описание предлагаемой автоматизированной многофункциональной системы утечки газа с использованием беспроводной технологии

Основными причинами всех этих аварий и несчастных случаев являются утечка бытового газа, износ газового оборудования и нарушения правил использования бытовым газом, что вызвано использованием изношенного оборудования и пренебрежением правилами безопасности при использовании бытового газа. Даже при тщательных провер-

ках газового оборудования невозможно стопроцентно выявить утечку газа.

Для предотвращения тяжелых последствий утечки газа используются газосигнализаторы. Основной функцией этих приборов является контроль уровня горючих газов в помещении. При достижении определенной концентрации газа прибор включает звуковое и световое оповещение об утечке, что позволяет людям своевременно отреагировать и предотвратить аварию. Также существуют модели с автоматическим закрытием клапана подачи газа. Газосигнализаторы широко используются на промышленных объектах, где используется газ, в котельных и в помещениях бытового назначения [12–14].

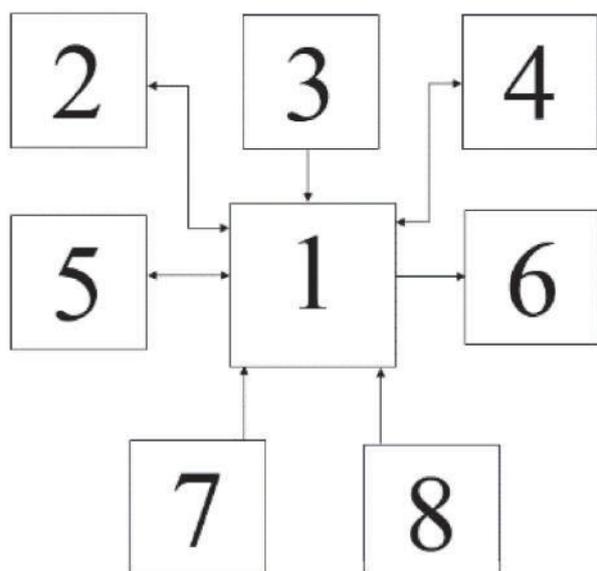
Но сигнализаторы загазованности могут только подать световой и звуковой сигналы, и закрыть подачу газа в помещениях, где происходит утечка газа, тем самым предотвратить взрыв и отравление горючими газами.

Авторами работы предпринята попытка создать комплексную защиту безопасности помещения.

Было проанализировано и установлено, что к взрывам газа может привести не только утечка газа, с последующим накоплением критической массы, но и пожары в помещениях. Поэтому в рассматриваемую автоматизированную систему контроля газа (в единый корпус) были установлены датчики утечки газа, дыма и температуры. На рисунке 3 представлена предлагаемая автоматизированная система контроля утечки газа в зданиях и сооружениях.

Рассматриваемая автоматизированная система контроля утечки газа в зданиях и сооружениях предназначена:

- для выявления опасной загазованности горючими газами в помещениях жилого и нежилого типа;
- управления запорным электромагнитным клапаном;
- выдачи светового и звукового сигналов в случае возникновения в помещении загазованности;
- уведомления пользователя о загазованности помещения по LPWAN каналу.



1 — блок управления; 2 — датчик утечки газа;
3 — блок прибора учета; 4 — датчики дыма
и температуры; 5 — блок индикации и клавиатуры;
6 — электромагнитный клапан; 7 — блок питания;
8 — блок сигнализации

Рисунок 3. Автоматизированная система контроля утечки газа в зданиях и сооружениях

Сигнализатор загазованности помещения предназначен для контроля состояния окружающей среды в помещениях и на объектах, где возможно образование взрывоопасных газоздушных смесей (превышение предельно допустимых концентраций метана, бутана, оксида углерода). Приборы этой группы выдают световую и звуковую сигнализацию о превышении контролируемого параметра, и систему аварийного отключения газа, предназначенные для непрерывного контроля состояния окружающей среды на газоиспользующих объектах, автоматически приводят в действие исполнительные механизмы и устройства, прекращающие подачу газа к потребителям.

Важной особенностью данной системы является свойство прекращать подачу газа в случае отключения питания или выхода сигнализатора из строя. Большинство приборов также осуществляют постоянный контроль состояния линий связи между рабочими блоками. Системы контроля загазованности должны присутствовать во всех помещениях, где размещено газоиспользующее оборудование (ПБ 12-529-03, РД 12-341-00, СП 41-108-2004).

Принцип действия сигнализатора загазованности основан на преобразовании уровня

концентрации газа в напряжение с помощью датчика газа.

Полученная при измерении концентрации газа величина напряжения сравнивается с заданным при калибровке значением напряжения, которое соответствует пороговому уровню загазованности. Если измеренная концентрация газа превышает пороговый уровень, то производится выработка звуковых, световых и управляющих сигналов в соответствии с логикой работы сигнализатора.

При загазованности помещения сигнал с датчика поступает на блок управления. Далее блок управления отправляет команду для закрытия электромагнитного запорного клапана и включения световой и звуковой индикации. После микроконтроллер отправляет команду «Звонок» для оповещения пользователя о загазованности помещения.

Также для оповещения пользователя используется LPWAN связь [15, 16], так как Wi-fi или Bluetooth технологии ограничены дальностью действия.

LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) — новый подход в радиосвязи, применяемый для устройств и крупных распределенных беспроводных сетей телеметрии. Его особенность — низкое энергопотребление (low-power) и широкий территориальный охват (wide-area).

Любые существующие беспроводные технологии передачи данных обладают такими характеристиками, как дальность, скорость и энергоэффективность, причем одновременно можно соответствовать лишь двум из трех.

Например, GPRS-модем, регулярно передающий показания счетчика воды или газа, будет совершенно нерентабельным даже при абонентской плате в 2–3 раза ниже минимальных тарифов сотовых операторов. Регулярная подзарядка или частая замена батарей также делают эксплуатацию дорогой и хлопотной. На рисунке 4 представлена сравнительная характеристика наиболее часто используемых беспроводных технологий передачи данных.

LPWAN — это технология, поддерживающая совершенно новый класс телематических устройств. Ее появление стало возможным благодаря развитию компонентной

базы: радиомодулей и приемопередающего оборудования.

Блок счётчик газа предназначен для измерения количества (объёма) газа. Соответственно, количество газа, как правило, измеряют в кубических метрах (м³).



Рисунок 4. Сравнительная характеристика наиболее часто используемых беспроводных технологий передачи данных

Блок, позволяющий измерять или вычислять проходящее количество газа за единицу времени (расход газа), называют расходомерами или расходомерами-счетчиками.

В данном блоке используется вращательный (вихревой) механизм. Механизм работы таких счетчиков заключается во вращении турбины и подсчете количества оборотов турбины. Светодиод светит на фотодиод и при попадании света на фотодиод создается фото ЭДС, который далее усиливается с помощью операционного усилителя до необходимого напряжения. Импульсы с блока счетчика отправляются на микроконтроллер, который и считает количества импульсов.

Блок электромагнитного клапана служит для открытия или закрытия подачи газа потребителю. Сигнал с блока управления

отправляется на блок электромагнитного клапана, после чего блок закрывает электромагнитный запорный клапан. Данный блок связан с блоком управления с помощью оптопары. Данное решение позволяет увеличить надежность устройства, так как нет электрической связи между блоками. Отсюда следует то, что при появлении короткого замыкания в блоке блок управления останется в исправном состоянии.

Электромагнитный клапан должен быть закрытым при отсутствии напряжения. Данное требование установлено СП.

Выводы

1. Показаны актуальность и практическая значимость создания новой автоматизированной многофункциональной системы утечки газа с использованием беспроводной технологии.

2. Определена возможность мониторинга и удаленного управления подачи и контроля газа жилых зданий.

3. Исследована возможность удаленной диагностики состояния газовой системы здания или объекта.

4. Проведен сравнительный анализ технологий передачи данных от приборов учета и контроля газа у потребителей к контролирующему органу.

Была разработана автоматизированная многофункциональная система утечки газа с использованием беспроводной технологии. Результаты работы указывают на то, что устройство может быть установлено на домашней и промышленной площадке, чтобы предупредить о возникновении пожара в результате утечки газа, которая остается незамеченной. Эта система, когда она установлена, эффективно поможет пользователю узнать, когда происходит утечка газа, не полагаясь исключительно на обоняние. Поскольку устройство может питаться от сети и аккумулятора, надежность системы гарантируется постоянно.

Список литературы

1. Уорден К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. Свойства и применение. М.: Техносфера, 2006. 224 с.
 2. Urakseev M.A., Vazhdaev K.V., Sagadeev A.R. Optoelectronic Devices with Diffraction of Light on Phase Grating // Far East Con-2018, Russia. 2018, P. 1–6. doi:10.1109/Far-EastCon.2018.8602548.

3. Важдаев К.В., Губайдуллин А.Г. Волоконно-оптические датчики на акустооптическом эффекте // Приборы и системы.

Управление, контроль, диагностика. 2011. № 2. С. 36–40.

4. Ураксеев М.А., Важдает К.В. Акустооптические датчики физических величин. Уфа: Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 2008. 111 с.

5. Статистика взрывов газа в 2014 – 2017. URL: <https://vawilon.ru/statistika-vzryvov-bytovogo-gaza-v-rossii>.

6. Квартирные системы сигнализации. URL: http://www.gsmalarm.ru/articles/kvartirnaya_signalizatsia_1.htm.

7. Arijit Banik, Bodhayan Aich, Suman Ghosh. Microcontroller Based Low Cost Gas Leakage Detector with SMS Alert // *Emerging Trends in Electronic Devices and Computational Techniques (EDCT)*. 2018.

8. Pritam Ghosh, Palash Kanti Dhar. GSM Based Low-Cost Gas Leakage Explosion and Fire Alert System with Advanced Security // *Electrical Computer and Communication Engineering (ECCE): International Conference*. 2019. P. 1–5.

9. Lamine Salhi, Thomas Silverston, Taku Yamazaki, Takumi Miyoshi. Early Detection System for Gas Leakage and Fire in Smart Home Using Machine Learning // *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. 2019.

10. Ravi Kishore Kodali, R.N.V. Greeshma, Kusuma Priya Nimmanapalli, Yatish Krishna Yogi Borra. IOT Based Industrial Plant Safety Gas Leakage Detection System // *4th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA)*. 2018.

11. Arpitha T., Kiran Divya, Sitaram Gupta V. S. N., Duraiswamy Punithavathi. FPGA-GSM Based Gas Leakage Detection System // *IEEE Annual India Conference (INDICON)*. 2016.

12. Берикашвили В.Ш., Мировицкий Д.И., Смирнов А.М., Хиврин М.В. Волоконно-оптические датчики — газоанализаторы и системы контроля // *Датчики и системы*. 2000. № 10. С. 45–50.

13. Чувашов В.Н., Гришенкин В.Н. Быстродействующий анализатор горючих газов и паров // *Датчики и системы*. 2000. № 7. С. 38–39.

14. Уорден К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. Свойства и применение. М.: Техносфера, 2006. 224 с.

15. LPWAN – большой обзор сетей дальнего радиуса для интернета вещей. URL: <http://voltiq.ru/the-guide-to-low-power-wide-area-networks> (дата обращения: 18.01.2019).

16. NB-IOT против LTE – М (4G), 5G. URL: <http://itkvariat.com/o-raznom/886-nb-iot-protiv/-lte-nb-m-4g-5g>.

References

1. Uorden K. *Novyye intellektual'nyye materialy i konstruksii. Svoystva i primeneniye* [New Intellectual Materials and Designs. Properties and Application]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 224 p. [in Russian].

2. Urakseev M.A., Vazhdaev K.V., Sagadeev A.R. *Optoelectronic Devices with Diffraction of Light on Phase Grating*. Far East Con-2018, Russia. 2018, pp. 1–6. doi:10.1109/FarEastCon.2018.8602548.

