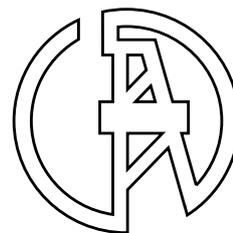


# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УГНТУ

№ 4, т. 15, 2019

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

## Учредитель

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

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

Международный стандартный серийный номер ISSN 1999-5458.

## Редакционная коллегия:

### 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. А. Мухамадиев

**Технический редактор:** С. В. Халитова

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

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

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

© Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2019.

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

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

Цена свободная. 12+

Подписано в печать 09.12.2019 г. Формат 60×84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,27.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 205.

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

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

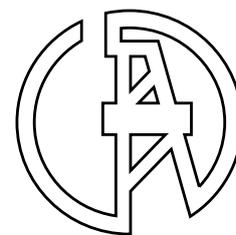
Материалы приводятся в авторской редакции.

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

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

# ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE PETROLEUM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY



USPTU

№ 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. A. Mukhamadiev

Technical editor: S. V. Khalitova

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

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

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

© Ufa State Petroleum Technological University, 2019.

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

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

Price is free. 12+

Publishing authorized on 09.12.2019. Paper format 60×84/8. Offset printing. 16.27 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 205.

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

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

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

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

# СОДЕРЖАНИЕ

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Кушнин В.Г., Кошкин И.В., Грязнова Е.Д.</i> Моделирование режимов электрической сети с учетом влияния переходного сопротивления на точность определения места повреждения в сетях напряжением 6-35 кВ	5
<i>Аухадеев А.Э., Литвиненко Р.С., Киснеева Л.Н., Тухбатуллина Д.И.</i> К вопросу о развитии теории тягового электрооборудования городского электрического транспорта	12
<i>Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б.</i> Исследование температуры поверхности солнечных модулей с использованием голографической защиты от перегрева	19
<i>Шуваева А.О., Труднев С.Ю.</i> Моделирование источника автономной катодной защиты	30
<i>Герасимов В.Е., Дмитриев А.А., Малышева Н.Н.</i> Разработка концепции энергоэффективного управления системами промышленного электрообогрева нефтегазовых промыслов	39
<i>Ахметшин Р.С., Пичугин П.И.</i> Влияние взаимоиндукции в некоторых вопросах работы и эксплуатации электрооборудования и электрических сетей	48
<i>Галимова А.А.</i> Методика расчета относительного срока службы трансформатора в распределительных сетях на этапе проектирования	56
<i>Решетняк М.Ю.</i> Исследование гармонического состава в электрических сетях поверхностного комплекса высокопроизводительных угольных шахт	61
<i>Герасименко А.А., Пузырев Е.В.</i> Программная реализация детерминированной и статистической методики расчёта потерь электроэнергии и учёта множества режимов электрической сети	68
<i>Хазиева Р.Т., Иванов М.Д.</i> Математическая модель колебательной механической системы	74
<i>Шабанов В.А., Хакимов Э.Ф., Калимгулов А.Р., Сергеенкова Е.В.</i> Исследование зависимости КПД электродвигателя и преобразователя частоты от коэффициента загрузки и частоты вращения	83

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Казанцев В.П., Даденков Д.А., Понослова Л.В.</i> Следящая система управления электроприводами сеточной части бумагоделательной машины	91
<i>Дорофеев Р.С., Дорофеев А.С.</i> Применение авторской системы поддержки принятия решений «квалиметрическая экспертиза» для оценки биологических объектов	99
<i>Шулаева Е.А., Маиштанов Н.М., Иванов А.Н.</i> Моделирование ртутного электролизера для получения каустической соды с применением нейронной сети	107
<i>Самаров Е.К.</i> Сравнительный анализ алгоритмов сжатия изображений	114

## НАНОЭЛЕКТРОНИКА И КВАНТОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

<i>Доломатов М.Ю., Шуткова С.А., Бахтизин Р.З., Шарипов Т.И., Рыжиков О.Л., Гильманишина К.А.</i> Исследование донорно-акцепторных свойств аморфных полупроводников на основе нанокластеров нефтяных асфальтенов	121
<b>Об авторах</b>	128
<b>Список статей, изданных в 2019 году</b>	136

# CONTENT

## ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Kushnir V.G., Koshkin I.V., Gryaznova E.D.</i> Modeling of electric network modes taking into account the influence of transient resistance on the accuracy of determining the fault location in 6–35 kV networks	5
<i>Auhadeev A.E., Litvinenko R.S., Kisneeva L.N., Tukhbatullina D.I.</i> About theory of traction electric equipment of urban electric transport	12
<i>Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B.</i> Investigation of surface temperature of solar modules using holographic overheating protection	19
<i>Shuvaeva A.O., Trudnev S.Yu.</i> Simulation of autonomous cathodic protection source	30
<i>Gerasimov V.E., Dmitriev A.A., Malysheva N.N.</i> Concept development of energy-efficient management of industrial electric heating systems for oil and gas fields	39
<i>Ahmetshin R.S., Pichugin P.I.</i> Mutual induction influence on specific terms of electrical equipment and electrical circuits use and operation	48
<i>Galimova A.A.</i> Calculation method of transformer relative service life in distribution networks at the design stage	56
<i>Reshetnyak M.Yu.</i> Harmonic composition study in electrical networks of surface complex of high-performance coal mine	61
<i>Gerasimenko A.A., Puzyrev E.V.</i> Software implementation of deterministic and statistical methods for calculating power losses and accounting for multiple modes of electric network	68
<i>Khazieva R.T., Ivanov M.D.</i> Simplified mathematical model of the oscillating mechanical system	74
<i>Shabanov V.A., Khakimov E.F., Kalimgulov A.R., Sergeenkova E.V.</i> Research of dependence of electric motor efficiency and frequency converter on loading rate and rotation frequency	83

## DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Kazantsev V.P., Dadenkov D.A., Ponosova L.V.</i> Electric servo drive system of paper machine	91
<i>Dorofeev R.S., Dorofeev A.S.</i> Application of the author's decision support system «qualimetric expertise» for biological objects assessment	99
<i>Shulaeva E.A., Mashtanov N.M., Ivanov A.N.</i> Modeling of the mercury electrolytic cell to obtain caustic soda using a neural network	107
<i>Samarov E.K.</i> Comparative analysis of image compression algorithms	114

## NANOELECTRONICS AND QUANTUM DATA SYSTEMS

<i>Dolomatov M.Yu., Shutkova S.A., Bakhtizin R.Z., Sharipov T.I., Ryzhikov O.L., Gilmanshina K.A.</i> Research of amorphous semiconductors donor and acceptor properties on oil asphaltene nanoclusters basis	121
<b>About the authors</b>	128
<b>List of articles published in 2019</b>	136



**Кушнир В. Г.**  
**Kushnir V. G.**

*доктор технических наук,  
профессор, проректор,  
Костанайский  
государственный  
университет  
имени А. Байтурсынова,  
г. Костанай,  
Республика Казахстан*



**Кошкин И. В.**  
**Koshkin I. V.**

*кандидат технических наук,  
доцент,  
заведующий кафедрой  
электроэнергетики и  
физики,  
Костанайский  
государственный  
университет  
имени А. Байтурсынова,  
г. Костанай,  
Республика Казахстан*



**Грязнова Е. Д.**  
**Gryaznova Ye. D.**

*магистрант,  
Костанайский  
государственный  
университет  
имени А. Байтурсынова,  
г. Костанай,  
Республика Казахстан*

УДК 621.311.001

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-5-11

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-35 КВ**

Существенную часть в инфраструктуре передачи и распределения электрической энергии занимают электрические сети, класс напряжения которых 6-35 кВ. При их эксплуатации зачастую происходят аварийные перебои в энергообеспечении, в результате чего необходимо проведение профилактических и ремонтных работ. Основным типом аварийной ситуации в сетях рассматриваемого класса напряжения являются однофазные замыкания на землю, составляющие примерно 70–80 % от всего количества происходящих повреждений. Однако точность отыскания места повреждения при однофазном замыкании на землю в настоящее время находится не на высоком уровне. Это связано с тем, что в Республике Казахстан нейтраль трансформаторов в распределительных сетях напряжением 6–35 кВ заземляется с применением дугогасящего реактора или вовсе изолирована.

Несмотря на возможность работы сети в режиме повреждения на землю данный ненормальный режим представляет опасность по следующим причинам: возможность появления перенапряжения, приводящего к пробое изоляции неповрежденных фаз и переходу однофазного замыкания на землю в многоместное повреждение; существует опасность поражения людей и животных электрическим током; происходит старение изоляции и повреждение электрооборудования при длительном однофазном замыкании на землю в сети.

От точности отыскания места повреждения однофазного замыкания на землю зависит уровень недоотпуска электроэнергии потребителям, значит, и материальные потери энергопередающих организаций. Для повышения точности определения места повреждения необходимо учитывать воздействие переходных процессов на величину тока замыкания на землю. Внутреннее воздействие на величину тока однофазного замыкания на землю оказывает уровень переходного сопротивления, возникающего на месте аварии.

В данной статье проведено исследование влияния величины переходного сопротивления на расстояние до места повреждения посредством моделирования реально существующей сети.

**Ключевые слова:** воздушная линия электропередачи, определение места повреждения, точность, однофазное замыкание на землю, переходное сопротивление, емкостный ток.

## MODELING OF ELECTRIC NETWORK MODES TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF TRANSIENT RESISTANCE ON THE ACCURACY OF DETERMINING THE FAULT LOCATION IN 6-35 KV NETWORKS

A significant part of the electric energy transmission and distribution infrastructure is occupied by electric networks with a voltage of 6-35 kV, during the operation of which emergency power outages often occur, as a result of which preventive and repair work is necessary. The main type of damage in the networks of this voltage class are single-phase earth faults, accounting for approximately 70–80 % of the damage total number. However, the accuracy of determining the damage place during a single-phase earth fault is currently not at a high level. This is due to the fact that in the Republic of Kazakhstan the transformers neutral, in distribution networks with a voltage of 6-35 kV, is grounded using an arcing reactor or completely isolated.

Despite the possibility of the network operating in single-phase earth fault mode, this abnormal mode is dangerous for reasons: the possibility of overvoltage, which can lead to a breakdown of the intact phases insulation and the transition of a single-phase earth fault to a multi-position short circuit; there is a electric shock danger to people and animals; aging of the insulation and damage to electrical equipment occurs during long-term single-phase earth fault in the network.

The level of electricity undersupply to consumers, and hence the material losses of energy-transmitting organizations, depends on the accuracy of determining the location of a single-phase earth fault. To improve the accuracy of determining the location of damage, it is necessary to take into account the effect of transients on the value of the earth fault current. A significant influence on the magnitude of the current of a single-phase earth fault is exerted by the magnitude of the transition resistance at the fault location.

In this article, we study the influence of the magnitude of the transition resistance on the distance to the damage site, by modeling a real existing network.

**Key words:** overhead power line, determination of the location of damage, accuracy, single-phase earth fault, transient resistance, capacitive current.

### *Введение*

В большинстве случаев при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ) в сетях напряжением 6–35 кВ присутствует переходное сопротивление в месте повреждения [1, 2]. Переходное сопротивление — это параметр, возникающий в момент перехода тока с одной поверхности на другую. Значительную роль рассматриваемое сопротивление оказывает исключительно на воздушные линии электропередачи. При ОЗЗ переходное сопротивление, в основном, имеет активный характер, воздействуя на переходные величины данного режима [3].

Переходное сопротивление при обрыве провода на землю воздействует непосредственно на величину тока однофазного замыкания посредством предмета, с которым провод соприкасается (снег, лед, опавшие ветки, листья, деревья). Погодные условия, величина удельного сопротивления грунта,

материал предмета, с которым соприкасается упавший провод, — все эти составляющие воздействуют на величину рассматриваемого сопротивления [4]. Экспериментальным путем было определено, что при обрыве провода в летний период на невлажный грунт переходное сопротивление в месте аварии принимает значения в диапазоне от 5 до 7 кОм. В зимний период переходное сопротивление в случае обрыва провода на обледенелую или заснеженную поверхность увеличивается примерно в 2 раза. Таким образом, становится очевидным, что величина рассматриваемого сопротивления способна оказать внушительную погрешность в точность определения места повреждения (ОМП) [5].