3. Vazhdayev K.V., Gubaydullin A.G. Volokonno-opticheskiye datchiki na akustoopticheskom effekte [Fiber-Optic Sensors on the Acousto-Optical Effect]. *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika – Devices and Systems. Management, Control, Diagnostics*, 2011, No. 2, pp. 36–40. [in Russian].

4. Urakseyev M.A., Vazhdayev K.V. *Akustoopticheskiye datchiki fizicheskikh velichin* [Acoustooptic Sensors of Physical Quantities]. Ufa, Ufimskaya gosudarstvennaya akademiya ekonomiki i servisa, 2008. 111 p. [in Russian].

5. *Statistika vzryvov gaza v 2014–2017* [Gas Explosions Statistics in 2014–2017]. URL: <https://vawilon.ru/statistika-vzryvov-bytovogo-gaza-v-rossii>. [in Russian].

6. *Kvartirnyye sistemy signalizatsii* [Apartment Alarm Systems]. URL: http://www.gsmalarm.ru/articles/kvartirnaya_signalizatsia_1.htm. [in Russian].

7. Arijit Banik, Bodhayan Aich, Suman Ghosh. Microcontroller Based Low Cost Gas Leakage Detector with SMS Alert. *Emerging Trends in Electronic Devices and Computational Techniques (EDCT)*. 2018.

8. Pritam Ghosh, Palash Kanti Dhar. GSM Based Low-Cost Gas Leakage Explosion and Fire Alert System with Advanced Security. *Electrical Computer and Communication Engineering (ECCE): International Conference*. 2019, pp. 1–5.

9. Lamine Salhi, Thomas Silverston, Taku Yamazaki, Takumi Miyoshi. Early Detection

System for Gas Leakage and Fire in Smart Home Using Machine Learning. *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. 2019.

10. Ravi Kishore Kodali, R.N.V. Greeshma, Kusuma Priya Nimmanapalli, Yatish Krishna Yogi Borra. IOT Based Industrial Plant Safety Gas Leakage Detection System. *4th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA)*. 2018.

11. Arpitha T., Kiran Divya, Sitaram Gupta V. S. N., Duraiswamy Punithavathi. FPGA-GSM Based Gas Leakage Detection System. *IEEE Annual India Conference (INDICON)*. 2016.

12. Berikashvili V.Sh., Mirovitskiy D.I., Smirnov A.M., Khivrin M.V. Volokonno-opticheskiye datchiki — gazoanalizatory i sistemy kontrolya [High-Speed Analyzer of Flammable Gases and Vapors]. *Datchiki i sistemy — Sensors and Systems*, 2000, No. 10, pp. 45–50. [in Russian].

13. Chuvashov V.N., Grishenkin V.N. Bystrodeystvuyushchiy analizator goryuchikh gazov i parov [High-Speed Analyzer of Flammable Gases and Vapors]. *Datchiki i sistemy — Sensors and Systems*, 2000, No. 7. pp. 38–39. [in Russian].

14. Warden K. *Novyye intellektual'nyye materialy i konstruksii. Svoystva i primeneniye* [New Intellectual Materials and Designs. Properties and Application]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 224 p. [in Russian].

15. *LPWAN — bol'shoy obzor setey dal'nego radiusa dlya interneta veshchey* [LPWAN – A Great Overview of Long-Range Networks for the Internet of Things]. URL: <http://voltiq.ru/the-guide-to-low-power-wide-area-networks> (accessed 18.01.2019). [in Russian].

16. *NB-IOT protiv LTE – M (4G), 5G* [NB-IOT vs. LTE – M (4G), 5G]. URL: <http://itkvariat.com/o-raznom/886-nb-iot-protiv/-lte-nb-m-4g-5g>. [in Russian].



Зламан П. Н.
Zlaman P. N.
ведущий инженер-конструктор,
Научно-конструкторское бюро моделирующих и управляющих систем, ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет», г. Таганрог, Российская Федерация



Андреанов А. В.
Andrianov A. V.
начальник лаборатории, АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи», г. Таганрог, Российская Федерация



Зикий А. Н.
Zikiy A. N.
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры информационной безопасности телекоммуникационных систем Института компьютерных технологий и информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет», г. Таганрог, Российская Федерация

УДК 621.372.632

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-106-111

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСХЕМЫ LTC5553 В РЕЖИМЕ УМНОЖЕНИЯ ЧАСТОТЫ С НАПРАВЛЕННЫМ ОТВЕТВИТЕЛЕМ

Проведено экспериментальное исследование микросхемы LTC5553 в режиме умножения частоты в 2, 4 и 6 раз. Использована одна входная частота – 3 ГГц. Представлены результаты измерений амплитудных характеристик для трёх чётных гармоник. Показано, что в ряде случаев допустимо использовать микросхему смесителя в режиме умножения частоты. Даны рекомендации по режимам использования смесителя в качестве умножителя частоты. Особенностью данного исследования является применение направленного ответвителя с потерями 10 дБ в боковом плече для ввода входного сигнала. При этом сигнал, ослабленный в боковом плече, вводится в микросхему через гетеродинный вход. Достаточно подробно описан объект исследования, приведена принципиальная схема. Описана методика проведения эксперимента. Микросхему LTC5553 рекомендуется использовать в качестве умножителя частоты в приемно-передающей аппаратуре связи, радиолокации, радиоуправления и радиоэлектронной борьбы. Благодаря высоким электрическим параметрам эта микросхема может найти применение в измерительной аппаратуре измерительных приемников и анализаторов спектра. Данный вариант использования микросхемы по сравнению с известным равноплечим делителем мощности показывает явное преимущество по коэффициенту передачи, его стабильности. Эта особенность связана с наличием усилителя в гетеродинном тракте микросхемы LTC5553. Кроме того, данный вариант умножителя частоты имеет явное преимущество по сравнению с пассивными умножителями частоты по коэффициенту передачи и подавлению нечетных гармоник входного сигнала. Дополнительными преимуществами исследованного варианта умножителя являются:

- широкий диапазон частот до 20 ГГц;
- низкое энергопотребление;

- малые габариты и масса;
- низкая стоимость (пробная плата ниже 300\$);
- простота технологии изготовления;
- доступность на отечественном рынке.

Ключевые слова: умножитель частоты, сверхвысокие частоты, амплитудная характеристика, спектр гармоник, кратность умножения частоты.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE LTC5553 MICROCIRCUIT IN THE FREQUENCY MULTIPLICATION MODE WITH DIRECTIONAL COUPLER

An experimental study of the LTC5553 chip in the frequency multiplication mode 2, 4 and 6 times are carried out. Used one input frequency – 3 GHz. The results of measurements of the amplitude characteristics for three even harmonics are presented. It is shown that in some cases it is permissible to use the mixer microcircuit in the frequency multiplication mode. Recommendations are given on the modes of using the mixer as a frequency multiplier. A feature of this study is the use of a directional coupler with a loss of 10 dB in the side arm for input signal input. In this case, the signal attenuated in the side arm is introduced into the microcircuit through the heterodyne input. The object of study is described in sufficient detail, and a schematic diagram is given. The technique of the experiment is described. The LTC5553 chip is recommended to be used as a frequency multiplier in the transmitting and receiving equipment of communication, radar, radio control and electronic warfare. Due to the high electrical parameters, this microcircuit can find application in the measuring equipment of measuring receivers and spectrum analyzers. This option of using a microchip compared with the well-known equal-arm power divider shows a clear advantage in terms of transmission coefficient and its stability. This feature is associated with the presence of an amplifier in the heterodyne path of the LTC5553 chip. In addition, this version of the frequency multiplier has a clear advantage over passive frequency multipliers in terms of transmission coefficient and suppression of the odd harmonics of the input signal. Additional advantages of the investigated variant of the multiplier are:

- a wide range of frequencies up to 20 GHz;
- low power consumption;
- small dimensions and weight;
- low cost (cost of the evaluation board below \$300);
- simplicity of manufacturing technology;
- availability in the domestic market.

Key words: frequency multiplier, ultrahigh frequency amplitude characteristic, harmonic spectrum, frequency multiplication factor.

Умножители частоты являются важнейшими узлами устройств формирования сигналов и радиопередающих устройств (наравне с усилителями мощности и задающими генераторами), поэтому их исследование является актуальным.

Умножители частоты применяются в синтезаторах частоты, гетеродинах, генераторах опорных частот. Они позволяют существенно расширить диапазон рабочих частот, получить гармонические колебания в тех диапазонах частот, где их прямая генерация по каким-либо причинам затруднена или невозможна.

По умножителям частоты опубликованы десятки книг [1–11], тысячи статей и изобре-

тений, однако появление новой элементной базы стимулирует дальнейшее исследование умножителей частоты.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование умножителя частоты на микросхеме LTC5553 фирмы Linear Technologies [12, 13]. Принципиальная схема включения микросхемы приведена на рисунке 1.

Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 2. В качестве источника входного сигнала служит генератор типа E8257D фирмы Agilent Technologies. В качестве измерителя частоты, мощности и спектра служит анализатор спектра той же фирмы типа PXA.

Источником питания служит прибор типа GPD-72303S. Направленный ответвитель имеет потери 10 дБ в боковом плече. Четные гармоники имеют существенно большую

мощность, чем нечётные, поэтому ниже были исследованы амплитудные характеристики только для чётных гармоник.

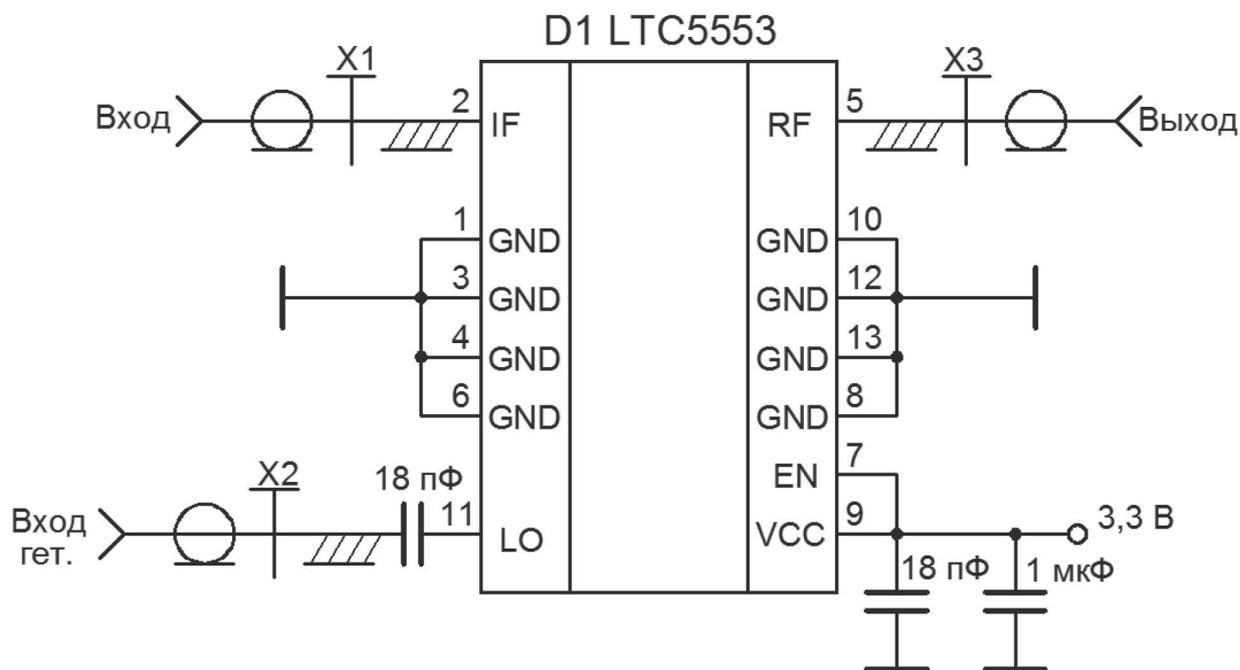


Рисунок 1. Принципиальная схема включения микросхемы

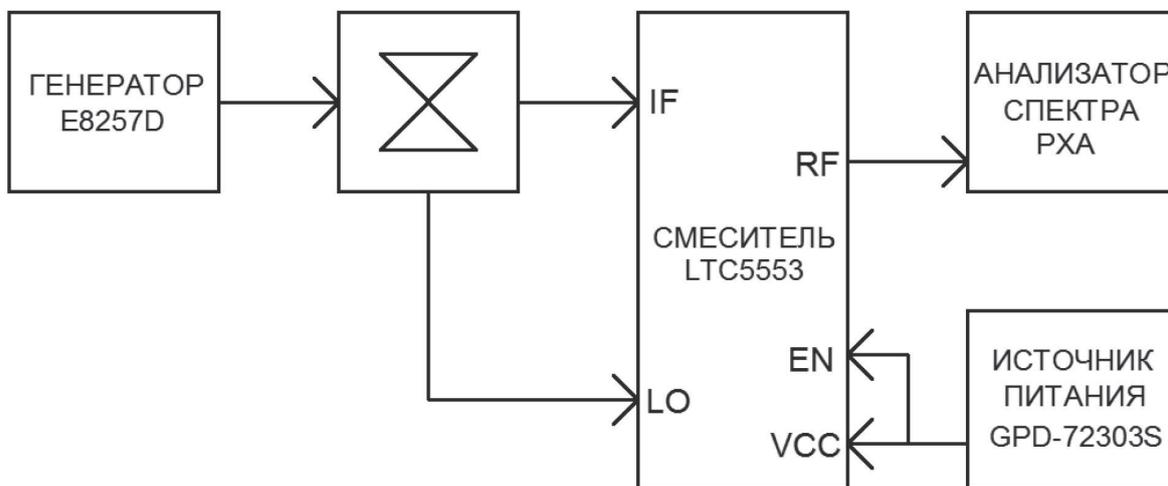


Рисунок 2. Структурная схема измерительной установки с направленным ответвителем

В ходе эксперимента на вход направленного ответвителя подавался сигнал с частотой 3 ГГц и мощностью от -20 дБм до 10 дБм с шагом 2 дБ. Результаты измерений мощности второй гармоники заносились в таблицу 1, второй столбец. Аналогичные результаты для четвёртой гармоники помещены в третий столбец таблицы 1. В четвёртый столбец таблицы 1 включены результаты измерения

мощности для шестой гармоники. По данным таблицы 1 построены графики на рисунке 3. Из них видно, что зависимость выходной мощности почти линейно зависит от входной мощности. Это можно объяснить ограничением сигнала в гетеродинном тракте микросхемы LTC5553. При этом коэффициент передачи умножителя почти постоянный в диапазоне исследованных мощностей.

Таблица 1. Амплитудные характеристики умножителя частот

Входная мощность на частоте 3 ГГц, дБм	Р _{вых} 6 ГГц, дБм	Р _{вых} 12 ГГц, дБм	Р _{вых} 18 ГГц, дБм
-20	-35,65	-51,18	-64,06
-18	-32,03	-48,12	-59,16
-16	-29,74	-45,31	-54,85
-14	-27,71	-42,81	-50,22
-12	-25,84	-39,81	-45,67
-10	-24,21	-37,33	-41,72
-8	-21,86	-35,03	-38,57
-6	-19,69	-32,76	-35,92
-4	-17,47	-30,50	-33,55
-2	-15,29	-28,20	-31,38
0	-13,24	-26,14	-29,36
2	-11,25	-24,16	-27,42
4	-9,30	-22,10	-25,45
6	-7,35	-20,26	-23,67
8	-5,47	-18,58	-22,00
10	-3,65	-16,75	-20,41

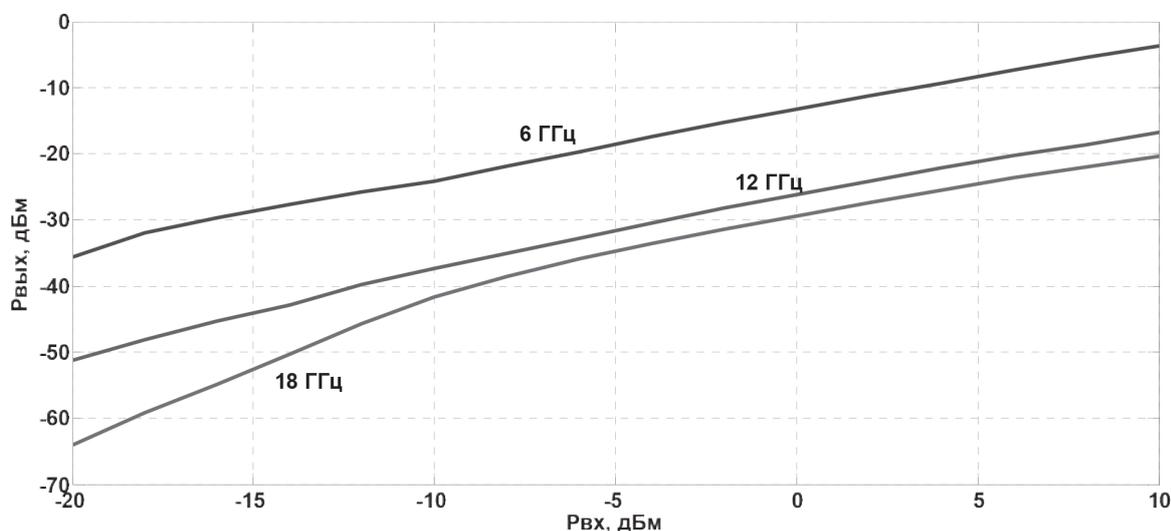


Рисунок 3. Амплитудная характеристика умножителя частоты для трех четных гармоник

Выводы

1. В ряде случаев допустимо использовать микросхему смесителя в режиме умножения частоты. Предпочтительно использовать чётные гармоники входной частоты.
2. Коэффициент передачи по мощности для второй гармоники входной частоты 3 ГГц и входной мощности 0 дБм составляет не менее –13,24 дБ.
3. Коэффициент передачи по мощности для четвёртой гармоники входной частоты 3 ГГц и входной мощности 0 дБм составляет не менее –26,14 дБ.
4. Коэффициент передачи по мощности для шестой гармоники входной частоты

3 ГГц и входной мощности 0 дБм составляет не менее –29,36 дБ.

5. Подавление неиспользуемых гармоник входной частоты должно осуществляться полосовыми фильтрами высокого порядка с широкой полосой заграждения.

6. Коэффициент передачи по мощности мало зависит от входной мощности, что обусловлено наличием усилителя – ограничится в гетеродинном тракте микросхемы 2ТС5553.

7. Вариант умножителя частоты с направленным ответвителем имеет коэффициент передачи выше, чем с равноплечим делителем мощности [14].

Список литературы

1. Красноголовый Б.Н., Плавский Л.Г. Варакторные умножители частоты. Минск: БГУ, 1979. 288 с.
2. Белов Л.А. Устройства формирования СВЧ сигналов и их компоненты. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 320 с.
3. Касаткин Л.В., Чайка В.Е. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн. Севастополь: Вебер, 2006. 319 с.
4. Ризкин И.Х. Умножители и делители частоты. М.: Связь, 1976. 328 с.
5. Бруевич А.Н., Евтянов С.И. Аппроксимация нелинейных характеристик и спектры при гармоническом воздействии. М.: Сов. радио, 1965. 344 с.
6. Грибов Э.Б. Нелинейные явления в приёмо-передающем тракте аппаратуры связи на транзисторах. М.: Связь, 1971. 243 с.
7. Жаботинский М.Е., Свердлов Ю.Л. Основы теории и техники умножения частоты. М.: Сов. радио, 1964. 327 с.
8. Кищинский А.А. и др. Умножители частоты на полевых транзисторах с барьером Шотки // Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. Вып. 10 (1558). М.: ЦНИИ «Электроника», 1990. 32 с.
9. Савельев В.С. Умножители частоты СВЧ диапазона на транзисторах // Обзоры на электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. Вып. 17 (1220). М.: ЦНИИ «Электроника», 2006. 208 с.
10. Измерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы / Под ред. А.М. Кудрявцева. М.: Радиотехника, 2006. 208 с.
11. Радиопередающие устройства на полупроводниковых приборах. Проектирование и расчёт / Под ред. Р.А. Валитова и И.А. Попова. М.: Сов. радио, 1973. 464 с.
12. Microwave Mixer LTC5553. Linear Technology. Data Sheet. 16 p.
13. Demo Manual DC2566A. Passive Bidirectional Mixer. Linear Technology. 6 p.
14. Romyantsev K., Zikiy A., Zlaman P., Mamchenko S. Experimental Investigation of the LTC5553 Microcircuit in the Frequency Multiplication Mode // International Journal of Engineering & Technology (UAE). 2018. Vol. 7, No 3.13. Special Issue 13, pp. 41–43.

References

1. Krasnogolovyy B.N., Plavskiy L.G. *Varaktornyye umnozhiteli chastoty* [Varactor Frequency Multipliers]. Minsk, BGU, 1979. 288 p. [in Russian].
2. Belov L.A. *Ustroystva formirovaniya SVCh signalov i ikh komponenty* [Microwave Signal Generating Devices and Their Components]. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI, 2010. 320 p. [in Russian].
3. Kasatkin L.V., Chayka V.Ye. *Poluprovodnikovyye ustroystva diapazona millimetrovykh voln* [Millimeter Wave Semiconductors]. Sevastopol', Veber Publ., 2006. 319 p. [in Russian].
4. Rizkin I.Kh. *Umnozhiteli i deliteli chastoty* [Multipliers and Frequency Dividers]. Moscow, Svyaz' Publ., 1976. 328 p. [in Russian].
5. Bruyevich A.N., Yevtyanov S.I. *Approximatsiya nelineynykh kharakteristik i spektry pri garmonicheskom vozdeystvii* [Approximation of Nonlinear Characteristics and Spectra under Harmonic Influence]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1965. 344 p. [in Russian].
6. Gribov E.B. *Nelineynyye yavleniya v priyomo-peredayushchem trakte apparatury svyazi na tranzistorakh* [Nonlinear Phenomena in the Receiving-Transmitting Path of Transistor Communication Equipment]. Moscow, Svyaz' Publ., 1971. 243 p. [in Russian].
7. Zhabotinskiy M.Ye., Sverdlov Yu.L. *Osnovy teorii i tekhniki umnozheniya chastoty* [Fundamentals of the Theory and Techniques of Frequency Multiplication]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1964. 327 p. [in Russian].
8. Kishchinskiy A.A. i dr. *Umnozhiteli chastoty na polevykh tranzistorakh s bar'yerom Shotki* [Frequency Multipliers on Field transistors with Schottky Barrier]. *Obzory po elektronnoy tekhnike. Seriya 1. Elektronika SVCh* [Reviews on Electronic Engineering. Series 1. Microwave Electronics]. Issue 10 (1558). Moscow, TSNI «Elektronika», 1990. 32 p. [in Russian].
9. Savel'yev V.S. *Umnozhiteli chastoty SVCh diapazona na tranzistorakh* [Transistors Microwave Frequency Multiplier]. *Obzory na elektronnoy tekhnike. Ser. 1. Elektronika SVCh* [Reviews on Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Electronics]. Issue 17 (1220). Moscow, TSNI «Elektronika», 2006. 208 p. [in Russian].

10. *Izmeritel'naya apparatura SVCh i KVCh. Uzlovaya i elementnaya bazy* [Microwave and EHF Measuring Equipment. Nodal and Elemental Base]. Ed. by A.M. Kudryavtseva. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006. 208 p. [in Russian].