Целью проведения исследования характера воздействия переходного сопротивления на величину тока ОЗЗ является определение вида переходного процесса в энергосистеме, а также собственной частоты и времени затух-

хания, которые необходимы для распознавания места повреждения линии электропередачи.

Для моделирования и создания различных режимов сети в настоящее время широко применяются современные программные средства. Благодаря рассматриваемым программным комплексам можно варьировать режимы работы сети в реальном времени, записывать преобразования электрических величин, анализировать воздействие на выходную величину всевозможных физических процессов [6].

Формирование модели электрической сети включает в себя следующие этапы.

1. Формирование главной схемы рассматриваемой сети посредством определения следующих параметров: количество и величина мощности потребителей, включая места их подключения к сети; значения длин линий электропередачи; величину сечений проводов; режимы нейтралей сети.

2. Составление схемы замещения исследуемой сети, используя главную схему.

3. Нахождение необходимых параметров линий электропередачи, потребителей, а также источника энергоснабжения по техническим справочникам и каталогам.

4. Перенос схемы замещения в программу для моделирования сети с найденными параметрами.

Для анализа параметров электрических величин в номинальном и аварийном режимах применяется сформированная в программной среде модель энергосистемы. В таком случае становится возможным схематично представить переходные процессы в энергосистеме, проанализировать характер изменения токов, частоты, а также напряжений. Для исследования характера воздействия переходного сопротивления на размер тока ОЗЗ был выбран программный комплекс

«Автоматизированное рабочее место службы релейной защиты и автоматики» (АРМ СРЗА). АРМ СРЗА — это современное программное обеспечение, созданное специально для расчетов величины токов и напряжений в случае аварийных режимов в энергосистеме, различных режимов работы энергосистемы, уставок устройств релейной защиты.

Программа АРМ СРЗА включает в себя такие приложения, как графический корректор, используемый для схем замещения моделируемой энергосистемы; программа формирования документа коррекции; программа определения параметров различных величин в случае ненормальной работы энергосистемы; программа вычисления токов, а также напряжений короткого замыкания; программа для определения эквивалентов энергосистемы; программа для отыскания места повреждения; программа формирования новейшей сети, используя эквиваленты.

*Моделирование электрической сети с учетом влияния переходного сопротивления на точность ОМП*

Модель исследуемой энергосистемы формировалась в приложении «Графический корректор» комплекса АРМ СРЗА.

Формировать математическую модель исследуемой сети в рассматриваемом корректоре возможно посредством двух способов:

- вычерчивая сеть сразу на экране персонального компьютера;
- устанавливая параметры электрической сети, применяя записи в таблице.

В качестве исследуемой сети были выбраны линии 10 кВ подстанции «220/110/10 Центральная». Параметры моделируемых линий электропередачи сведены в таблицу 1.

**Таблица 1.** Параметры линий электропередачи 10 кВ

Наименование линии	Марка провода (кабеля)	Длина, км	Емкостное сопротивление $x_c$ Ом	Емкостный ток $I_c$ А
EnergyGas	АС-95/16	4,1	210892,13	0,0517
Диевская	АС-95/16	2,72	308128,49	0,0415
Космис	АС-120	3,5	184877,06	0,0529
РП-2-2	АС-120	2,8	231096,32	0,0472

На рисунке 1 представлена схема замещения сети 10 кВ подстанции электрическая (ПС) «Центральная», смоделированная в программном комплексе АРМ СРЗА.

Режим ОЗЗ фазы «А» в сети с изолированной нейтралью моделируется в приложении «Определение электрических величин при

повреждениях сети», значения переходных сопротивлений  $R_{п}$ , подставляются в диалоговом окне данного приложения. Величины переходных сопротивлений устанавливаются от 1 до 400 Ом, применяя шаг 50 Ом. На рисунках 2–4 показаны графики тока замыкания на землю фазы А.