11. *Radioperedayushchiye ustroystva na poluprovodnikovyykh priborakh. Proyektirovaniye i raschot* [Radio Transmitting Devices on Semiconductor Devices. Design and Calculation]. Ed. By R.A. Valitova, I.A. Popova. Moscow, Sov. Radio Publ., 1973. 464 p. [in Russian].

12. Microwave Mixer LTC5553. *Linear Technology*. Data Sheet. 16 p.

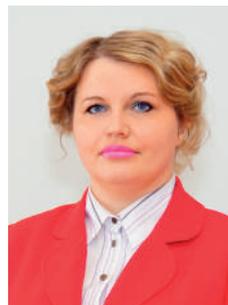
13. Demo Manual DC2566A. Passive Bidirectional Mixer. *Linear Technology*. 6 p.

14. Rummyantsev K., Zikiy A., Zlaman P., Mamchenko S. Experimental Investigation of the LTC5553 Microcircuit in the Frequency Multiplication Mode. *International Journal of Engineering & Technology (UAE)*, 2018, Vol. 7, No. 3. Special Issue 13, pp. 41-43. [in Russian].



Лихачев Е. А.
Likhachev E. A.

*старший преподаватель кафедры
«Информационно-измерительная техника»
факультета авионики, энергетики
и инфокоммуникаций,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Зайцева А. А.
Zaytseva A. A.

*кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно-
измерительная техника»
факультета авионики, энергетики
и инфокоммуникаций,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Клименко О. В.
Klimenko O. V.

*студент кафедры
«Информационно-измерительная техника»
факультета авионики, энергетики
и инфокоммуникаций,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Керасирова А. А.
Kerasirova A. A.

*студент кафедры «Информационно-
измерительная техника»
факультета авионики, энергетики и
инфокоммуникаций,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 621.317.791

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-112-117

ВСТРОЕННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ САУ-37

Техническое обслуживание системы автоматического управления (САУ) предусматривает проведение оперативных и периодических работ для сохранения и восстановления работоспособности САУ и осуществляется в объеме и в сроки, предусмотренные в регламенте технического обслуживания на вертолет.

В процессе эксплуатации САУ встроенные средства контроля (ВСК) позволяют выявить возникающие неисправности и отказы блоков САУ.

ВСК САУ должны обеспечить решение следующих задач:

- проведение непрерывного автоматического контроля в полете и на земле собственной работоспособности и входных каналов связи;
- проведение параметрического контроля данных от сопрягаемых систем с формированием признаков исправности входной информации;

- проведение предполетного контроля собственной исправности и линий связи (в том числе резервных) по команде от система электронной индикации (СЭИ);
- проведение наземного расширенного контроля сервоприводов исполнительных агрегатов управления автопилота;
- формирование слов состояния по отказам и выдача их в СЭИ;
- выдачу данных при обнаружении неисправности на собственные средства индикации и в СЭИ.

ВСК САУ должны обеспечить:

- полноту непрерывного автоматического контроля в полете и на земле не менее 0,9;
- полноту предполетного контроля (кроме сервоприводов исполнительных агрегатов управления) не менее 0,95;
- глубину поиска отказов до конструктивно сменная единица (КСЕ) с вероятностью не менее 0,95.

Ключевые слова: система автоматического управления, вертолет, отказ, надежность, тангаж, крен, курс, частота вращения турбокомпрессора, положение лопаток входного направляющего аппарата, эксперимент, перегрузка.

BUILT-IN ACS-37 CONTROL SYSTEM

Maintenance of automatic control system (ACS) provides operational and periodic work to preserve and restore the performance of ACS and is in the amount and within the time stipulated in the schedule of maintenance on the helicopter.

During the operation of the ACS, built-in controls (BIC) allow you to identify emerging faults and failures of the ACS units.

BIC ACS must provide the following tasks:

- carrying out continuous automatic monitoring in flight and on the ground of their own performance and input communication channels;
- carrying out parametric control of data from interfaced systems with formation of signs of serviceability of input information;
- conducting pre-flight control of its own serviceability and communication lines (including backup) on command from the electronic display system (SEI);
- conducting ground-based advanced control of servos of autopilot control actuators;
- formation of status words for failures and their delivery to the SEI;
- output of data when a fault is detected on its own display means and in SEI.

BIC ACS must provide:

- completeness of continuous automatic control in flight and on the ground at least 0.9;
- completeness of pre-flight control (except for servos of Executive control units) not less than 0.95;
- the depth of the search for failures to structurally replaceable unit (SRU) with a probability of at least 0.95.

Key words: automatic control system, helicopter, failure, reliability, pitch, roll, heading, turbocharger speed, the position of the blades of the inlet guide vanes, experiment, overload.

Методы контроля

Методы контроля можно свести к следующим формальным определениям, используемым для оценки функционально-логических моделей:

- контроля в полете;
- предполетного контроля [1].

Для всех этапов работы САУ-37Д, методов и задач контроля строятся функционально логические модели.

Для контроля в полете реализована функционально-логическая модель, представленная на рисунке 1.

При предполетном контроле реализована функционально-логическая модель, представленная на рисунке 2.

Из построенных функционально логических моделей получается следующая таблица полноты контроля (ТПК) (таблица 1).

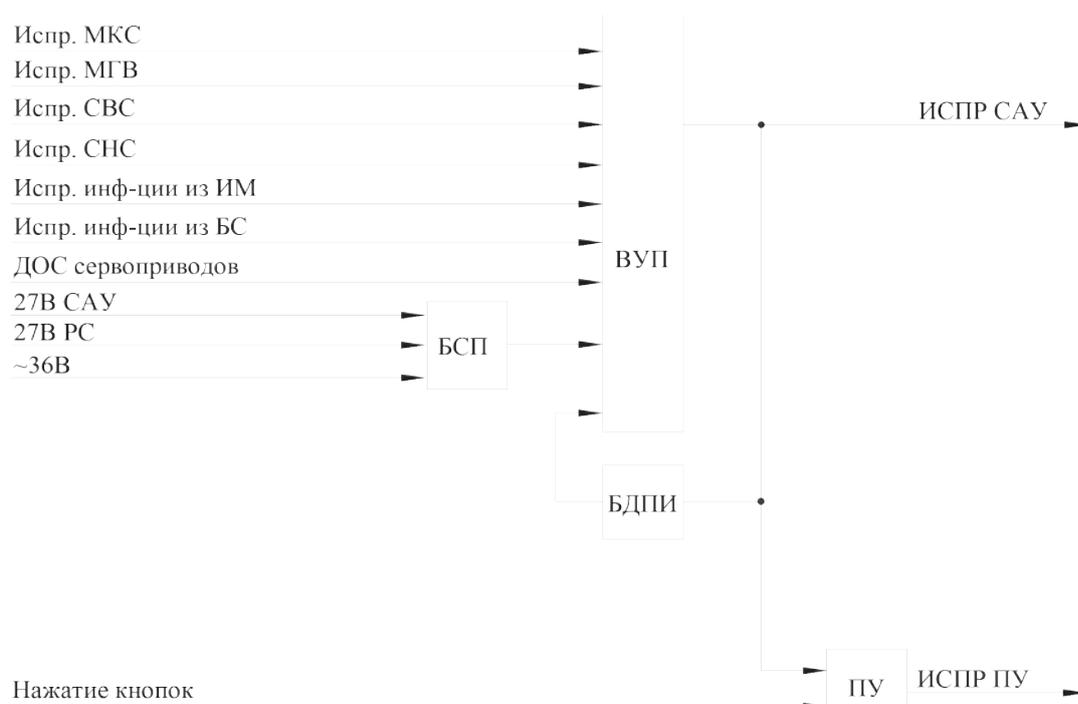


Рисунок 1. Функционально-логическая модель САУ

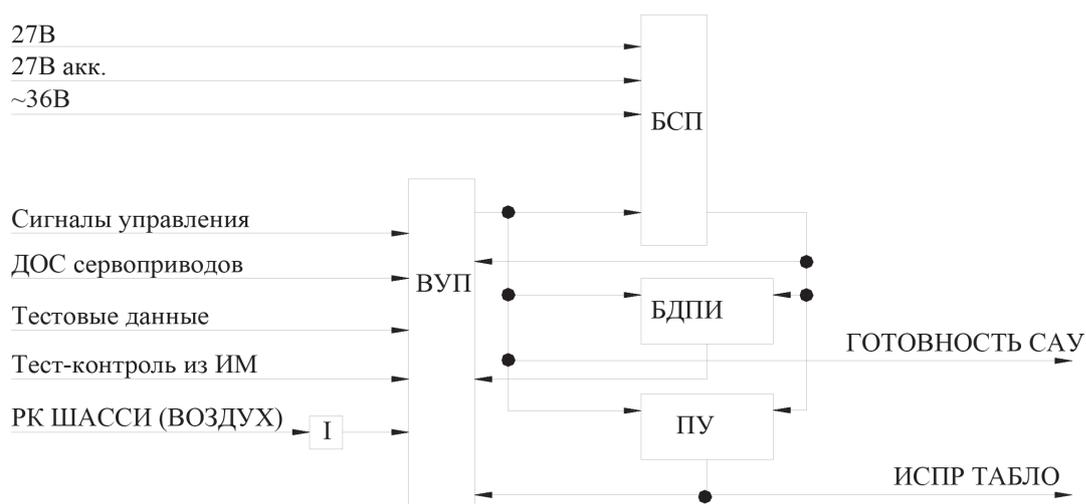


Рисунок 2. Функционально-логическая модель САУ

Таблица 1. Таблица полноты отказов

Контролируемый параметр	Наименование ФЛБ			
	ВУП	БСП	БДПИ	ПУ
ИСПР САУ	1	1	1	-
ИСПР ПУ	1	1	-	1
ГОТОВНОСТЬ САУ	1	1	1	1
ИСПР ТАБЛО	1	1	-	1
ИСП	1	1	1	1
ИСП (ППК)	1	1	1	1
ИСП (ПК)	1	1	1	1
ИСП (ПГО)	1	1	1	1

Примечание.

ИСП – итоговая строка полноты контроля при использовании всех видов контроля;

ИСП (ПК) – итоговая строка полноты контроля в полетном контроле;

ИСП (ППК) – итоговая строка полноты контроля в предполетном контроле;

ИСП (ПГО) – итоговая строка глубины поиска отказов с подробностью до одного конструктивно-сменного блока (КСБ).

Контролируемые параметры, используемые в ФЛМ, определяются по результатам наблюдений сигнализаторов и индикаторных индексов:

- предупреждающее табло «ОТКАЗ САУ» на экране ИМ (от момента включения САУ до выключения);
- кнопки-табло на ПУ-37 (включение каналов автопилота и режимов САУ);
- признаки отказов (блоков САУ) на экране ИМ в предполетном контроле;

— положение индикаторных индексов и индикация обозначений каналов управления на экране ИМ в полете.

Логическая обработка состояний сигнализаторов и индикаторов позволяет однозначно определить контролируемые параметры ФЛМ и выполнить контроль работоспособности и локализацию отказов [2].

В таблице 2 приведены интенсивности отказов блоков САУ.

Таблица 2. Интенсивности отказов блоков САУ

Наименование	Кол. шт.	$\lambda \cdot 10^{-6}$	$\lambda \cdot 10^{-6}$ (с учетом кол-ва)
Вычислитель управления полетом (ВУП)	1	185,63	185,63
Рама монтажная (РМ)	1	6,8	6,8
Пульт управления (ПУ)	1	36,47	36,47
Блок связи с приводами (БСП)	1	41,86	41,86
Блок датчиков первичной информации (БДПИ)	1	340,98	340,98
		Σ	611,74
Примечание. $\Sigma = \lambda_{\text{ВУП}} + \lambda_{\text{РМ}} + \lambda_{\text{ПУ}} + \lambda_{\text{БСП}} + \lambda_{\text{БДПИ}} = 611,74 \cdot 10^{-6}$ – суммарная интенсивность отказов всех КСБ.			