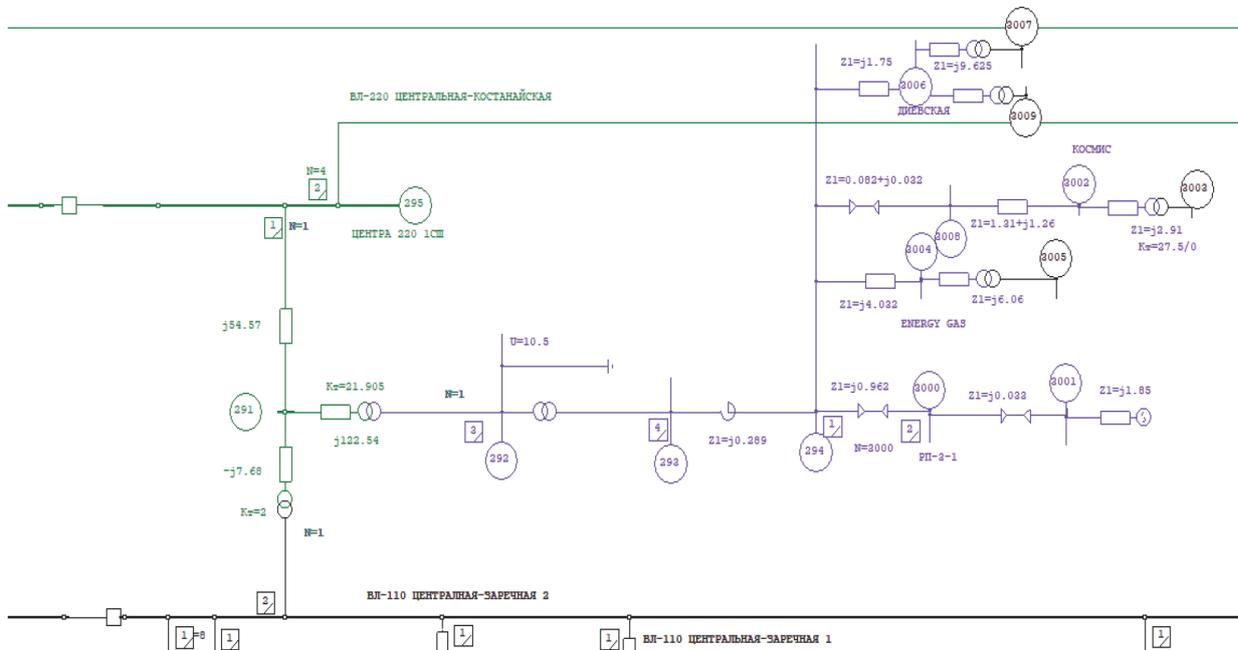


Рисунок 1. Схема замещения исследуемой сети

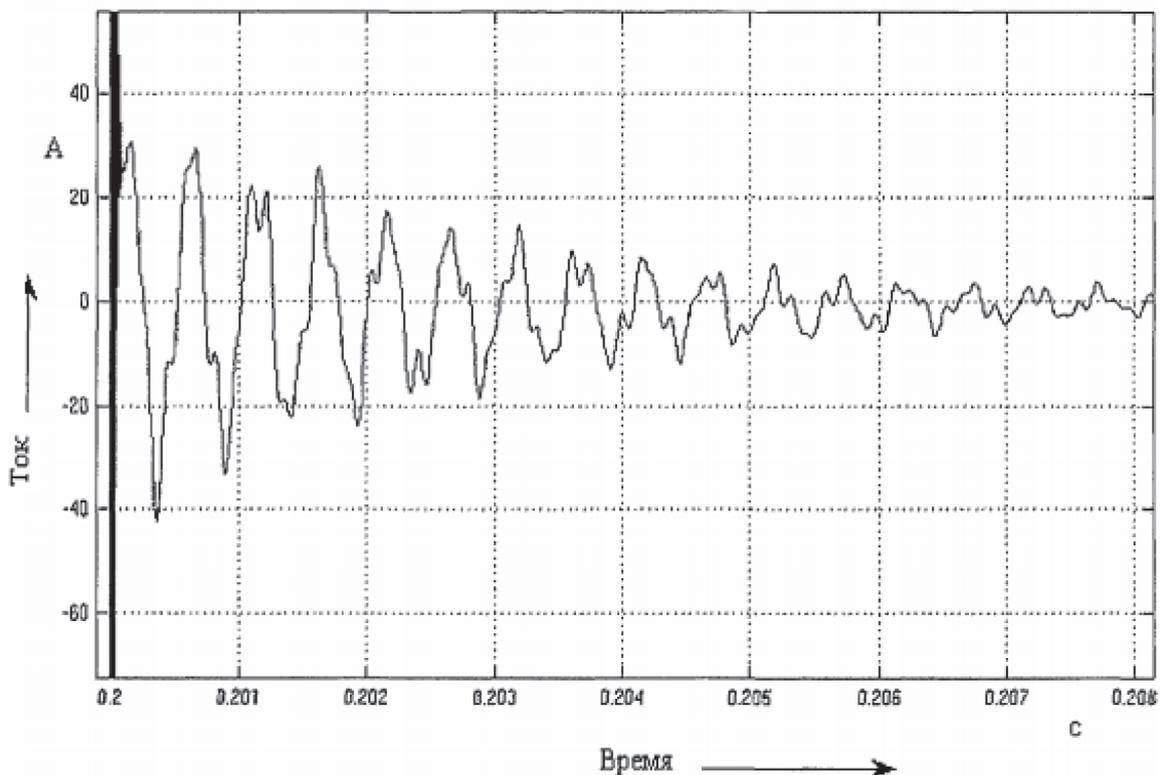


Рисунок 2. Ток ОЗЗ, начальная стадия переходного процесса

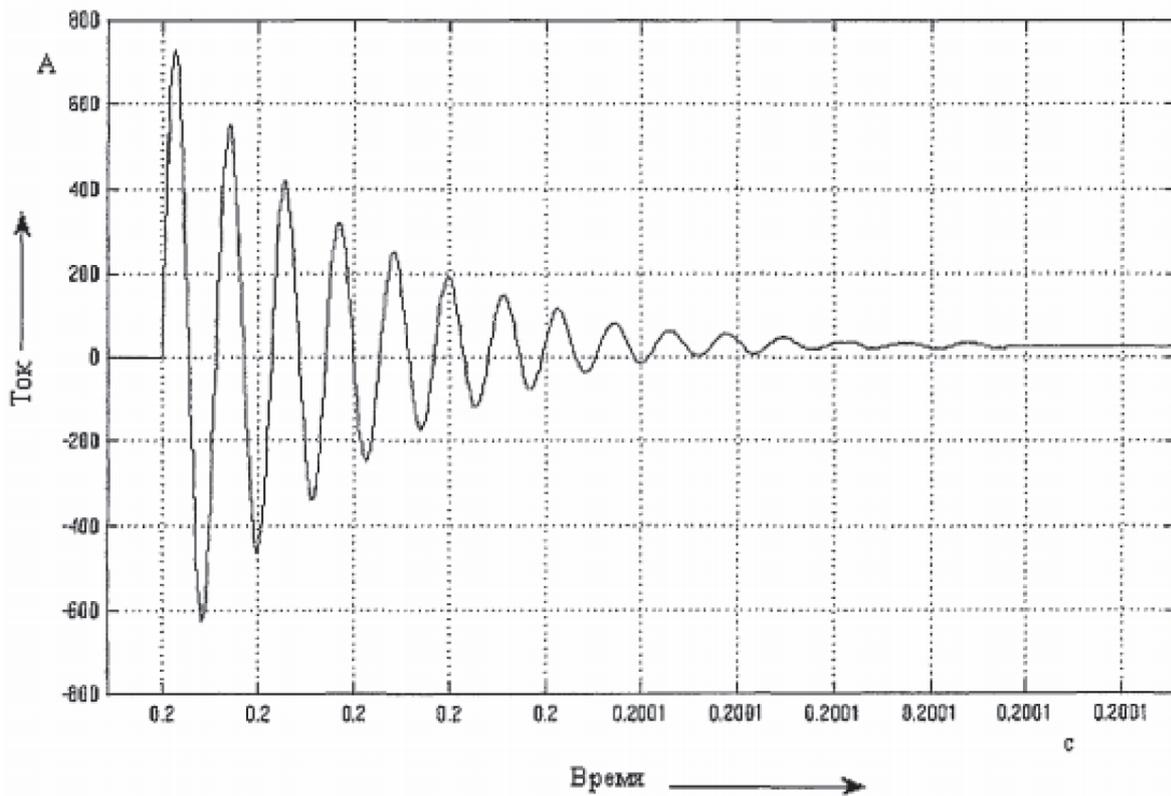


Рисунок 3. Ток ОЗЗ при  $R_n=1$  Ом

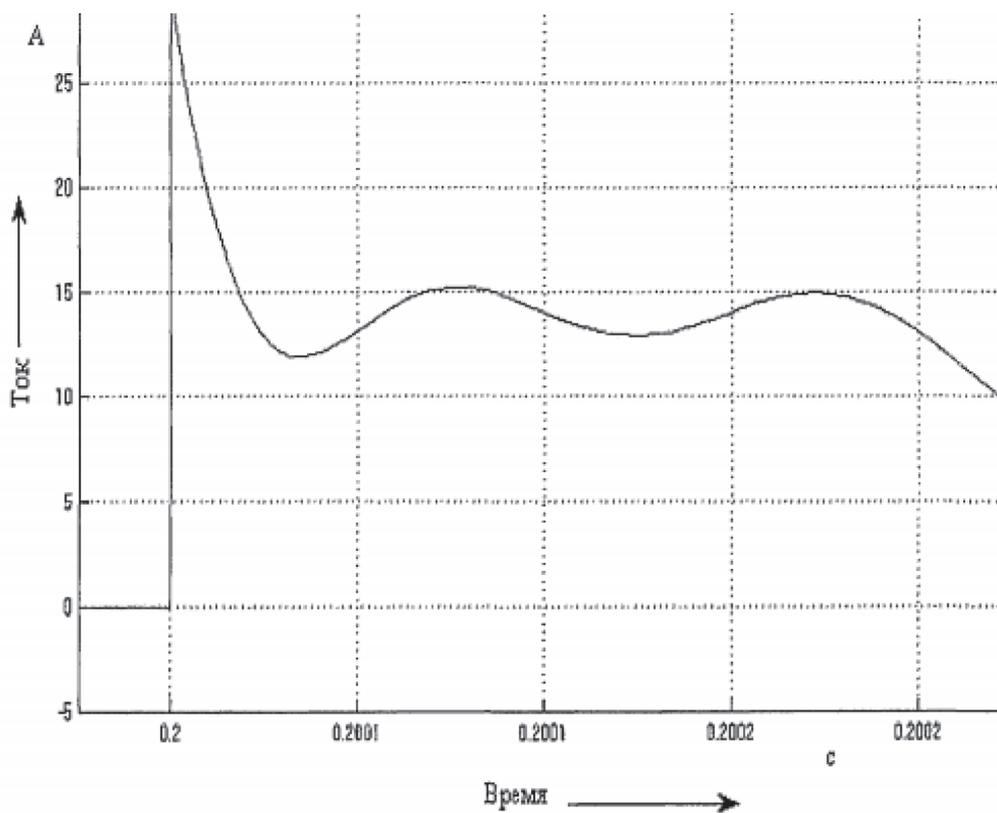


Рисунок 4. Ток ОЗЗ при  $R_n=400$  Ом

Исходя из проведенного моделирования однофазного замыкания на землю с добавлением переходного сопротивления, можно сделать следующий вывод:

— по причине повышения значения переходного сопротивления в месте однофазного замыкания на землю снижается амплитуда первого броска тока повреждения;

— уменьшается частота разрядного тока по причине увеличения активного сопротивления контура замыкания, при незначительном увеличении времени затухания;

— при снижении времени затухания переходного процесса частота тока подзаряда увеличивается.

Результаты исследований при  $R_{\Pi} > 1000 \text{ Ом}$  для ПС «Центральная» не приведены, причи-

ной тому является то, что значение тока однофазного замыкания на землю при данной величине переходного сопротивления имеет апериодический, быстро затухающий характер, длительностью менее 1 мкс.

На основании проведенного исследования составлен график зависимости величины тока ОЗЗ от значения переходного сопротивления (рисунок 5).



Рисунок 5. График зависимости тока ОЗЗ от величины переходного сопротивления

Исходя из данного графика можно сделать вывод, что ток однофазного замыкания на землю при больших значениях переходных сопротивлений имеет незначительную величину. Таким образом, погрешность ОМП, в случае игнорирования  $R_{\Pi}$  может иметь значительные последствия.

#### Выводы

В результате исследования посредством моделирования режима однофазного замыкания на землю с добавлением величины переходного сопротивления схематически видно,

какое значительное воздействие переходное сопротивление способно оказывать на значение тока однофазного замыкания на землю.

Применяя разработанную модель энергосистемы 10 кВ и программные обеспечения, можно осуществлять фиксирование возникновения замыкания на землю с переходным сопротивлением. Результаты исследования можно использовать для повышения точности, чувствительности, а также избирательности алгоритмов ОМП распределительных сетей напряжением 6–35 кВ.

#### Список литературы

1. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоатомиздат, 1982. 312 с.
2. Цапенко Е.Ф. Замыкание на землю в сетях 6-35 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1986. 128 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высш. шк., 1996. 638 с.

4. Айзенфельд А.И. Эффективность техники определения мест повреждения воздушных линий // Электрические станции. 1989. № 9. С. 77–79.
5. Кузнецов А.П. Определение мест повреждения на воздушных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 1989. 92 с.
6. Koshkin I., Kushnir V., Benyukh O. Simulation of 6 (10) kV Electrical Networks for Fault Location // International Conference on

Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017, Room of category CFP17F42-ART; code131476.

### References

1. Shalyt G.M. *Opredelenie mest povrezhdeniya v elektricheskikh setyakh* [Determination of Places of Damage in Electric Networks]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1982. 312 p.
2. Tsapenko E.F. *Zamykanie na zemlyu v setyakh 6–35 kV* [Earth Fault in the 6-35 kV Network]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 128 p.
3. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1996. 638 p.
4. Aizenfel'd A.I. Effektivnost' tekhniki opredeleniya mest povrezhdeniya vozdushnykh linii [The Effectiveness of the Technique for Determining the Location of Damage to Overhead Lines]. *Elektricheskie stantsii — Electric stations*, 1989, No. 9, pp. 77–79.
5. Kuznetsov A.P. *Opredelenie mest povrezhdeniya na vozdushnykh liniyakh elektroperedachi* [Determination of Places of Damage on Overhead Power Lines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 92 p.
6. Koshkin I., Kushnir V., Benyukh O. Simulation of 6 (10) kV Electrical Networks for Fault Location. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017, Room of category CFP17F42-ART; code131476*. 2017.



**Аухадеев А. Э.**  
**Aukhadiev A. E.**

*кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Электротехнические  
комплексы и системы»,  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный  
энергетический университет»,  
г. Казань, Российская Федерация*



**Литвиненко Р. С.**  
**Litvinenko R. S.**

*кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Электротехнические  
комплексы и системы»,  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный  
энергетический университет»,  
г. Казань, Российская Федерация*



**Киснеева Л. Н.**  
**Kisneeva L. N.**

*старший преподаватель кафедры  
«Электротехнические комплексы и  
системы»,  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный  
энергетический университет»,  
г. Казань, Российская Федерация*



**Тухбатуллина Д. И.**  
**Tukhbatullina D. I.**

*студент кафедры «Электротехнические  
комплексы и системы»,  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный  
энергетический университет»,  
г. Казань, Российская Федерация*

УДК 621.313

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-12-18

## **К ВОПРОСУ О РАЗВИТИИ ТЕОРИИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА**

На современном городском электрическом транспорте (ГЭТ) для реализации управляемого механического движения широко применяется автоматизированный тяговый электропривод, повышение энергетической эффективности работы которого является актуальной научной проблемой, имеющей важное народно-хозяйственное значение. Реализация режимов работы входящего в состав электропривода тягового электрооборудования (ТЭО) происходит автоматизированно, посредством косвенной системы управления. При этом режимы работы ТЭО, обеспечивающие реализацию электрической тяги (ЭТ), взаимосвязаны с режимами движения электроподвижного состава (ЭПС), которые формируются водителем посредством реализации предписанных режимной картой алгоритмов переключения позиций контроллера управления. Практика показывает, что опытные водители способны реализовать рациональные режимы работы ТЭО, обеспечивающие режимы движения ЭПС, позволяющие экономить свыше 10% электроэнергии по сравнению с полученными в результате расчетов и рекомендованными к исполнению

режимной картой. Это доказывает, что существующие теория и методы расчета рациональных режимов работы ТЭО не обеспечивают достаточный уровень адекватности при реальных условиях эксплуатации ГЭТ, что связано с высокой сложностью происходящих процессов и отсутствием достаточно проработанной методологии их интерпретации в отраслевой теории. Цель исследования – изучение процесса преобразования электрической энергии в целенаправленное механическое перемещение ЭПС при реализации всех технологических условий производственно-технической системы ГЭТ для подтверждения научной гипотезы о том, что режимы работы ТЭО формируются под воздействием сложноорганизованного технологического процесса ЭТ и являются топологической основой его структуры. Результатом теоретического исследования, выполненного на основе методологического анализа теории ТЭО, теории автоматического управления и автоматизированного электропривода, теории ЭТ, теории построения движения, системного подхода и синергетической парадигмы, является сформулированная научная концепция (теоретическая система), идентифицирующая процесс ЭТ как систему, состоящую из пяти уровней, находящихся в иерархических отношениях и решающих каждый отдельную специфическую задачу построения движения электрического транспорта. Полученная теоретическая система позволит развить общую теорию тягового электрооборудования ГЭТ путем совершенствования ее методологических основ и может найти практическое применение при разработке методов расчета рациональных режимов работы ТЭО ГЭТ.

**Ключевые слова:** тяговое электрооборудование, городской электрический транспорт, электрическая тяга, построение движения, системный подход, синергетическая естественнонаучная парадигма.

## ABOUT THEORY OF TRACTION ELECTRIC EQUIPMENT OF URBAN ELECTRIC TRANSPORT

Automated traction electric drive is widely used for implementation controlled mechanical movement on the modern urban electric transport (UET), increase energy efficiency which is the actual scientific problem which has important national economic significance. Implementation of operating modes of the traction electrical equipment (TEE) which is a part of the electric drive happens automatically by the indirect control system. Herewith the operating modes of TEE which provide implementation of electrical traction (ET) are interconnected with movement modes of the electric rolling stock (ERS) which are formed by driver by means of the implementation of the prescribed mode map of algorithms switching controller positions. Practice shows that experienced drivers can realize the rational operating modes of TEE which are provide movement modes of ERS which are allowed to save over 10 % electrical energy compared to the result of calculation and recommended for execution by the mode map. It proves that existing theory and calculation methods of rational operating modes of TEE don't provide sufficient level of adequacy under real operating conditions of UET that connected with high complication of ongoing processes and the lack of a sufficiently elaborated methodology of their interpretation in branch theory. The purpose of the study was researching the process of transformation electrical energy in purposeful mechanical movement of ERS with the implementation of all technological conditions of production and technical system of UET for confirmation the scientific hypothesis about that operating modes of TEE are formed under the influence of highly organized process ET and are topological basis of its structure. The result of theoretical research which was made based on methodological analysis of the TEE theory, of the automatic control and automated electric drive theory, of the ET theory, of the motion building theory, systems approach and synergistic paradigm is formulated scientific concept (theoretical system), identifying process ET as a system which consist of five levels being in hierarchical relationships and each of which solve the specific problem of motion building of electric transport. The resulting theoretical system will allow the development of the general traction electrical equipment theory of UET by improving its methodological foundations and can find practical application in the development of calculation methods of the rational operating modes of TEE of UET.

**Key words:** traction electrical equipment, urban electric transport, electric traction, motion building, systems approach, synergistic science paradigm.

### *Введение*

Развитие представлений об особенностях формирования режима работы тягового электрооборудования (ТЭО) электроподвижного состава (ЭПС), об архитектуре взаимодействий с другими техническими, технологическими и производственными процессами, характеризующими реализацию электрической тяги (ЭТ), способствует решению актуальной научной проблемы повышения эффективности работы автоматизированного тягового электропривода в системе городского электрического транспорта (ГЭТ). Вопросы теории ТЭО, связанные с расчетом технологических режимов его работы, лежат в предметной области теории ЭТ. Это позволяет предположить, что совершенствование основополагающих представлений о принципах формирования ЭТ как процесса преобразования электрической энергии в целенаправленное механическое движение ЭПС при реализации всех технологических условий производственно-технической системы ГЭТ может являться методологической основой развития теории и методов расчета рациональных режимов работы ТЭО. Для этого авторами впервые сформулирована основанная на системном подходе и синергетической методологии научная концепция интерпретации ЭТ как открытого сложноорганизованного процесса, топологической основой многоуровневой конфигурации которого являются реализации режимов работы ТЭО в составе автоматизированного электропривода [1, 2].

#### *Научная концепция о построении процесса электрической тяги*

Основной идеей предложенной научной концепции (теоретической системы) является интерпретация технологического процесса ЭТ, основной задачей которого является целенаправленное механическое движение ЭПС, реализуемое ТЭО в составе автоматизированного тягового электропривода как совокупности иерархически выстроенных уровней (подпроцессов). Для идентификации этих уровней использовалась теория «построения движения», нашедшей применение в робототехнике и мехатронике [3]. В соответствии с этой теорией реализация управляемого движения объектов или систем различной при-

роды, в том числе и технических, осуществляется посредством его «построения». При этом построение движения происходит в общем случае по 5 уровням («А», «В», «С», «D», «Е»), которые называются «уровнями построения движения» [3].

На основании данной теории уровни построения движения ЭПС ГЭТ при реализации ЭТ могут быть идентифицированы следующим образом.

Первый *уровень А* — особый уровень построения движений, на котором движение как таковое отсутствует, но при этом происходят процессы, связанные с подготовкой к движению, т.е. ресурсное обеспечения процесса движения ЭПС ГЭТ.

Второй *уровень В* — уровень построения движений в собственных координатах системы (конкретного ЭПС), т.е. пространственная, временная и силовая координации механической работы ТЭО в составе автоматизированного тягового электропривода.

Третий *уровень С* — уровень построения движений в окружающем предметном пространстве, т.е. пространственная, временная и силовая координации управляемого механического перемещения ЭПС в условиях маршрута движения (план и профиль пути и др.).

Четвертый *уровень D* — уровень построения движений системы при взаимодействии с предметами окружающего пространства, обусловленном представлениями об их качествах и свойствах взаимных отношений (основанных на объективном мониторинге параметров измерительными инструментальными средствами), т.е. реализация целенаправленного механического перемещения ЭПС в условиях технологии перевозочного процесса (межпоездной интервал, время хода и др.)

Пятый *уровень E* — уровень построения движений системы при взаимодействии с предметами окружающего пространства, основанном на приобретенных знаниях об их качествах и свойствах взаимных отношений, т.е. реализация «идеализированного» движения ЭПС, удовлетворяющего основным прогнозным параметрам задачи производственного процесса ГЭТ, формируемым системой организационного управления.

Уровни построения движения выстраиваются в соответствии с иерархией решаемых специфических задач. При этом задачи решаются параллельно, для каждого уровня непрерывно формируются вышестоящим и управляют нижестоящим уровнем, подчиняются условиям задачи общего процесса механического движения ЭПС.

Рассмотренный выше процесс движения ЭПС можно условно представить как «механическую» составляющую процесса ЭТ. Очевидно, что присутствует и «электротехническая» составляющая, которая определяет процессы преобразования электрической энергии, формирования электрических режимов ТЭО, взаимодействия с энергетической системой, другими ЭПС и т.д. Эти процессы также имеют четкую иерархическую структуру и, в общем случае, могут быть представлены 5-ю уровнями построения системы ЭТ (как на постоянном, так и на переменном токе) [4]. Реальный технологический процесс ЭТ невозможно разделить на составляющие, но проведенный анализ позволяет сделать выводы, что основной процесс также представляет собой систему уровней, связанных иерархической подчиненностью. При этом одним из основных условий реализации процесса ЭТ в открытой сложноорганизованной системе ГЭТ является обмен энергетическими RE (электрическая, тепловая, механическая энергия и др.), материальными RM (в том числе финансовыми и кадровыми) и информационными RI ресурсами между уровнями и внешней средой [2]. В синергетической методологии при описании открытых сложноорганизованных систем и процессов используется определение «информации» как «меры Порядка», в противовес понятию «энтропии» как «меры Хаоса» [5]. Под обменом RI будем понимать любые взаимодействия, приводящие к «повышению Порядка» процессов и системы в целом. Это могут быть ограничения, условия и требования («параметры Порядка») к протекающим процессам и явлениям, выражающиеся в регламентах, инструкциях, нормах и др. [5].

Таким образом, сформулируем научную концепцию (теоретическую систему) о

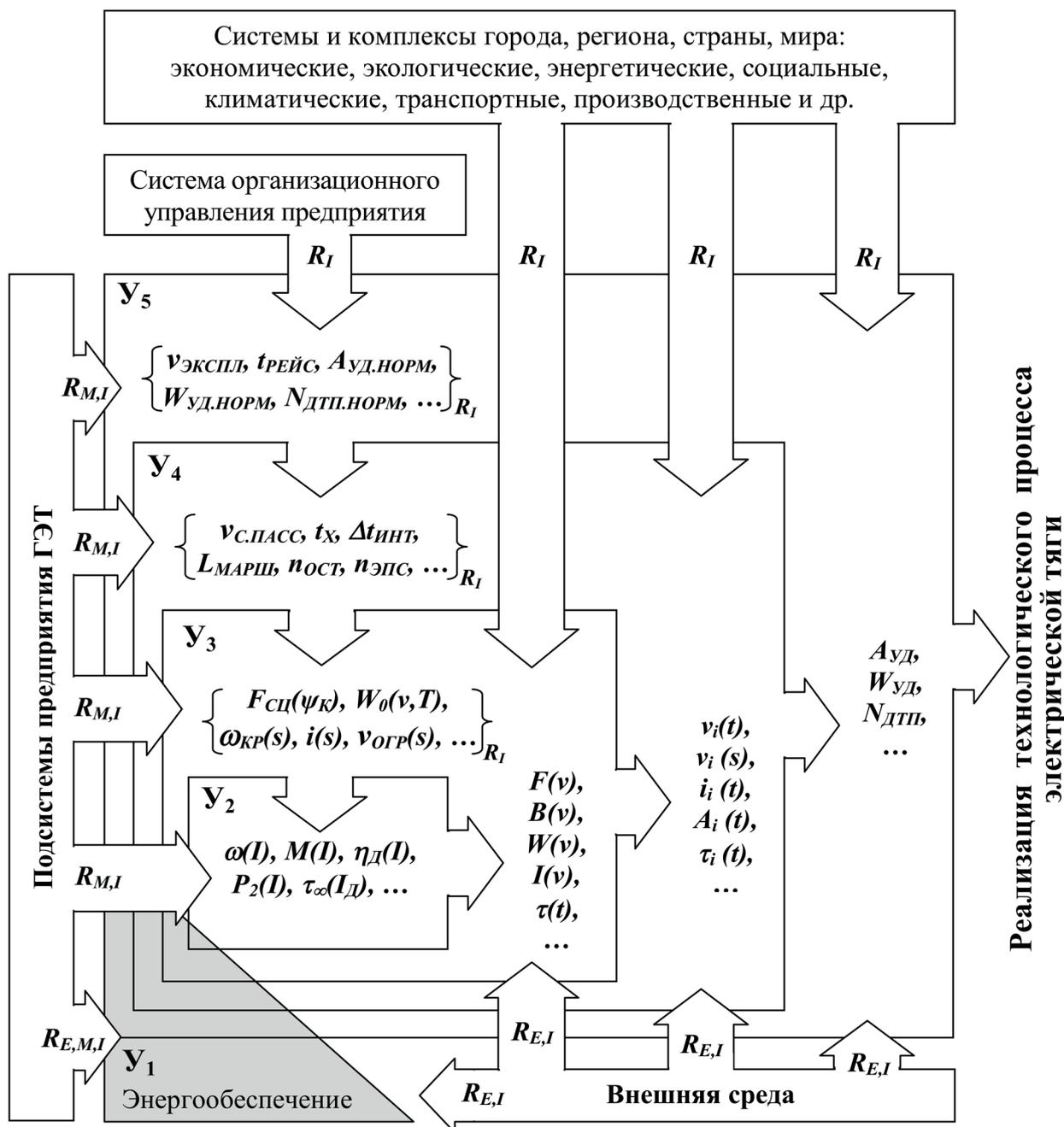
построении процесса ЭТ в виде дидактической (от древнегреческого слова διδακτικός, что означает «объясняющий») схемы, представленной на рисунке 1.

Основная задача первого *уровня энергетического обеспечения* ( $У_1$ ) — надежное и стабильное энергообеспечение всего процесса ЭТ. Очевидно, что это обеспечивается посредством системы тягового электроснабжения ГЭТ, связанной с энергосистемой города, являющейся по отношению к процессу ЭТ проявлением влияния внешней среды ( $R_E$ ). Надежность работы системы тягового электроснабжения обеспечивается эффективным материально-техническим обеспечением ( $R_M$ ) и регламентируется нормативно-правовыми актами ( $R_I$ ). Примем, что обмены  $R_M$ ,  $R_I$  проходят на всех уровнях построения ЭТ, и далее рассматривать их не будем.

Второй *уровень реализации работы тягового электрооборудования* ( $У_2$ ) обеспечивает реализацию ЭТ на этапе формирования характеристик ТЭО (угловая скорость вращения вала ТЭД  $\omega(I)$ , момент ТЭД  $M(I)$ , коэффициент полезного действия ТЭД  $\eta_D(I)$ , мощность  $P_2(I)$ , постоянная времени нагревания  $\tau_{\infty}(ID)$  и др.), однозначно определяемых еще на этапе проектирования и реализуемых в автоматизированном режиме алгоритмами косвенной системы управления.

Если условно подвесить ЭПС на тросах и реализовывать одинаковые алгоритмы управления, то формируемые тяговые и тормозные режимы работы ТЭО будут идентичные, т.е. на уровне  $У_2$  решается конкретная специфическая задача, которая в случае отсутствия «задающего» множества  $\{R_I\}$  с уровня  $У_3$  реализует запроектированные режимы ЭТ.

Если ЭПС установить на рельсы, то возникает внешняя сила сцепления  $F_{СЦ}(\psi_K)$ , которая в теории тяги определяет касательную силу тяги  $F_K$ . Появление  $F_{СЦ}$  определяет «переход» на следующий уровень  $У_3$ , характеризующийся взаимодействием ЭПС с окружающим пространством и его элементами. Взаимодействие с внешней средой задает условия (множество  $\{R_I\}$ ) для уровня  $У_2$ , (основное сопротивление движению  $\omega_0(v)$ , сопротивление от кривых  $\omega_{кр}(s)$ , сопротивле-



Y<sub>1</sub> – Y<sub>5</sub> — уровни построения процесса электрической тяги; R<sub>M,E,I</sub> — обмен соответственно материальными, энергетическими и информационными ресурсами

Рисунок 1. Теоретическая система построения процесса электрической тяги

ния от уклонов  $i(s)$  и др.), являющихся дополнительными «параметрами порядка» [5].