ТПК используется и как таблица неисправностей (ТН) для построения итоговой строки глубины контроля САУ.

Численное значение полноты контроля определяется по формуле:

$$\eta = \frac{\lambda_k}{\lambda_o},$$

где λ_o, λ_k — интенсивности отказов объекта контроля и его контролируемой части соответственно.

Численное значение глубины поиска отказа определяется следующим выражением:

$$\Gamma_{nl} = \frac{\lambda_{k1}}{\lambda_o},$$

где λ_{k1} — сумма интенсивностей отказов элементов объекта контроля, которые обнаруживаются с подробностью до одного конструктивно-сменного элемента;

λ_o — интенсивность отказов объекта контроля [3].

Из итоговых строк следует определение численных показателей контролепригодности:

- полнота контроля для оперативного технического обслуживания (предполетная подготовка) $\eta_{(НП)}$ — отношение суммы интенсивностей отказов КСБ (контролируемых в

предполетной подготовке), вычисляемой в соответствии с ИСП (ППК) и равной

$$\lambda_{\text{ВУП}} + \lambda_{\text{ПУ}} + \lambda_{\text{БСП}} + \lambda_{\text{БДПИ}}$$

к сумме интенсивностей отказов всех КСБ (Σ):

$$\Sigma_{(НП)} = (611,74 - 6,8) / 611,74 = 0,9888841;$$

— полнота контроля для полетного контроля $\eta_{(ПК)}$ — отношение суммы интенсивностей отказов КСБ, контролируемых в полете и вычисляемой в соответствии с ИСП (ПК) и в данном случае равной

$$\lambda_{\text{ВУП}} + \lambda_{\text{ПУ}} + \lambda_{\text{БСП}} + \lambda_{\text{БДПИ}}$$

к сумме интенсивностей отказов всех КСБ (Σ):

$$\eta_{(ПК)} = (611,74 - 6,8) / 611,74 = 0,9888841;$$

— коэффициент глубины поиска отказов с подробностью до одного КСБ — $\Gamma_{nl(ПТО)}$ — отношение суммы интенсивностей отказов КСБ (контролируемых с подробностью до одного блока в предполетной подготовке), вычисляемой в соответствии с ИСП (ПГО) и в данном случае равной Σ , к сумме интенсивностей отказов всех КСБ (Σ):

$$\Gamma_{nl(ПТО)} = 0,9888841.$$

Вероятность ложного отказа

В соответствии с методическими указаниями зависимость $P_{л}$ (вероятность ложной информации об отказе) от надежности средств контроля, полноты контроля и инструментальной достоверности контроля установлена с учетом графа переходов между состояниями объекта и решениями, принятыми по результатам контроля:

$$P_{л} = (1 - P_{ск}) \cdot P_{нгск} + P_{ск} \cdot \eta \cdot P_{ло},$$

где $P_{ло}$ — вероятность ложного отказа из-за ошибок измерения;

η — полнота контроля;

$P_{ск}$ — вероятность исправного состояния средства контроля;

$P_{нгск}$ — вероятность отказа средства контроля, при котором оно постоянно выдает информацию «не годен» вне зависимости от состояния объекта контроля («постоянно не годен») [4].

Принимаем $P_{нгск} = 1$ как наихудший случай отказов средств контроля для нашего случая.

Вероятность неисправного состояния средства контроля не рассчитывается, а определяется выражением $(1 - P_{ск})$ — вероятность отказа средства контроля (за 1 ч), и принимаем, что:

$$(1 - P_{ск}) = \sum \lambda_i,$$

где λ_i — это интенсивности отказов элементов аппаратных средств контроля: элементы эхо-контроля ВУП, схемы формирования исправности и отказов САУ, входные цепи контроля питания в ВУП и делители для напряжений источников питания в БСП.

При этом $P_{ск} = (1 - \sum \lambda_i)$.

Полнота контроля η равна 0,988 для оперативных форм контроля.

Вероятность ложного отказа из-за ошибок измерения $P_{ло}$ определяется по методике оценки показателей инструментальной достоверности контроля МУ 109-85, пункт 1.1.5, формула (4):

$$P_{ло} = 1 - (P_{вг}/P_{и}),$$

где $P_{вг} = (n_{вг}/N)$ — вероятность верного результата «годен»;

$P_{и} = (N_{и}/N)$ — вероятность исправного состояния объекта контроля на момент контроля в условиях контроля;

N — общее число поступивших на контроль объектов;

$n_{вг}$ — число исправных объектов контроля, признанных при проверке годными;

$N_{и}$ — число исправных (работоспособных) объектов контроля в условиях контроля.

Преобразуем формулу:

$$P_{ло} = 1 - (n_{вг}/N_{и}).$$

Для определения $P_{ло}$ требуется в ходе испытаний определить число признанных контролем верно годными — $n_{вг}$, и число исправных САУ — $N_{и}$ (по заключению специалистов) при любых результатах контроля. Окончательная формула для вероятности ложной информации об отказе:

$$P_{л} = \sum \lambda_i \cdot 1 + (1 - \sum \lambda_i) \times \\ \times 0,988 \cdot [1 - (n_{вг}/N_{и})].$$

Подсчет суммарной интенсивности отказов элементов контроля САУ-37А, соответствующий $\sum \lambda_i$, приведен в таблице 2.3 [5]:

$$\sum \lambda_i = 18 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Для оценки результатов предполетного контроля полагаем, что число наземных работ на борту можно считать числом объектов контроля, и предполагаем, что в ходе испытаний зафиксируем равенство $n_{вг} = N_{и}$, то есть все зафиксированные отказы будут достоверны, то есть не будет ошибок измерения и, следовательно, $P_{ло} = 0$, тогда вероятность ложного отказа:

$$P_{л} = \sum \lambda_i = 18 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Выводы

ВСК САУ обеспечивают:

1. Полноту непрерывного автоматического контроля в полете и на земле на уровне 0,988, что соответствует требованию на САУ-37 (не менее 0,9);
2. Полноту предполетного контроля (кроме сервоприводов исполнительных агрегатов управления) на уровне 0,988, что соответствует требованию ТЗ на САУ-37 (не менее 0,95);
3. Глубину поиска отказов до КСЕ с вероятностью не менее 0,988, что соответствует требованию ТЗ на САУ-37 (не менее 0,95);
4. Вероятность ложного отказа не превышает $18 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Список литературы

1. Руководство по летной эксплуатации вертолета Ка-226, ОАО «Камов». 2002. 664 с.
2. Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Силаев А.В. Реконфигурация системы управления летательными аппаратами при отказах // Автоматика и телемеханика. 1996. № 1. С. 3–20.
3. Глумов В.М., Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Силаев А.В. Повышение живучести автоматических систем с использованием алгоритмического обеспечения инвариантности к отказам // Надежность, живучесть и безопасность автоматизированных комплексов: тез. докл. IV Всесоюзн. совещания. М.: ИПУ АН СССР, 1988. С. 29–30.
4. Егупов Н.Д., Пупков К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления. М.: МГТУ, 2004. Т. 3: Методы современной теории автоматического управления. 616 с.
5. Сравнительный анализ результатов стендовых и летных исследований последствий отказов САУ на вертолете с летчиком в контуре управления: отчет № 1321-78-II предприятия п/я В-8759. 1978.

References

1. Rukovodstvo po letnoy ekspluatatsii vertoleta Ka-226, OAO «Kamov» [Guidelines for the Flight Operation of the Ka-226 Helicopter, Kamov OJSC]. 2002. 664 p. [in Russian].
2. Zemlyakov S.D., Rutkovskiy V.Yu., Silayev A.V. Rekonfiguratsiya sistemy upravleniya letatel'nymi apparatami pri otkazakh [Reconfiguration of the Control System of Air-

craft in Case of Failures]. *Avtomatika i telemechanika — Automatics and Telemechanics*, 1996, No. 1, pp. 3–20. [in Russian].

3. Glumov V.M., Zemlyakov S.D., Rutkovskiy V.Yu., Silayev A.V. Povysheniye zhi-vuchesti avtomaticheskikh sistem s ispol'-zovaniyem algoritmicheskogo obespe-cheniya invariantnosti k otkazam [Improving the Survivability of Automatic Systems Using Algorithmic Support for Failure Invariance]. *Tezisy dokladov IV Vsesoyuznogo sovesh-chaniya «Nadezhnost', zhivuchest' i bezopasnost' avtomatizirovannykh kompleksov»* [Abstracts of the IV All-Union Meeting «Reliability, Survivability and Safety of Automated Systems»]. Moscow, IPU AN SSSR, 1988, pp. 29–30. [in Russian].

4. Yegupov N.D., Pupkov K.A. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of the Classical and Modern Theory of Automatic Control]. Moscow, MSTU, 2004. T. 3: *Metody sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Vol. 3: Methods of the Modern Theory of Automatic Control]. 616 p. [in Russian].

5. *Sravnitel'nyy analiz rezul'tatov stendovyykh i letnykh issledovaniy posledstviy otkazov SAU na vertolete s letchikom v konture upravleniya: otchet № 1321-78-II predpriyatiya p/ya V-8759* [Comparative Analysis of the Results of Bench and Flight Studies of the Consequences of ACS Failures in a Helicopter with a Pilot in the Control Loop. Report No. 1321-78-II Enterprises p/I-8759]. 1978. [in Russian].



Доломатов М. Ю.
Dolomatov M. Yu.

доктор химических наук, кандидат
технических наук, профессор кафедры
технологии нефти и газа,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
профессор кафедры физической
электроники и нанофизики,
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный
университет»,
г. Уфа, Российская Федерация



Шуткова С. А.
Shutkova S. A.

кандидат химических наук,
доцент кафедры теплоэнергетики
и физики,
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный
аграрный университет»,
г. Уфа, Российская Федерация



Бахтизин Р. З.
Bakhtizin R. Z.

доктор физико-математических наук,
профессор,
заведующий кафедрой физической
электроники и нанофизики,
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный
университет»,
г. Уфа, Российская Федерация



Доломатова М. М.
Dolomatova M. M.

аспирант кафедры физической
электроники и нанофизики,
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный
университет»,
г. Уфа, Российская Федерация

УДК 541.1

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-118-124

ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ И ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ НАНОКЛАСТЕРОВ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ДИМЕРОВ НЕФТЯНЫХ АСФАЛЬТЕНОВ «КОНТИНЕНТАЛЬНОГО» ТИПА

Проведено исследование молекулярной и электронной структуры нанокластеров, состоящих из молекулярных фрагментов димеров нефтяных асфальтенов «континентального» типа. Объектами исследования являются асфальтены деасфальтизации Западно-Сибирской нефти. Выделение и разделение асфальтенов проводилось на аппарате Сокслета по методике И.Р. Хайрудинова. Регистрация спектров поглощения растворов в диапазоне 280–780 нм проводилась на спектрофотометре СФ-2000. В процессе изучения спектров поглощения

асфальтенов и углеводородных систем различного происхождения методом оптической спектроскопии установлены физико-химические свойства нефтяных асфальтенов. Установлена среднечисловая молекулярная масса нефтяных асфальтенов (2437–3884 а.е.м.). Эффективная энергия активации принимает значения в интервале от 162 до 266,4 кДж/моль.

Исследована молекулярная структура нанокластеров нефтяных асфальтенов. Расчет нанокластеров асфальтенов, образованных молекулярными фрагментами, был проведен методом молекулярной механики ММ+. Диапазон энергии межмолекулярного взаимодействия – от 119 до 226 кДж/моль, что в целом отражает результаты эксперимента. Подтверждена непланарность структуры молекулярных фрагментов нанокластеров нефтяных асфальтенов. Двугранный угол между плоскостью нафтенового кольца и виртуальной плоскостью ароматических колец в структурах димеров находится в интервале от 161° до 168°. Алкановые заместители в ароматических структурах по периферии не располагаются в нафтеноароматической плоскости молекулярного фрагмента. Установлены значения двугранного угла между алкановой цепочкой заместителя и виртуальной плоскостью ароматических колец димера (от 108° до 158°). Расстояние h между виртуальными плоскостями нафтеноароматических фрагментов в нанокластерах находится в интервале от 3,59 до 3,64 Å.