Третий уровень управляемого движения ЭПС (Y<sub>3</sub>) формирует управляемое механическое движение ЭПС, необходимое для перемещения по участку пути (с конкретными характеристиками) при воздействии определенных внешних воздействий (климатические, погодные и др.). На данном уровне формируются алгоритмы построения ЭТ при движении ЭПС по отдельным участкам (прямой участок, с уклоном, при различ-

ном уровне загрузки ЭПС и т.д.) или их комбинаций. При этом очевидно, что для каждого участка движения алгоритмы работы ТЭО ЭПС (уровень Y<sub>2</sub>) реализуются идентично, формируя с учетом «параметров Порядка» (RI) характеристики уровня Y<sub>3</sub>, (тяговая характеристика ЭПС  $F(v)$ , тормозная характеристика ЭПС  $B(v)$ , зависимости тока ТЭО от скорости  $I(v)$  и др.). Управляемая ЭТ на уровне Y<sub>3</sub> еще не является целенаправленной, т.е. реализуемой по условиям технологии поездной работы (с учетом времени хода

$t_x$ , межпоездного интервала  $\Delta t_{\text{инт}}$ , средней ходовой скорости  $v_{x_{\text{ср}}}$ , количество ЭПС на маршруте  $n_{\text{ЭПС}}$ , ограничения скорости  $v_{\text{огр}}$  и др.), формируемым множеством  $\{R_1\}$  на уровне  $U_4$ .

Четвертый уровень реализации технологического процесса ГЭТ ( $U_4$ ) обеспечивает формирование целенаправленной ЭТ, соответствующей технологическим условиям поездной работы и выстраиваемой путем реализации задач на уровнях  $U_1 - U_3$ . Характеристиками ЭТ на уровне  $U_4$  являются кривые движения  $v(t)$ ,  $v(s)$ , кривые потребления тока  $i(t)$ , кривые нагревания ТЭДт(t) и др. для конкретных условий поездной работы.

Пятый уровень реализации производственного процесса ГЭТ ( $U_5$ ) формирует ЭТ в соответствии с задачами производственного процесса ГЭТ, которые определяются набором инструкций, регламентов, правил и норм, определяющих «параметры Порядка» ( $R_1$ ) уровня  $U_5$  (средняя эксплуатационная скорость ЭПС  $v_{\text{ЭКСПЛ}}$ , норма на удельный расход электроэнергии  $A_{\text{уд,норм}}$ , норма на количество перевезенных пассажиров  $W_{\text{уд,норм}}$ , количество дорожно-транспортных происшествий  $N_{\text{ДТП,норм}}$  и др.). Такое множество  $\{R_1\}$ , формируемое системой организационного управления предприятием, а также системами более высокого по отношению к ГЭТ уровня (экономические, экологические, энергетические, социальные и др. системы города, региона, страны и т.д.), определяет характеристики реализации ЭТ на уровне  $U_5$  (величина удельного расхода электроэнергии на тягу  $A_{\text{уд}}$ , количество перевезенных пассажиров  $W_{\text{уд}}$  и др.). Реализуемые характеристики отличаются от значения «параметров Порядка», но стремятся к ним, формируя процесс ЭТ, соответствующий стратегическим задачам производственного процесса ГЭТ.

### Выводы

Показано, что ЭТ является сложным многоуровневым процессом, в основе которого

лежит преобразование электрической энергии в механическое движения ЭПС согласно технологии перевозочного процесса производственно-технической системы ГЭТ. Реализация процесса ЭТ, или, как предлагают авторы, его построение, происходит по иерархически выстроенным уровням (подпроцессам), каждый из которых решает определенную специфическую задачу. Каждый уровень, находясь в иерархическом подчинении вышестоящего и получая от него и от «внешней среды» условия для решения собственной задачи, формирует условия реализации для нижестоящего уровня. При этом каждый нижестоящий уровень формирует основу реализации подпроцесса вышестоящего уровня. Таким образом, реализуется непрерывное взаимодействие между уровнями и внешней средой, выражающееся в потоках энергетических, материальных и информационных ресурсов, что является, согласно современному синергетическому мировоззрению, обязательным условием существования сложных динамических систем и процессов.

Методологически важным является подтверждение того, что режимы работы ТЭО являются основой процесса ЭТ, т.к. они формируются на уровне  $U_2$ , реализующем преобразование электрической энергии в механическую, на котором, в соответствии с предложенной теоретической системой (рисунок 1), основывается построение остальных уровней, определяющих технологию производственного процесса ГЭТ.

Представленные в статье теоретические исследования позволят развить общую теорию ТЭО ГЭТ, а также усовершенствовать методы расчета рациональных режимов его работы, что будет способствовать решению важной научной и актуальной практической проблемы повышения эффективности использования электрической энергии в системе ГЭТ.

### Список литературы

1. Рылов Ю.А., Аухадеев А.Э., Мукимов А.Х., Каримов В.И. Реализация электрической тяги в производственно-технической

системе городского электрического транспорта // Современные научные исследования и разработки. 2017. № 8 (16). С. 487–491.

2. Аухадеев А.Э. Литвиненко Р.С., Рылов Ю.А. Городской электрический транспорт с позиций синергетической методологии // Мир транспорта и технологических машин. 2018. № 1 (60). С. 67–73.

3. Платонов А.К. О построении движений в баллистике и мехатронике // Прикладная механика и управление движением. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010. С. 127–222.

4. Сопов В.И., Щуров. Н.И. Системы электроснабжения электрического транспорта на постоянном токе. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. 728 с.

5. Хакен Г. Синергетика: Пер. с англ. / Пер. В.И. Емельянова. М.: Мир, 1980. 423 с.

### References

1. Rylov Yu.A., Aukhadeev A.E., Mukimov A.Kh., Karimov V.I. Realizatsiya elektricheskoi tyagi v proizvodstvenno-tekhnicheskoi sisteme gorodskogo elektricheskogo transporta [Realization of Electric Traction in the Production and Technical System of Urban Electric Transport]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki — Modern Scientific Research and Development*, 2017, No. 8 (16), pp. 487–491. [in Russian].

2. Aukhadeev A.E. Litvinenko R.S., Rylov Yu.A. Gorodskoi elektricheskii transport s pozitsii sinergeticheskoi metodologii [Urban Electric Transport from the Point of View of Synergetic Methodology]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin — World of Transport and Technological Machines*, 2018, No. 1 (60), pp. 67–73. [in Russian].

3. Platonov A.K. O postroenii dvizhenii v ballistike i mekhatronike [On the Construction of Movements in Ballistics and Mechatronics]. *Prikladnaya mekhanika i upravlenie dvizheniem — Applied Mechanics and Motion Control*. Moscow: IPM im. M.V. Keldysha, 2010, pp. 127–222. [in Russian].

4. Sopov V.I., Shchurov. N.I. *Sistemy elektrosnabzheniya elektricheskogo transporta na postoyannom toke* [Power Supply Systems of Electric Transport on Direct Current]. Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2013. 728 p. [in Russian].

5. Khaken G. *Sinergetika: Per. s angl. / Per. V.I. Emel'yanova* [Synergetics: Transl. from Engl. / Transl. V.I. Emelyanov]. Moscow, Mir Publ., 1980. 423 p. [in Russian].



**Кирпичникова И. М.**  
**Kirpichnikova I. M.**

*доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Электрические  
станции, сети и системы  
электрооборудования»,  
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский  
государственный университет»,  
г. Челябинск, Российская Федерация*



**Махсумов И. Б.**  
**Maksumov I. B.**

*аспирант кафедры «Электрические  
станции, сети и системы  
электрооборудования»,  
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский  
государственный университет»,  
г. Челябинск, Российская Федерация*

УДК 621.311.243

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-19-29

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕГРЕВА

В статье приведен анализ способов определения температуры поверхности солнечных модулей для мониторинга их состояния, перегрева и обнаружения неисправностей, определен метод визуализации инфракрасного изображения как наиболее эффективный для проведения экспериментальных исследований, показаны его преимущества по сравнению с другими рассмотренными методами.

Экспериментальные исследования по определению температуры солнечных модулей, результаты которых представлены в статье, были проведены в условиях Республики Таджикистан, для которой характерны высокие летние температуры воздуха, и, соответственно, серьезно стоят вопросы надежности работы модулей. Показано, что перегрев модулей сопровождается их быстрой деградацией и снижением выработки электроэнергии. Для определения температуры нагрева на передней и задней поверхностях солнечного модуля использовался метод инфракрасной визуализации с применением инфракрасного термометра типа ScanTemp 490. Для снижения нагрева предложено использовать голографическую пленку, наклеенную на всю воспринимающую поверхность модуля. Параметры, снимаемые в ходе эксперимента, сравнивались по значениям эффективности двух модулей: с пленкой, нанесенной на всю поверхность модуля, и без пленки.

Результаты исследования показали, что температура нагрева модуля при использовании пленки снижается, при этом вырабатываемая мощность модуля становится выше. Установлено, что температура нагрева поверхности модуля и выработка мощности зависят от температуры окружающей среды и от влажности воздуха в течение суток. Определялись фактические значения тока, напряжения и мощности для двух экспериментальных модулей. Установлено, что изменения значений тока и напряжения подчиняются закону поступления солнечной радиации на поверхность принимающей площадки, при этом и ток, и напряжение на модуле с пленкой выше, чем на модуле с открытой поверхностью.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что предлагаемый метод снижения перегрева модулей может иметь значительный эффект при использовании его на большем количестве модулей, например, на солнечных электростанциях.

**Ключевые слова:** нагрев солнечного модуля, тепловизионный метод изображения, точка максимальной мощности, голографическая пленка.

## INVESTIGATION OF SURFACE TEMPERATURE OF SOLAR MODULES USING HOLOGRAPHIC OVERHEATING PROTECTION

The article provides an analysis of methods for determining the solar modules surface temperature to monitor its condition, overheating and detecting malfunctions, identifies an infrared image visualization method as the most effective for conducting experimental studies, and shows its advantages compared to other methods considered. Experimental studies to determine the solar modules temperature, the results of which are presented in the article, were carried out in the Republic of Tajikistan, which is characterized by high summer air temperatures and, accordingly, the reliability of the modules is seriously raised. It is shown that modules overheating is accompanied by their rapid degradation and a decrease in power generation. To determine the heating temperature on the solar module front and rear surfaces, the infrared imaging method using an infrared ScanTemp 490 type thermometer was used. To reduce the heating, it was proposed to use a holographic film glued to the entire sensing surface of the module. The parameters taken during the experiment were compared in terms of the two modules efficiency: with a film deposited on the module entire surface and without a film. The study results showed that the module heating temperature when using the film decreases, while the module generated power becomes higher. It was found that the temperature of the module surface heating and power generation depends on the ambient temperature and on air humidity during the day. The actual values of current, voltage and power for two experimental modules were determined. It was established that the change in the values of current and voltage obeys the law of the arrival of solar radiation on the surface of the receiving site, while the current and voltage on the module with the film are higher than on the module with the open surface. The results obtained allow us to conclude that the proposed method for reducing the overheating of modules can have a significant effect when used on a larger number of modules, for example, solar power plants.

**Key words:** solar module heating, thermal imaging method, maximum power point, holographic film.

### *Введение*

Температура фотоэлектрического модуля является одним из ключевых параметров, который должен быть точно определен, для того, чтобы оценить мощность фотоэлектрической системы на проектном уровне. Выработка фотоэлектрического модуля значительно уменьшается с увеличением температуры, и, наоборот, снижение температуры на каждые  $5^{\circ}\text{C}$  может привести к повышению прогнозируемой выходной мощности постоянного тока на 2,25 %, что может быть значительным для больших солнечных систем [1]. Стандартные условия испытания (СУИ) (STC — Standard Test Conditions) для модулей производительностью  $1 \text{ кВт/м}^2$  проводятся для температуры их эксплуатации  $25^{\circ}\text{C}$  [2]. Однако на открытом воздухе в условиях окружающей среды модуль, как правило, работает при более высокой температуре.