Данные расчета энергии межмолекулярного взаимодействия молекулярных фрагментов (от 119 до 226 кДж/моль) согласуются с данными эксперимента по определению эффективной энергии активации (от 162 до 266,4 кДж/моль). Этот факт свидетельствует о возможности формирования стабильных наноагрегатов, состоящих из 6–10 нафтеноароматических фрагментов димеров за счет донорно-акцепторного взаимодействия.

Ключевые слова: нефтяные асфальтены, нанокластеры, димеры, оптическая спектроскопия, квантово-химические расчеты, энергия активации, энергия межмолекулярного взаимодействия.

RESEARCH OF THE MOLECULAR AND ELECTRONIC STRUCTURE OF NANOCLUSTERS OF MOLECULAR DIMERS OF «CONTINENTAL» TYPE OIL ASPHALTES

A study was made of the molecular and electronic structure of nanoclusters consisting of molecular fragments of dimers of «continental» type petroleum asphaltenes. Objects of research are asphaltene deasphalting West Siberian oil. Extraction and separation of asphaltenes were carried out on a Soxhlet apparatus by I.R. Khayrudinov method. The absorption spectra of solutions in the range 280–780 nm were recorded on an SF-2000 spectrophotometer. In the process of studying the absorption spectra of asphaltenes and hydrocarbon systems of various origin by the method of optical spectroscopy, the physicochemical properties of oil asphaltenes are established. The average molecular mass of oil asphaltenes is established (2437–3884 a. u. m). The effective activation energy ranges from 162 to 266,4 kJ/mol.

The molecular structure of oil asphaltene nanoclusters is studied. The calculation of asphaltene nanoclusters formed by molecular fragments was carried out using the molecular mechanics ММ+ method. The energy range of intermolecular interaction is from 119 to 226 kJ/mol, which generally reflects the experimental results. The nonplanarity of the structure of petroleum asphaltene dimers is confirmed. The dihedral angle between the plane of the naphthenic ring and the virtual plane of the aromatic rings in the dimer structures ranges from 161° to 168°. Alkane substituents in aromatic structures around the periphery are not located in the naphtheno-aromatic plane of the molecular fragment. Values of dihedral angle between alkane chain of substituent and virtual plane of aromatic rings of dimer (from 108° to 158°) are set. The distance h between the virtual planes of the naphtheno-aromatic fragments in the nanoclusters is the range from 3.59 to 3.64 Å.

The data for calculating the energy of intermolecular interaction of molecular fragments (119 to 226 kJ/mol) are consistent with the data of the experiment for determination of effective activation energy (162 to 266.4 kJ/mol). This fact indicates the possibility of forming stable nanoaggregates consisting of 6-10 naphtheno-aromatic fragments of dimers due to donor-acceptor interaction.

Key words: oil asphaltenes, nanoclusters, dimers, optical spectroscopy, quantum chemical calculations, activation energy, intermolecular interaction energy.

Асфальтены, являясь высокомолекулярными гетероциклическими соединениями нефтяных дисперсных систем (НДС), имеют перспективу применения в различных электронных и электротехнических устройствах в качестве органических электропроводящих материалов [1-4]. В настоящее время имеют место две модели структуры асфальтенов: «континентального» типа и структуры типа «архипелаг» [5, 6]. При этом методом ^{13}C ЯМР-спектроскопии установлено, что молекулы нефтяных асфальтенов имеют структуру преимущественно «континентального» типа [7, 8]. Исследования, проведенные методом масс-спектрометрии, показывают, что молекулы нефтяных асфальтенов, имеют ароматические ядра (7–8 колец) с длинными алкилированными цепочками (в среднем ~ 7 атомов углерода) [9, 10]. Методами элементного, ИК- и хромато-масс-спектрального анализов установлено, что основными компонентами асфальтенов НДС являются алкилароматические, нафтеновые и парафиновые углеводороды [9, 10]. Обнаружено содержание атомов азота в структурах пиридина, пиррола и порфирина. В макромолекулах нефтяных асфальтенов содержатся атомы кислорода, присутствуя в карбонильных, карбоксильных, гидроксильных и эфирных группах. Кроме того, доказано наличие тиофеновых циклов, сульфидных и тиольных групп в структурах асфальтенов [9, 10]. Различными экспериментальными методами установлено, что молекулярная масса нефтяных асфальтенов имеет значения в интервале от 800 до 6000 у.е. [11, 12].

Нефтяные асфальтены обладают способностью к образованию наноагрегатов [13, 14]. Только при достаточно низких концентрациях (менее 1–2 мг/л) асфальтены присутствуют в нефтяных дисперсных системах в виде отдельных молекул [15]. При увеличении концентрации асфальтенов в нефтяных дисперсных системах образуются димеры, тримеры и олигомеры. Формирование устойчивых наноструктур, образованных из 6–10 макромолекул асфальтенов, происходит при значениях концентрации от 50 до 200 мг/л [16]. Авторы предполагают, что наноструктуры образуются из параллельно

расположенных нафтоароматических фрагментов молекул асфальтенов «континентального» типа [12]. Методами рентгеновской дифракции и ИК-спектроскопии показано образование слоистых структур при нагревании пленок гексан-нерастворимых асфальтенов каменноугольного пека и определены межплоскостные расстояния между ареновыми слоями (3,44–3,60 Å) [17]. Термодинамическими методами выполнены расчеты энергии межмолекулярного взаимодействия нефтяных асфальтенов (30–100 кДж/моль) [18]. Данные расчета доказывают, что происходит образование комплексов с переносом заряда, при этом агрегация асфальтенов в нефтях происходит за счет донорно-акцепторного взаимодействия макромолекул.

Данная работа является продолжением исследования молекулярной и электронной структуры наночастиц нефтяных асфальтенов [19, 20] и посвящена изучению нанокластеров димеров, состоящих из нафтоароматических фрагментов «континентального» типа.

Объекты исследования

Объектами исследования являются асфальтены деасфальтизации Западно-Сибирской нефти (ЗСН).

Экспериментальные методы

Выделение и разделение асфальтенов проводилось на аппарате Сокслета по методике И.Р. Хайрудинова [21]. Электронные абсорбционные спектры в видимой и УФ-области (280–780 нм) растворов асфальтенов в толуоле регистрировались на спектрофотометре СФ-2000. Физико-химические свойства определены по известным методикам [22].

Расчетные методы

Исследование электронной и химической структуры молекулярных фрагментов наночастиц асфальтенов проведено методом DFT/V3LYP с базисным набором 6-31+G*, используя программный пакет GAUSSIAN. Расчет нанокластеров асфальтенов, образованных молекулярными фрагментами, был проведен методом молекулярной механики MM+. Все расчеты проведены с полной оптимизацией геометрии. Энергия межмолекулярного взаимодействия определялась по методике [23].

В качестве молекулярных фрагментов были выбраны структуры по результатам обобщения данных физико-химических исследований асфальтенов. Молекулярным фрагментом нанокластера является димер, состоящий из двух молекул асфальтенов «континентального» типа, соединенных между собой углеводородной цепочкой, содержащей четыре атома углерода. Молекулярная масса димера равна 1326 а.е.м.; отношение (С/Н) мол — 9,93; отношение числа атомов в состоянии sp^2 -гибридизации к числу атомов в sp^3 -гибридизации — 0,78. Структура димера молекулярного фрагмента содержит восемь ароматических и десять нафтеновых колец, два пиррольных кольца, две карбонильные группы, а четыре алкановые цепочки C_2H_5 -заместителей. Элементный состав димера: 91 атом углерода, 110 атомов водорода, 6 атомов кислорода и 2 атома азота. Молекулярные массы нанокластеров находятся в интервале от 2468 а.е.м. (2 фрагмента) до 13260 а.е.м. (10 фрагментов).

Результаты и обсуждение

Экспериментально установлены средне-числовая молекулярная масса нефтяных асфальтенов (2437–3884 а.е.м.) и эффективная энергия активации (162–266,4 кДж/моль).

Рассчитана энергия межмолекулярного взаимодействия димеров нефтяных асфальтенов (119–226 кДж/моль). Полученные данные согласуются с результатами исследования эффективной энергии активации, определенной методом электронной спектроскопии. Исследования показали, что, начиная с определенного значения количества молекулярных фрагментов в нанокластере (около 6), значения энергии активации проводимости принимают определенное значение (около 3,60 эВ). Следовательно, при определенном количестве молекулярных фрагментов наступает стабилизация образованных нанокластеров. Тем самым подтверждается теория, согласно которой наиболее устойчивыми являются наноагрегаты, состоящие из 6–10 нафтеноароматических пластин.

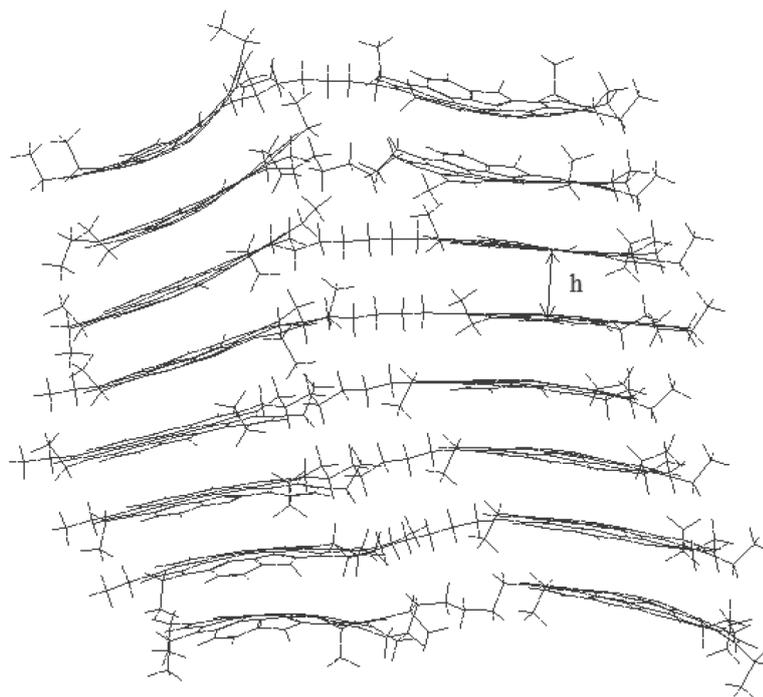


Рисунок 1. Структура нанокластера, состоящая из восьми молекулярных фрагментов

Исследования методом молекулярной механики показали, что нанокластеры, состоящие от 2 до 10 димеров, имеют структуру, отличную от планарной (рисунок 1). Вычислены значения двугранного угла между плоскостью нафтенового кольца и виртуальной плоскостью ароматических

колец в структурах (161° – 168°). Алкановые заместители в ароматических структурах по периферии не располагаются в нафтеноароматической плоскости молекулярного фрагмента. Установлены значения двугранного угла между алкановой цепочкой заместителя и виртуальной плоскостью ароматических

колец димера (108° – 158°). Определено расстояние h между нафтеноароматическими фрагментами в нанокластере ($3,59$ – $3,64$ Å). Данные расчета энергии межмолекулярного взаимодействия молекулярных фрагментов (119 – 226 кДж/моль) согласуются с данными эксперимента по определению эффективной энергии активации (от 162 до $266,4$ кДж/моль). Этот факт свидетельствует о возможности формирования стабильных наноагрегатов, состоящих из 6 – 10 нафтеноароматических фрагментов димеров за счет донорно-акцепторного взаимодействия.

Выводы

1. Исследования показали, что данные расчета энергии межмолекулярного взаимодействия нафтеноароматических фрагментов димеров (119 – 226 кДж/моль) согласуются с результатами эксперимента по определению эффективной энергии активации (162 – $266,4$ кДж/моль). Возможность форми-

рования стабильных нанокластеров нефтяных асфальтенов со значительной энергией межмолекулярного взаимодействия частиц согласуется с экспериментальными данными.

2. Подтверждена непланарность структуры молекулярных фрагментов нанокластеров нефтяных асфальтенов. Вычислены значения двугранного угла между плоскостью нафтенового кольца и виртуальной плоскостью ароматических колец в структурах (161° – 168°). Установлены значения двугранного угла между виртуальными алкановой цепочкой и виртуальной плоскостью ароматических колец димера (108° – 158°). Определено расстояние h между нафтеноароматическими фрагментами в нанокластере ($3,59$ – $3,64$ Å).

Работа выполнена по гранту РФФИ № 17-42-020616.

Список литературы

1. Aviram A., Ratner M.A. Molecular Rectifiers // Chem. Phys. Lett. 1974. No. 29. P. 277–283.
2. Elbing M., Ochs R., Koentopp M., Fischer M., Hanisch C., Weigend F., Evers F., Weber H.B., Mayor M. A Single-Molecule Diode // Proceedings of the National Academy of Sciences, U.S.A. 2005. Issue 102. P. 8815–8820.
3. Долوماتов М.Ю., Дезорцев С.В., Шуткова С.А., Шуляковская Д.О. Асфальто-смолистые вещества и продукты на их основе как возможные материалы для наноэлектроники // Наукоемкие технологии. 2012. Т. 13, № 6. С. 18–22.
4. Dolomatov M.Yu., Desortsev S.V., Shutkova S.A. Asphaltenes of Oil and Hydrocarbon Distillates as Nanoscale Semiconductors // Journal of Materials Science and Engineering. 2012. Vol. 2. No. 2. P. 151–157.
5. Sabbah H., Morrow A.L., Pomerantz A.E., Zare R.N. Evidence for Island Structures as the Dominant Architecture of Asphaltenes // Energy Fuels. 2011. Vol. 25. No. 4. P. 1597–1604.
6. Dmitriev D.E., Golovko A.K. Modeling the Molecular Structure of Petroleum Resins

and Asphaltenes and Their Thermodynamic Stability Calculations // Chemistry for Sustainable Development. 2010. No. 18. P. 171–180.

7. Majumdar R.D., Bake K.D., Ratna Y., Pomerantz A.E., Mullins O.C., Gerken M., Hazendonk P. Single-Core PAHs in Petroleum- and Coal-Derived Asphaltenes: Size and Distribution from Solid-State NMR Spectroscopy and Optical Absorption Measurements // Energy Fuels. 2016. Vol. 30, No 9. P. 6892–6906.

8. Sabbah H., Morrow A.L., Pomerantz A.E., Zare R.N. Evidence for Island Structures as the Dominant Architecture of Asphaltenes // Energy Fuels. 2011. Vol. 25, No. 4. P. 1597–1604.

9. Andrews A.B., Edwards J.C., Pomerantz A.E., Mullins O.C., Dennis Nordlund D.K. Comparison of Coal-Derived and Petroleum Asphaltenes by ^{13}C Nuclear Magnetic Resonance, DEPT, and XRS // Energy Fuels. 2011. Vol. 25, No. 7. P. 3068.

10. Mullins O.C., Sheu E.Y. Structures and Dynamics of Asphaltenes. Springer Science + Business Media, LLC, 1998. 293 p.

11. Hortal A.R., Martinez-Haya B., Lobato M.D., Pedrosa J.M., Lago S. On the Determination of Molecular Weight Distributions of Asphaltenes and Their Aggregates in Laser

Desorption Ionization Experiments // *J. Mass Spectrom.* 2006. Vol. 41. No. 7. P. 960–968.

12. Groenzin H., Mullins O.C. Molecular Size and Structure of Asphaltenes from Various Sources // *Energy Fuels.* 2000. Vol. 14, No 3. P. 677.

13. Mullins O.C. The Modified Yen Model // *Energy Fuels.* 2010. Vol. 24, No. 4. P. 2179–2207.

14. Andreatta G., Goncalves C.C., Buffin G., Bostrom N., Quintella C.M., Arteaga-Larios F., Perez E., Mullins O.C. Nanoaggregates and Structure-Function Relations in Asphaltenes // *Energy Fuel.* 2005. Vol. 19, No. 4. P. 1282–1289.

15. Ахметов Б.Р., Евдокимов И.Н., Елисеев Н.Ю. Некоторые особенности надмолекулярных структур в нефтяных средах // *Химия топлив и масел.* 2002. № 4, 41. С. 41-43.

16. Lisitza N.V., Freed D.E., Sen P.N., Song Y.Q. Study of Asphaltene Nanoaggregation by Nuclear Magnetic Resonance (NMR) // *Energy Fuels.* 2009. Vol. 23, No. 3. P. 1189–1193.

17. Созинов С.А., Сотникова Л.В., Попова А.Н., Колмыков Р.П. Исследование тонких пленок асфальтенов полученных из каменноугольного пека // *Бутлеровские сообщения.* 2017. Т. 51. № 8. С. 75.

18. Доломатов М.Ю., Марушкин А.Б., Гимаев Р.Н., Селивестров М.М. Термодинамика формирования надмолекулярной структуры асфальтенов // *Химия твердого топлива.* 1989. № 6. С. 83–864.

19. Доломатов М.Ю., Шуткова С.А., Дезорцев С.В. Структурно-химические характеристики модельных молекулярных фрагментов нефтяных асфальтенов // *Нефтехимия.* 2012. Т. 52, № 4. С. 299–303.

20. Доломатов М.Ю., Шуткова С.А. Надмолекулярная структура нефтяных асфальтенов «континентального» типа // *Журнал структурной химии.* 2017. Т. 58, № 7. С. 1311–1316.

21. Хайрудинов И.Р. Султанов Ф.М., Теляшев Э.Г. Современные процессы сольвентной деасфальтизации нефтяных остатков. Уфа: Издательство ГУП ИНХП РБ. Серия «Библиотека нефтепереработчика», 2011. 208 с.

22. Доломатов М.Ю., Шуляковская Д.О. Оценка физико-химических свойств многокомпонентных углеводородных систем по

интегральным характеристикам электронных спектров поглощения // *Химия и технология топлив и масел.* 2013. № 2. С. 49–52.

23. Шуткова С.А., Доломатов М.Ю., Бахтизин Р.З., Хайрудинов И.Р., Доломатова М.М., Ишниязов З.З. Исследование молекулярной структур нанокластеров нефтяных асфальтенов // *Бутлеровские сообщения.* 2018. Т. 53. № 2. С. 38–45.

References

1. Aviram A., Ratner M.A. Molecular Rectifiers. *Chem. Phys. Lett.*, 1974, No. 29, pp. 277-283.

2. Elbing M., Ochs R., Koentopp M., Fischer M., Hanisch C., Weigend F., Evers F., Weber H.B., Mayor M. A Single-Molecule Diode. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, U.S.A. 2005, Issue 102, pp. 8815–8820.

3. Dolomatov M. Yu., Desortsev S.V., Shutkova S.A., Shulyakovskaya D.O. Asfal'tosmolistyye veshchestva i produkty na ikh osnove kak vozmozhnyye materialy dlya nanoelektroniki [Asphaltic Substances and Products on Their Basis as Possible Materials for a Nanoelectronics]. *Naukoyemkiye tekhnologii — High Technologies*, 2012. Т. 13, № 6. S. 18–22. [in Russian].

4. Dolomatov M. Yu., Desortsev S.V., Shutkova S.A. Ashaltenes of Oil and Hydrocarbon Distillates as Nanoscale Semiconductors. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2012, Vol. 2, No. 2, pp. 151–157.

5. Sabbah H., Morrow A.L., Pomerantz A.E., Zare R.N. Evidence for Island Structures as the Dominant Architecture of Asphaltenes. *Energy Fuels*, 2011, Vol. 25, No. 4, pp. 1597–1604.

6. Dmitriev D.E., Golovko A.K. Modeling the Molecular Structure of Petroleum Resins and Asphaltenes and Their Thermodynamic Stability Calculations. *Chemistry for Sustainable Development*, 2010, No. 18, P. 171–180.

7. Majumdar R.D., Bake K.D., Ratna Y., Pomerantz A.E., Mullins O.C., Gerken M., Hazendonk P. Single-Core PAHs in Petroleum- and Coal-Derived Asphaltenes: Size and Distribution from Solid-State NMR Spectroscopy and Optical Absorption Measurements. *Energy Fuels*, 2016, Vol. 30, No. 9, pp. 6892–6906.

8. Sabbah H., Morrow A.L., Pomerantz A.E., Zare R.N. Evidence for Island Struc-

tures as the Dominant Architecture of Asphaltenes. *Energy Fuels*, 2011, Vol. 25, No. 4, pp. 1597–1604.

9. Andrews A.B., Edwards J.C., Pomerantz A.E., Mullins O.C., Dennis Nordlund D.K. Comparison of Coal-Derived and Petroleum Asphaltenes by ^{13}C Nuclear Magnetic Resonance, DEPT, and XRS. *Energy Fuels*, 2011, Vol. 25, No. 7, pp. 3068.

10. Mullins O.C., Sheu E.Y. *Structures and Dynamics of Asphaltenes*. Springer Science + Business Media, LLC, 1998. 293 p.

11. Hortal A.R., Martinez-Haya V., Lobato M.D., Pedrosa J.M., Lago S. On the Determination of Molecular Weight Distributions of Asphaltenes and Their Aggregates in Laser Desorption Ionization Experiments. *J. Mass Spectrom.*, 2006, Vol. 41, No. 7, pp. 960–968.

12. Groenzin H., Mullins O.C. Molecular Size and Structure of Asphaltenes from Various Sources. *Energy Fuels*, 2000, Vol. 14, No. 3, pp. 677.

13. Mullins O.C. The Modified Yen Model. *Energy Fuels*, 2010, Vol. 24, No. 4, pp. 2179–2207.

14. Andreatta G., Goncalves C.C., Buffin G., Bostrom N., Quintella C.M., Arteaga-Larios F., Perez E., Mullins O.C. Nanoaggregates and Structure-Function Relations in Asphaltenes. *Energy Fuels*, 2005, Vol. 19, No. 4, pp. 1282–1289.

15. Akhmetov B.R., Yevdokimov I.N., Yeliseyev N.Yu. Nekotoryye osobennosti nadmolekulyarnykh struktur v neftyanykh sredakh [Some Features of Supramolecular Structures in Oil Media]. *Khimiya topliv i masel — Chemistry of Fuels and Oils*, 2002, No. 4, 41, pp. 41–43. [in Russian].

16. Lisitza N.V., Freed D.E., Sen P.N., Song Y.Q. Study of Asphaltene Nanoaggregation by Nuclear Magnetic Resonance (NMR). *Energy Fuels*, 2009, Vol. 23, No. 3, pp. 1189–1193.

17. Sozinov S.A., Sotnikova L.V., Popova A.N., Kolmykov R.P. Issledovaniye tonkikh plenok asfal'tenov poluchennykh iz kamenougol'nogo peka [The Study of Thin Films of Asphaltenes Obtained from Coal Tar Pitch]. *Butlerovskiye soobshcheniya [Butlerov Reports]*. 2017, Vol. 51, No. 8, pp. 75. [in Russian].

18. Dolomatov M.YU., Marushkin A.B., Gimayev R.N., Selivestrov M.M. Termodi-

namika formirovaniya nadmolekulyarnoy struktury asfal'tenov [Thermodynamics of the Formation of the Supramolecular Structure of Asphaltenes]. *Khimiya tverdogo topliva — Chemistry of Solid Fuels*, 1989, No. 6, pp. 83–864. [in Russian].