Летом, когда температура окружающей среды повышается, реальная выработка модуля уменьшается по сравнению со значе-

ниями, указанными в электрических параметрах производителя [3]. Для оценки производительности при мониторинге номинальной рабочей температуры ячейки (НРТЯ) (NOCT — Normal Operating Cell Temperature) фотоэлектрического модуля в летний период необходимо определить температуру поверхности солнечного модуля перед эксплуатацией. Значение НРТЯ имеет большее значение для получения наибольшей эффективности работы фотоэлектрического модуля при его работе в точке максимальной мощности на вольт-амперной характеристике [4]. Температура модуля также является важной характеристикой и при определении степени деградации фотоэлектрического модуля [5, 6]. Следовательно, рабочая температура фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) должна быть определена с максимальной возможной точностью.

Обзор литературы показывает, что основные параметры, которые необходимо определять (температура фотоэлемента ( $T_{cm}$ ), температура окружающей среды ( $T_{oc}$ ), солнечное

облучение, локальная скорость ветра и др.) находятся в различных взаимосвязях и непостоянны во времени [7]. Это вызывает определенную трудность при исследовании, и особенно это касается температуры полупроводникового фотоэлемента в области *p-n*-перехода.

Один из методов определения температуры солнечного модуля заключается в использовании датчика температуры RTD при закреплении его на задней поверхности модуля перед герметизацией [8, 9].

Недостаток этого метода заключается в том, что он не дает среднюю температуру модуля, поскольку ячейки, в которых расположены температурные датчики, не представляют общую картину распределения температуры панели. Другая проблема состоит в том, что температура, заданная этим способом, может значительно отличаться от фактической средней температуры фотоэлектрического модуля из-за капсулирования (герметизации) фотоэлементов. Например, относительный температурный коэффициент мощности для модулей кристаллического кремния обычно составляет  $-0,45 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ ; следовательно, если измеренная температура задней части модуля ниже  $7^\circ\text{C}$ , ожидаемая выходная мощность постоянного тока будет завышена примерно на  $3,2 \text{ \%}$ , что является значительным показателем для больших фотоэлектрических систем.

Другой метод определения температуры при работе фотоэлемента включает использование нормальной рабочей температуры ячейки, определяемой по стандартным условиям испытаний солнечных модулей НРТЯ (NOCT). Этот метод предназначен для модулей, установленных на открытой местности под углом падения солнечного света  $45^\circ$  и в фиксированных условиях (излучение  $800 \text{ Вт}/\text{м}^2$ , температура ячейки  $45^\circ\text{C}$ , температура воздуха  $20^\circ\text{C}$ , скорость ветра  $1 \text{ м}/\text{с}$ , монтаж: открытая задняя сторона модуля). Однако, поскольку значение освещенности и температуры изменяется практически в каждый момент времени в условиях окружающей среды, использование НРТЯ (NOCT) может не дать точности результатов [10, 11].

Для мониторинга состояния фотоэлектрического модуля, перегрева и обнаружения неисправностей, таких как трещины и повреждения в солнечной панели, используется метод визуализации инфракрасного изображения (ИК-изображения) [12–14].

Данный метод имеет следующие преимущества по сравнению с ранее рассмотренными.

1. Он дает среднюю температуру фотоэлектрического модуля с учетом температуры каждой ячейки фотоэлектрической панели и, следовательно, является более точным по сравнению с методом измерения температуры в дискретном месте.

2. Поскольку метод дает температуру фотоэлектрического модуля в момент, когда было снято ИК-изображение, изменяющиеся условия и параметры окружающей среды не влияют на расчеты.

3. Это неинвазивный метод, который можно использовать в различных условиях окружающей среды и при различных способах установки модулей.

Кроме того, метод тепловизионного измерения температуры может использоваться для отслеживания точки максимальной мощности путем определения напряжения и мощности по температуре, измеряемой в режиме реального времени в рабочем состоянии [15–21].

#### *Описание эксперимента*

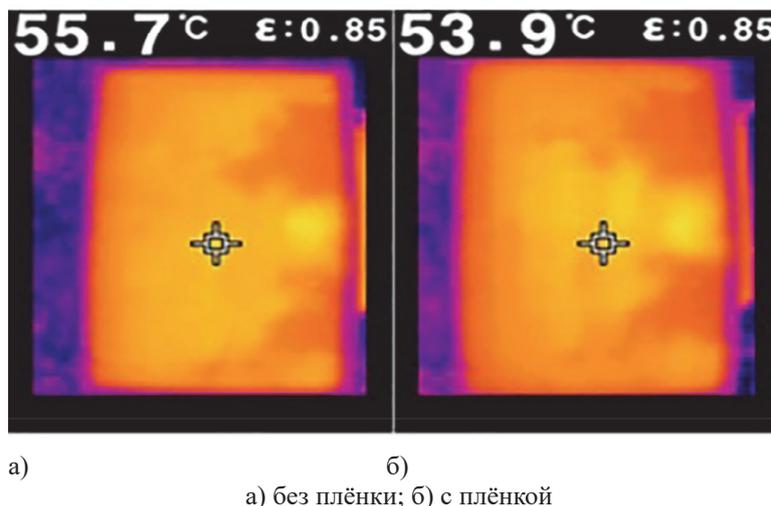
Авторами были проведены экспериментальные исследования нагрева поверхности солнечных модулей в условиях Республики Таджикистан, для которой характерны высокие летние температуры воздуха и, соответственно, серьезно стоят вопросы надежности работы модулей [22].

Исследование температуры производилось с помощью инфракрасного термометра (ScanTemp 490) с двухточечным лазером, позволяющим бесконтактным методом измерить температуру поверхности объектов с разрешением  $0,1^\circ\text{C}$ . Для измерения температуры и влажности воздуха внешней среды использовались термометр и смартфон с функциями выхода в интернет. Для снижения действия инфракрасной составляющей спектра солнечного излучения на одном из моду-

лей была использована голографическая пленка, другой модуль оставался открытым для прямых солнечных лучей в течение эксперимента.

Голографическая плёнка имеет свойство отражения инфракрасной части солнечного спектра, падающего на модуль, вследствие чего его поверхность меньше нагревается.

На рисунке 1 показаны инфракрасные изображения солнечных модулей с пленкой, закрывающей всю поверхность модуля (рисунок 1, а) и без плёнки (рисунок 1, б), на которых видно, что температура поверхности модуля с пленкой почти на 2 °С меньше температуры модуля без пленки.



**Рисунок 1.** Инфракрасные изображения солнечного модуля

Для того чтобы оценить эффективность использования таких пленок, необходимо определить выработку электроэнергии обоими модулями. В данном эксперименте были использованы приборы и оборудова-

ние, указанные в таблице 1. Технические характеристики солнечных модулей и инфракрасного термометра приведены в таблицах 2 и 3.

**Таблица 1.** Приборы и оборудование, используемые в экспериментах

№ п/п	Наименование приборов	Модель	Количество шт.
1	Монокристаллический солнечный модуль	Delta battery 24-100 MONO	2
2	Лампа накаливания	12V/45/40W	2
3	Цифровой мультиметр	CHY Victor VC890D	2
4	Голографическая плёнка	—	2 вида
5	Инфракрасный термометр с 2-точечным лазером	ScanTemp 490	1
6	Термометр с функцией измерения влажности воздуха	TH90	1
7	Смартфон с выходом в интернет	ONE PLUS 7	1

**Таблица 2.** Технические характеристики фотоэлектрического модуля типа Delta SM 100-24M производства Delta battery при стандартных условиях испытаний СУИ (STC) (25 °С, 1000 Вт/м<sup>2</sup>)

№ п/п	Наименование параметров	Обозначение	Значение параметров
1	Пиковая электрическая мощность	$P_{max}$	100 Вт
2	Напряжение в точке максимальной мощности	$U_{mp}$	18,78 В
3	Ток в точке максимальной мощности	$I_{mp}$	5,34 А
4	Ток короткого замыкания	$I_{sc}$	5,70 А
5	Напряжение холостого хода	$U_{oc}$	22,64 В
6	Температурный коэффициент по току	$K_I$	0,040 % / °С
7	Температурный коэффициент по напряжению	$K_U$	-0,380 % / °С
8	КПД фотоэлектрического модуля	$\eta$	17,96 %
9	Размер	Д×Ш×В	1470×670×35 мм
10	Стандартные условия испытаний	(STC)	1.000W / м <sup>2</sup> ; AM 1,5; 25 +/-2 °С
11	Количество ячеек	(9×4)	36

**Таблица 3.** Технические характеристики инфракрасного термометра типа ScanTemp 490

№	Наименование параметров	Обозначение	Значение параметров
1	Оптическое разрешение		50: 1
2	Температурный диапазон	$T_{диап}$	-60 °С ... + 1000 °С
3	Разрешение дисплея		0,1 °С (выше 1000 °С 1 °С)
4	Точность		± 2 °С
5	Рабочая температура	$T_{раб}$	0 ... 50 °С
6	Коэффициент излучения	$K_{изл}$	от 0,10 до 1,00
7	Время отклика	$T_{отклик}$	1 с
8	Аккумулятор	$U_{ном}$	2×1,5 вольт ААА размер
9	Размер и вес	Д×Ш×В / грамм	215×145×45 мм / 1150 г

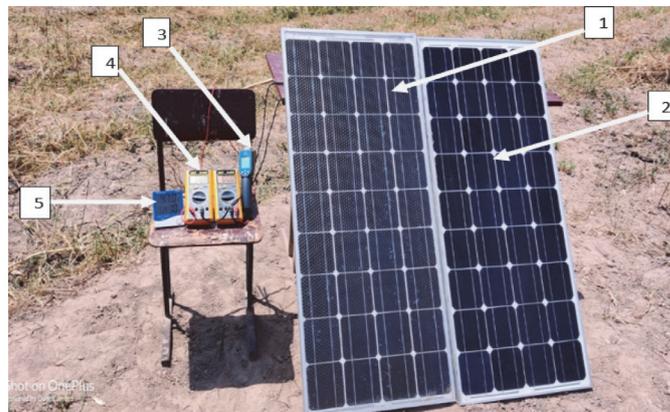
Для проведения исследований была собрана экспериментальная установка, вид которой показан на рисунке 2.

Эксперимент проводился в г. Курган-Тюбе (Республика Таджикистан) в июле, в самое жаркое летнее время года, 3 дня подряд, в период с 8:00 до 18:00.

Фотоэлектрические модули на основе монокристаллического кремния типа Ideal 20-100 MONO производства DELTA BATTERY были установлены под углом 45 °С к горизонту. Для измерения тока и напряжения использовались цифровые мультиметры типа

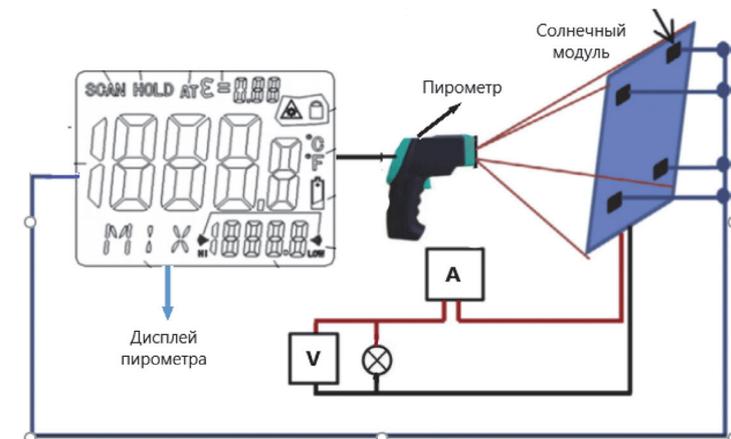
СНУ Victor VC890D. В качестве нагрузки непосредственно к модулям были подключены две лампы накаливания 12V/45/40W. С помощью пирометра измерялась температура на передней и задней поверхностях модулей, температура и влажность воздуха фиксировались термометром и со смартфона в режиме реального времени. Голографические пленки двух разных видов поочередно наклеивались на один из модулей.