19. Dolomatov M.Yu., Shutkova S.A., Dezortsev S.V. Strukturno-khimicheskiye kharakteristiki model'nykh molekulyarnykh fragmentov neftyanykh asfal'tenov [Structural and Chemical Characteristics of Model Molecular Fragments of Petroleum Asphaltenes]. *Neftekhimiya — Petrochemistry*, 2012, Vol. 52, No. 4, pp. 299–303. [in Russian].

20. Dolomatov M.YU., Shutkova S.A. Nadmolekulyarnaya struktura neftyanykh asfal'tenov «kontinental'nogo» tipa [Study of a Supramolecular Structure of Continental Type Petroleum Asphaltenes]. *Zhurnal strukturnoy khimii — Journal of Structural Chemistry*, 2017, Vol. 58, No. 7, pp. 1311–1316. [in Russian].

21. Khayrudinov I.R., Sultanov F.M., Telyashev E.G. *Sovremennyye protsessy sol'ventnoy deasfal'tizatsii neftyanykh ostatkov* [Modern Processes of Solvent Deasphaltizing of Oil Residues]. Ufa, Izdatel'stvo GUP INKHP RB. Seriya «Biblioteka neftepererabotchika», 2011. 208 p. [in Russian].

22. Dolomatov M.Yu., Shulyakovskaya D.O. Otsenka fiziko-khimicheskikh svoystv mnogokomponentnykh uglevodorodnykh sistem po integral'nym kharakteristikam elektronnykh spektrov pogloshcheniya [Assessment of Physical and Chemical Properties of Multicomponent Hydrocarbon Systems on Integrated Characteristics of Electronic Ranges of Absorption]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel — Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2013, No. 2, pp. 49–52. [in Russian].

23. Shutkova S.A., Dolomatov M.Yu., Bakhtizin R.Z., Khayrudinov I.R., Dolomatova M.M., Ishniyazov Z.Z. Issledovaniye molekulyarnoy struktur nanoklasterov neftyanykh asfal'tenov [Investigation of the Molecular Structures of Oil Asphaltene Nanoclusters]. *Butlerovskiye soobshcheniya [Butlerov Reports]*. 2018, Vol. 53, No. 2, pp. 38–45. [in Russian].

ОБ АВТОРАХ

Андрианов Артур Валерьевич

начальник лаборатории, Акционерное общество «Таганрогский научно-исследовательский институт связи», г. Таганрог, Российская Федерация

Балахонцев Вячеслав Егорович

начальник отдела 175, Акционерное общество «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», г. Уфа, Российская Федерация

Бахтизин Рауф Загидович

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физической электроники и нанофизики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», г. Уфа, Российская Федерация

Бекузин Владимир Игоревич

аспирант кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Буй Чунг Кьен

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника», Куангниньский промышленный университет, г. Куангнинь, Социалистическая Республика Вьетнам

Бухаров Дмитрий Сергеевич

кандидат технических наук, заместитель начальника службы – начальник отдела, Служба автоматизированных систем диспетчерского управления, Филиал АО «СО ЕЭС» «Региональное диспетчерское управление энергосистемы Иркутской области», г. Иркутск, Российская Федерация

Вавилов Вячеслав Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, 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

Гусаков Денис Валерьевич

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Гусев Роман Александрович

ведущий специалист, Служба автоматизированных систем диспетчерского управления, Филиал АО «СО ЕЭС» «Региональное диспетчерское управление энергосистемы Иркутской области», г. Иркутск, Российская Федерация

Дебиев Майрбек Вахаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электропривод», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова», г. Грозный, Российская Федерация

Доломатов Михаил Юрьевич

доктор химических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры технологии нефти и газа, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», профессор кафедры физической электроники и нанопластики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», г. Уфа, Российская Федерация

Доломатова Милана Михайловна

аспирант кафедры физической электроники и нанопластики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», г. Уфа, Российская Федерация

Дорфман Борис Соломонович

генеральный директор, Акционерное общество «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», г. Уфа, Российская Федерация

Ельмурзаев Адлан Алашевич

старший преподаватель кафедры «Теплотехника и гидравлика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова», г. Грозный, Российская Федерация

Зайцева Алина Александровна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Зикий Анатолий Николаевич

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры информационной безопасности телекоммуникационных систем Института компьютерных технологий и информационной безопасности, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», г. Таганрог, Российская Федерация

Зламан Павел Николаевич

ведущий инженер-конструктор, Научно-конструкторское бюро моделирующих и управляющих систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», г. Таганрог, Российская Федерация

Иванов Александр Николаевич

аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», г. Уфа, Российская Федерация

Иванова Ольга Владимировна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Управление и сервис в технических системах», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Исмагилов Флюр Рашитович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Керасирова Анастасия Алексеевна

студент кафедры «Информационно-измерительная техника» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Клименко Ольга Витальевна

студент кафедры «Информационно-измерительная техника» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Короткова Людмила Николаевна

кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Кочубей Алексей Сергеевич

инженер-конструктор 3 категории, Акционерное общество «Таганрогский научно-исследовательский институт связи», г. Таганрог, Российская Федерация

Кретюк Денис Александрович

кандидат технических наук, старший 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

Кубряк Александр Иванович

студент 4 курса кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Ле Ван Тунг

аспирант кафедры «Электроэнергетика и электромеханики», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Лихачев Евгений Александрович

старший преподаватель кафедры «Информационно-измерительная техника» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Мартяшева Валентина Анатольевна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Маштанов Николай Михайлович

студент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Меньшенин Иван Сергеевич

курсант учебной группы по специальности «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Камчатский государственный технический университет», г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

Муравьева Елена Александровна

доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Самаров Евгений Кимович

кандидат технических наук, декан факультета инфокоммуникационных систем и технологий, Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет», г. Королев Московской области, Российская Федерация

Соловьев Алексей Владимирович

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

Ураксеев Марат Абдуллович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Халиков Рауф Музагитович

кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры «Прикладные и естественнонаучные дисциплины», 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

Шуваева Алена Олеговна

ассистент кафедры «Теория машин и оборудования», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Камчатский государственный технический университет», г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

Шулаева Екатерина Анатольевна

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

Шуткова Светлана Александровна

кандидат химических наук, доцент кафедры теплоэнергетики и физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», г. Уфа, Российская Федерация

Янбеков Эмиль Рамилевич

магистрант кафедры «Цифровые технологии в разработке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Andrianov Artur V.

Head of Laboratory, Joint Stock Company «Taganrog Scientific-Research Institute of Communication», Taganrog, Russian Federation

Bakhtizin Rauf Z.

Dr. Sci. Phys.-Math., Professor, Head of Physical Electronics and Nanophysics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», Ufa, Russian Federation

Balahoncev Viacheslav E.

Head of Department 175, JSC «Ufa Scientific-Production Enterprise «Molniya»», Ufa, Russian Federation

Bekuzin Vladimir I.

Postgraduate Student of Electromechanics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», Ufa, Russian Federation

Bui Trung Kien

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electrical Engineering Department, Quang Ninh University of Industry, Quang Ninh, Socialist Republic of Vietnam

Bukharov Dmitry S.

Cand. Sci. Tech., Deputy Head of Service – Head of Division, Service of Automated Dispatch Control Systems, Branch of Joint-Stock Company «System Operator of the United Power System» «Regional Dispatch Control of the Energy System of Irkutsk Region», Irkutsk, Russian Federation

Debiev Mayrbek V.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electrical Engineering Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov», Grozny, Russian Federation

Dolomatov Mikhail Yu.

Dr. Sci. Chem., Cand. Sci. Tech., Professor of Oil and Gas Processing Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Professor of Physical Electronics and Nanophysics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», Ufa, Russian Federation

Dolomatova Milana M.

Post-graduate Student of Physical Electronics and Nanophysics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», Ufa, Russian Federation

Dorfman Boris S.

General Director, JSC «Ufa Scientific-Production Enterprise «Molniya»», Ufa, Russian Federation

Elmurzaev Adlan A.

Senior Lecturer of Heat Engineering and Hydraulics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov», Grozny, Russian Federation

Gusakov Denis V.

Cand. Sci. Tech., Senior Lecturer of Electromechanics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», Ufa, Russian Federation

Gusev Roman A.

Leading Specialist, Service of Automated Dispatch Control Systems, Branch of Joint-Stock Company «System Operator of the United Power System» «Regional Dispatch Control of the Energy System of Irkutsk Region», Irkutsk, Russian Federation

Ismagilov Flyur R.

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Electromechanics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», Ufa, Russian Federation

Ivanov Aleksandr N.

Postgraduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», Ufa, Russian Federation

Ivanova Olga V.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Management and Service in Technical Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Kerasirova Anastasya A.

Student of Information-Measuring Equipment Department of the Faculty of Avionics, Energy and Info-Communications, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», Ufa, Russian Federation

Khalikov Rauf M.

Cand. Sci. Chem., Associate Professor, Assistant Professor of Applied and Natural Sciences Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Klimenko Olga V.

Student of Information-Measuring Equipment Department of the Faculty of Avionics, Energy and Info-Communications, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», Ufa, Russian Federation

Kochubey Aleksey S.

Design Engineer, Joint Stock Company «Taganrog Scientific-Research Institute of Communication», Taganrog, Russian Federation

Korotkova Lyudmila N.

Cand. Sci. Chem., Associate Professor, Assistant Professor of Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Kretuk Denis A.

Cand. Sci. Tech., Senior Lecturer of Power Supply (of Ground-Based Space Infrastructure) Department, Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education «The Mozhaisky Military Space Academy» of the Ministry of Defense of Russian Federation, Saint-Petersburg, Russian Federation

Kubryak Aleksandr I.

4th Year Student of Automated Technology and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

Le Van Tung

Postgraduate Student of Electricity and Electromechanics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint-Petersburg Mining University», Saint-Petersburg, Russian Federation

Likhachev Evgeny A.

Senior Lecturer of Information and Measuring Techniques Department of the Faculty of Avionics, Energy and Info-Communications, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», Ufa, Russian Federation

Martyasheva Valentina A.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Water Supply and Drainage Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Mashtanov Nikolay M.

Student of Automated Technology and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

Menshenin Ivan S.

Cadet of Group of Electromechanics Specialty, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kamchatka State Technical University», Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

Muraveva Elena A.

Dr. Sci. Tech., Professor of Automated Technology and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

Samarov Evgeny K.

Cand. Sci. Tech., Dean of the Faculty of Information and Communication Systems and Technologies, State Budgetary Educational Institution of Higher Education of Moscow Region «University of Technology, Korolev, Russian Federation

Sharipov Marsel I.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Automated Technology and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

Shulaeva Ekaterina A.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Automated Technology and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

Shutkova Svetlana A.

Cand. Sci. Chem., Assistant Professor of Power System and Physics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», Ufa, Russian Federation

Shuvaeva Alena O.

Assistant of Machines and Equipment Theory Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kamchatka State Technical University», Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

Soloviev Aleksey V.

Lecturer of Power Supply (of Ground-Based Space Infrastructure) Department, Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education «The Mozhaisky Military Space Academy» of the Ministry of Defense of Russian Federation, Saint-Petersburg, Russian Federation

Urakseev Marat A.

Dr. Sci. Tech., Professor, Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Vavilov Viacheslav E.

Cand. Sci. Tech., Associated Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», Ufa, 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 Drainage Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Yanbekov Emil R.

Undergraduate Student of Digital Technologies in Oil and Gas Field Development and Operation Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Zaytseva Alina A.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Information and Measuring Techniques Department of the Faculty of Avionics, Energy and Info-Communications, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», Ufa, Russian Federation

Zikiy Anatoliy N.

Cand. Sci. Tech., Senior Researcher, Assistant Professor of Information Security of Telecommunication Systems Department, Institute of Computer Technologies and Information Security, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», Taganrog, Russian Federation

Zlaman Pavel N.

Leading Design Engineer, Scientific Design Bureau of Modeling and Control Systems, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», Taganrog, Russian Federation

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 работы, 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.