Электрическая схема экспериментальной установки показана на рисунке 3.



1 — солнечный модуль с пленкой, 2 — модуль без пленки; 3 — инфракрасный термометр ScanTemp 490; 4 — цифровые мультиметры; 5 — термометр с функцией измерения влажности воздуха TH90

**Рисунок 2.** Внешний вид экспериментальной установки



**Рисунок 3.** Электрическая схема экспериментальной установки

Измерения проводились в течение трех дней с 8:00 до 18:00 с интервалом в 1 ч. По данным публикации ученых Центра инновационного развития науки и новых технологии Академии науки Республики Татарстан (ЦИРН и НТ) солнечная инсоляция для этого периода составляла 820 Вт/м<sup>2</sup> [8]. Скорость ветра, равная 1 м/с, и температура воздуха + 39 °С фиксировались термометром и смартфоном. Полученные данные сведены в таблицу 4 для сравнительного анализа и определения соответствующих характеристик.

Средние температура воздуха и температура поверхности модулей за три дня исследований рассчитывались по формуле:

$$T_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i (^\circ\text{C}), \quad (1)$$

где  $n$  — количество измерений;

$T_i$  — температура каждого часа.

Аналогичный расчет проводился для электрических параметров модулей. Результаты расчетов сведены в таблицу 4.

**Таблица 4.** Показатели температуры и выработки мощности солнечными модулями в условиях г. Курган-Тюбе, РТ

Дата и время измерения	Состояние погоды	Инсоляция, кВт•ч/м <sup>2</sup>	Скорость ветра, м/с	Влажность воздуха, %	Температура воздуха, °С	Температура поверхности модуля, °С	Температура задней поверхности модуля, °С	Вырабатываемый ток, мА	Вырабатываемое напряжение, В	Вырабатываемая мощность, Вт	Угол наклона модуля, °	
С пленкой												
25-26-07-2019	7:00	Ясно	0,20	2	41,75	27,6	43,25	46,4	26,25	7,76	0,2037	45
	8:00	Ясно		2	35,5	30,75	54	54,5	40,15	11,65	0,468	45
	9:00	Ясно	0,77	1	23,5	30	62,6	69,1	41	12,5	0,5125	45
	10:00	Ясно		1	18,25	37	67	68,8	43	12,75	0,5482	45
	11:00	Ясно	0,82	1	18	39,5	54	56	41	12,9	0,5289	45
	12:00	Ясно		1	18,75	40,5	53,8	57,75	40,4	13	0,5252	45
	13:00	Ясно	0,97	1	18	42,25	61,85	58	42	13	0,546	45
	14:00	Ясно		2	17,25	41,625	58,25	63,75	41,35	13	0,5375	45
	15:00	Ясно	0,74	2	13,25	40,7	66,9	69,7	40,35	12,85	0,5184	45
	16:00	Ясно		3	15	41,5	66,9	69,2	42	12	0,504	45
17:00	Ясно	0,59	3	15,5	40,75	56,6	57,2	33,7	8,6	0,2898	45	
18:00	Ясно		2	24,25	37,5	52	53,1	23	4	0,092	45	
Без пленки												
25-26-07-2019	7:00	Ясно	0,20	2	41,75	27,6	41,2	48,2	16,9	5,46	0,09227	45
	8:00	Ясно		2	35,5	30,75	50,4	51	27,2	9,3	0,2529	45
	9:00	Ясно	0,77	1	23,5	30	61,2	64,1	30,6	11,25	0,3442	45
	10:00	Ясно		1	18,25	37	63,4	65,45	32,2	12,25	0,3944	45
	11:00	Ясно	0,82	1	18	39,5	58,4	66,45	41	12,45	0,5104	45
	12:00	Ясно		1	18,75	40,5	48,95	63,7	35,7	12,55	0,4480	45
	13:00	Ясно	0,97	1	18	42,25	57,5	61,85	41,45	12,65	0,5243	45
	14:00	Ясно		2	17,25	41,625	59,4	66,7	41,1	12,5	0,5137	45
	15:00	Ясно	0,74	2	13,25	40,7	60,5	66,5	41,6	12,6	0,5241	45
	16:00	Ясно		3	15	41,5	62,55	72	41	12,5	0,5125	45
17:00	Ясно	0,59	3	15,5	40,75	51,45	65,6	36,2	9,9	0,3583	45	
18:00	Ясно		2	24,25	37,5	46,55	56,1	26,45	5,3	0,1401	45	

Фактические значения тока, напряжения и мощности фотоэлектрического модуля регистрировались как  $V_{MPP}$  и  $P_{MPP}$  (MPP: точка максимальной мощности). На основе полученных данных (таблица 4) были проведены анализ и сравнение по температуре и мощ-

ности фотоэлектрических модулей с пленкой и без нее.

Полученные результаты представлены на рисунках 4–6. Из характеристик видно, что изменения значений тока и напряжения подчиняются закону поступления солнечной

радиации на поверхность принимающей площадки, при этом и ток, и напряжение на

модуле с пленкой выше, чем на модуле с открытой поверхностью.

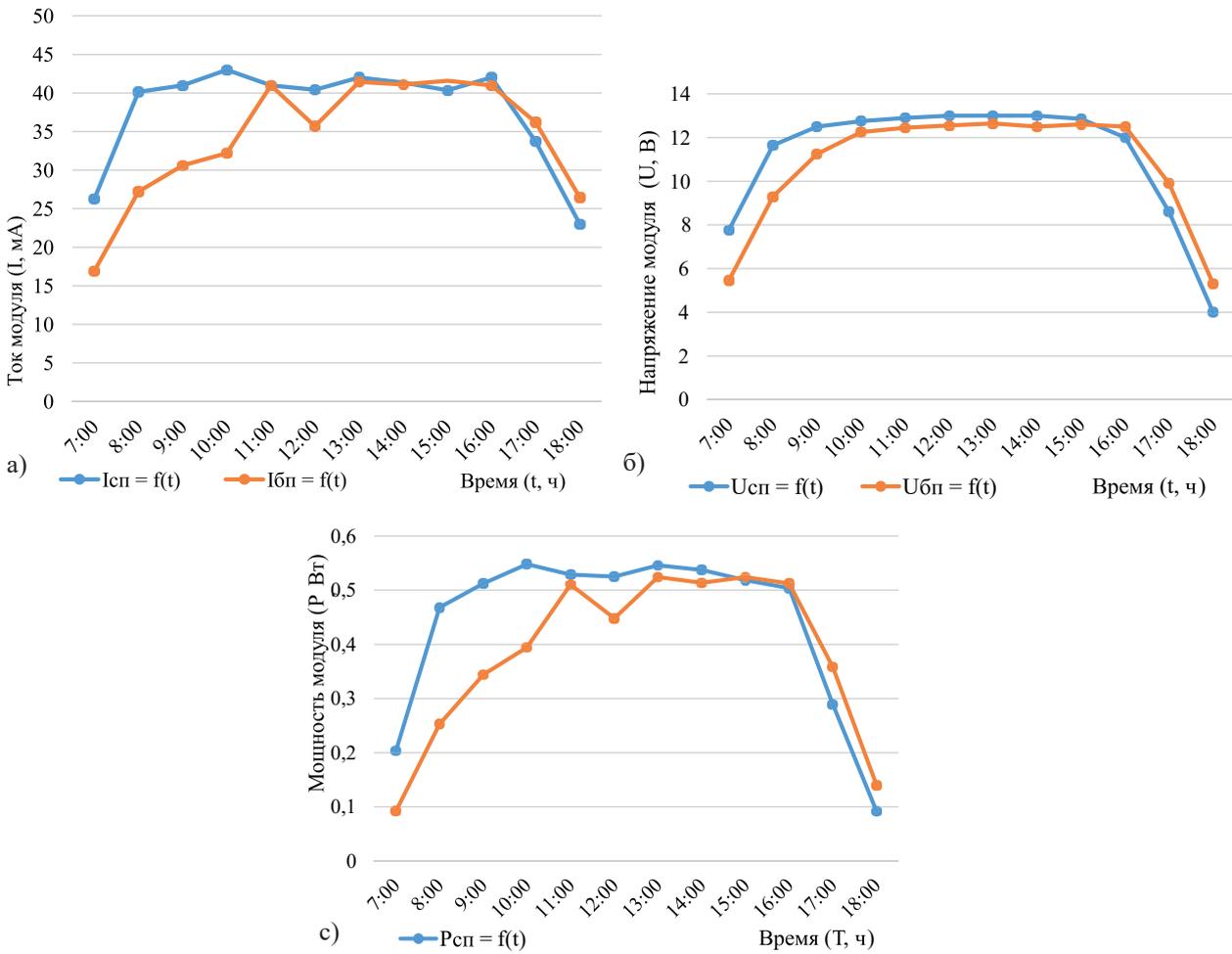


Рисунок 4. Зависимости изменения: тока  $I=f(t)$  (а); напряжения  $U=f(t)$  (б) и мощности  $P=f(t)$  (с) в течение светового дня

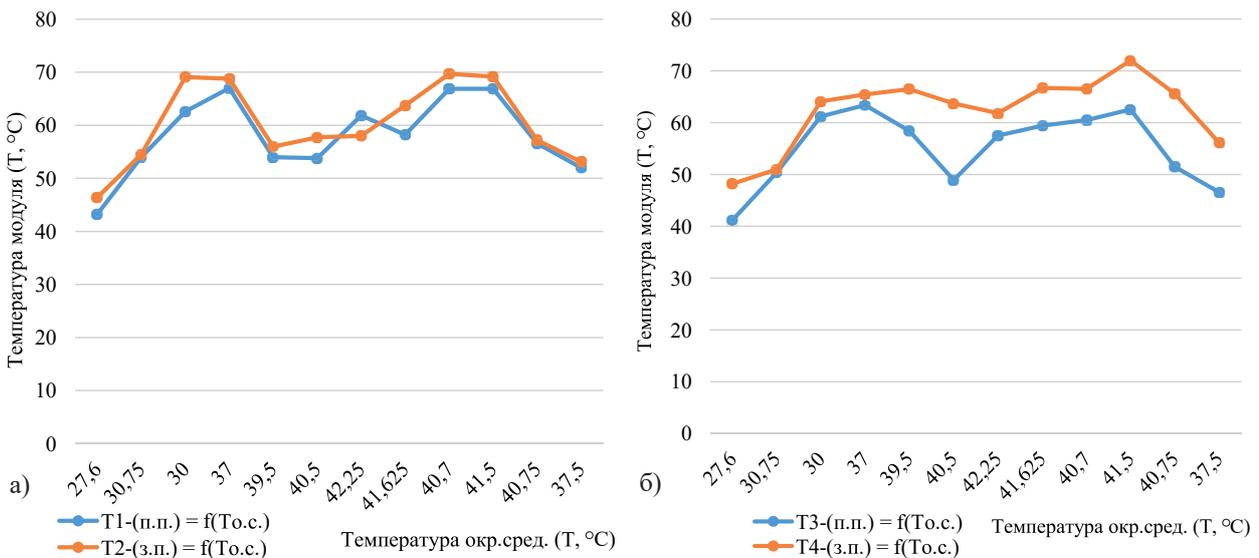
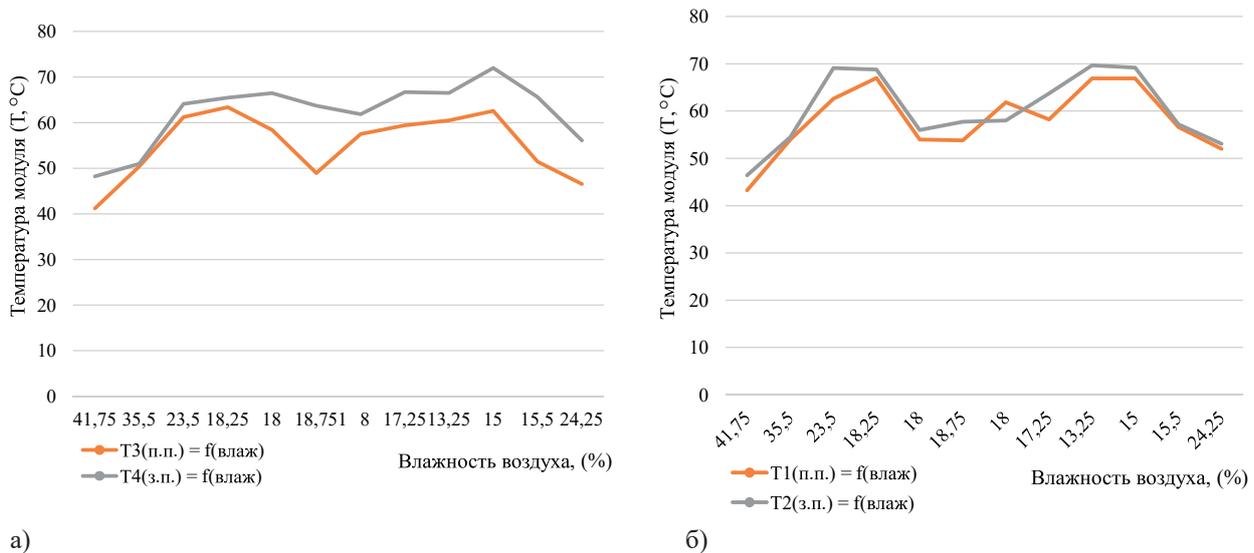


Рисунок 5. Зависимости температуры нагрева фотоэлектрических модулей передней и задней поверхности с пленкой  $T_{1,2}=f(T_{о.с.})$  (а) и без пленки  $T_{3,4}=f(T_{о.с.})$  (б) от температуры окружающей среды в течение дня



**Рисунок 6.** Зависимости температуры нагрева фотоэлектрических модулей передней и задней поверхности с пленкой  $T_{1,2}=f(\varphi)$  (а) и без пленки  $T_{3,4}=f(\varphi)$  (б) от влажности воздуха в течение дня

## Выводы

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования по нагреву солнечных модулей в условиях повышенных температур окружающей среды позволяют сделать следующие выводы.

1. Выходная мощность, генерируемая солнечной фотоэлектрической системой, во многом зависит от температуры нагрева поверхности солнечного модуля. В свою очередь, выходная мощность зависит от условий окружающей среды, таких как облачность, влажность, а также от широты и долготы местности, где будет установлен солнечный модуль.

2. Перегрев модулей ведет к их повышенной деградации. Деградация отрицательно влияет на срок службы модулей, в результате чего модули преждевременно выходят из строя.

## Список литературы

1. Skoplaki E., Palyvos J.A. On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: a Review of Efficiency/Power Correlations // *Solar Energy*. 2009. Vol. 83. P. 614–624.
2. Лист спецификации данных Delta Battery [Электронный ресурс]. URL: <https://eco50.ru/solnechnye-sistemy/solnechnye-batarei/solnechnaya-batareya-delta-sm-100-12m-100-vatt-12v-mono> (дата обращения: 09.09.2019).

3. Для определения температуры нагрева наиболее эффективно использование метода визуализации инфракрасного изображения (ИК-изображения) как наиболее точного и удобного в применении.

4. По результатам эксперимента построены графики зависимости температуры нагрева модуля от температуры окружающей среды и от влажности воздуха в течение дня.

5. Применение голографической пленки для защиты солнечного модуля от перегрева показало эффективность такого способа снижения температуры поверхностей модулей при сохранении и даже повышении вырабатываемой мощности.

6. Предлагаемый метод снижения перегрева модулей может иметь значительный эффект при использовании его на большем количестве модулей (солнечных электростанциях).

3. King D.L., Boyson W.E., Kratochvill J.A. Photovoltaic Array Performance Model // SANDIA REPORT 2004–3535. December, 2004.
4. Coelho R.F., Concer F.M., Martins D.C. A MPPT Approach Based on Temperature Measurements Applied in PV Systems // *Proceedings of the IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET '10)*. December, 2010. P. 1–6.
5. Nima E. Gorji. Thermal Runaway in Thin Film PV: Temperature Profile Modeling //

IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 2014. P. 99.

6. Ababacar Ndiaye. A Novel Method for Investigating Photovoltaic Module Degradation // *Energy Proc.* 2013. Vol. 36. P. 1222–1236.

7. Coskun C., Ugurtan T., Ozgur S., Zuhail O. Sensitivity Analysis of Implicit Correlations for Photovoltaic Module Temperature: a Review // *Journal of Cleaner Production.* 2017. Vol. 164. P. 1474–1485.

8. Юмаев Н.Р., Юсуфбеков Н. Исследование влияния погодных условий на параметры солнечных батарей в естественных условиях эксплуатации // *Материалы Международной конференции «Современные проблемы математики и её приложения», посвящённой 70-летию со дня рождения академика АН РТ Илолова Мамадшо Илоловича.* Душанбе, 2018. С. 196–199.

9. Stefan K., Alexander P. Comparison of Module Temperature Measurement Methods // *34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC).* (Philadelphia, PA, USA, 7–12 June 2009). Philadelphia, 2009.

10. Davis M.W., Fannery A.H., Dougherty B.P. Prediction of Building Integrated Photovoltaic Cell Temperatures // *Journal of Solar Energy Engineering.* 2001. Vol. 123. No. 2. P. 200–210.

11. Garcia M.C.A., Balenzategui J.L. Estimation of Photovoltaic Module Yearly Temperature and Performance Based on Nominal Operation Cell Temperature Calculations // *Renewable Energy.* 2004. Vol. 29, No. 12. P. 997–2010.

12. Aste N., Del Pero C., Leonforte F. PV Technologies Performance Comparison in Temperate Climates // *Solar Energy.* 2014. Vol. 109. P. 1–10.

13. Jaffery Z.A., Dubey A.K., Irshad A., Haque. Scheme for Predictive Fault Diagnosis in Photo-Voltaic Modules Using Thermal Imaging // *Infrared Physics & Technology.* 2017. Vol. 83. P. 182–187.

14. Dubey Swapnil, Narotam Sarvaiya Jatin, Seshadri Bharath. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World: A Review // *PV Asia Pacific Conference 2012. Journal of the Energy Procedure.* 2013. Vol. 33. P. 311–321.

15. Tsanakas J.A., Botsaris P.N. Passive and Active Thermographic Assessment as a Tool for

Condition Monitoring Performance of Photovoltaic Modules // *Journal of Solar Energy Engineering SME.* 2011. Vol. 133, No. 2. P. 1012–1016.

16. Zaghba L., Abdelhalim B., Abdelhak B. Intelligent Control MPPT Technique for PV Module at Varying Atmospheric Conditions Using MATLAB/SIMULINK // *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Morocco,* 2014.

17. Ahteshamul Haque. Maximum Power Point Tracking (MPPT) Scheme for Solar Photovoltaic System // *Energy Technol.* 2014. Vol. 1. P. 115–122.

18. Андреев В.И., Гончарук М.Д., Клименко Л.П., Зюляев Д.Д., Кубов В.И., Кубова Р.М., Павленко А.А. Анализ температурных аномалий в солнечных фотоэлектрических батареях // *Научные труды. Техногенная безопасность. Радиобиология.* 2015. Т. 261, Вып. 249.

19. Huang B.J., Yang P.E., Lin Y.P., Chen H.J. Solar Cell Junction Temperature Measurement of PV Module // *Solar Energy.* 2011. Vol. 85. P. 388–392.

20. Vittorini D., Cipollone R. Fin-Cooled Photovoltaic Module Modeling e Performances Mapping and Electric Efficiency Assessment under Real Operating Conditions // *Energy.* 2019. Vol. 167. P. 159–167.

21. Irshad Abdin Jaffery Zainu, Haque Ahteshamu. Temperature Measurement of Solar Module in Outdoor Operating Conditions Using Thermal Imaging // *Infrared Physics & Technology.* 2018. Vol. 92. P. 134–138.

22. В Таджикистане с 1 сентября повысят тарифы на электроэнергию [Электронный ресурс]. URL: <https://sptnkne.ws/5SxV> (дата обращения: 14.09.2019).

## References

1. Skoplaki E., Palyvos J.A. On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: a Review of Efficiency/Power Correlations. *Solar Energy*, 2009, Vol. 83, pp. 614–624.

2. List spetsifikatsii dannykh Delta battery [Manufacturer Specification Sheet, Delta Battery]. URL: <https://eco50.ru/solnechnye-sistemy/solnechnye-batarei/solnechnaya->

batareya-delta-sm-100-12m-100-vatt-12v-mono (assessed 09.09.2019). [in Russian].

3. King D.L., Boyson W.E., Kratochvill J.A. Photovoltaic Array Performance Model. *SANDIA REPORT 2004-3535*. December, 2004.

4. Coelho R.F., Concer F.M., Martins D.C. A MPPT Approach Based on Temperature Measurements Applied in PV Systems. *Proceedings of the IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET '10)*. December, 2010. pp. 1–6.

5. Nima E. Gorji. Thermal Runaway in Thin Film PV: Temperature Profile Modeling. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2014, P. 99.

6. Ababacar Ndiaye. A Novel Method for Investigating Photovoltaic Module Degradation. *Energy Proc.*, 2013, Vol. 36, pp. 1222–1236.

7. Coskun C., Ugurtan T., Ozgur S., Zuhail O. Sensitivity Analysis of Implicit Correlations for Photovoltaic Module Temperature: a Review. *Journal of Cleaner Production*, 2017, Vol. 164, pp. 1474–1485.

8. Yumaev N.R., Yusufbekov N. Issledovanie vliyaniya pogodnykh uslovii na parametry solnechnykh batarei v estestvennykh usloviyakh ekspluatatsii [Investigation of the Influence of Weather Conditions on the Parameters of Solar Panels in Natural Conditions of Use]. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii «Sovremennye problemy matematiki i ee prilozheniya», posvyashchennoi 70-letiyu so dnya rozhdeniya akademika AN RT Ilolova Mamadsho Ilolovicha* [Materials of the International Conference «Contemporary Problems of Mathematics and its Applications», dedicated to the 70th birthday of Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan Ilolov Mamadsho Ilolovich]. Dushanbe, 2018. P. 196–199. [in Russian].

9. Stefan K., Alexander P. Comparison of Module Temperature Measurement Methods. *34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. (Philadelphia, PA, USA, 7–12 June 2009). Philadelphia, 2009.

10. Davis M.W., Fanney A.H., Dougherty B.P. Prediction of Building Integrated Photovoltaic Cell Temperatures. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2001, Vol. 123, No. 2, pp. 200–210.

11. Garcia M.C.A., Balenzategui J.L. Estimation of Photovoltaic Module Yearly Temperature and Performance Based on Nominal Operation Cell Temperature Calculations. *Renewable Energy*, 2004, Vol. 29, No. 12, pp. 997–2010.

12. Aste N., Del Pero C., Leonforte F. PV Technologies Performance Comparison in Temperate Climates. *Solar Energy*, 2014, Vol. 109, pp. 1–10.

13. Jaffery Z.A. Dubey A.K., Irshad A. Haque. Scheme for Predictive Fault Diagnosis in Photo-Voltaic Modules Using Thermal Imaging. *Infrared Physics & Technology*, 2017, Vol. 83, pp. 182–187.

14. Dubey Swapnil, Narotam Sarvaiya Jatin, Seshadri Bharath. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World: A Review. *PV Asia Pacific Conference 2012. Journal of the Energy Procedure*, 2013, Vol. 33, pp. 311–321.

15. Tsanakas J.A., Botsaris P.N. Passive and Active Thermographic Assessment as a Tool for Condition Monitoring Performance of Photovoltaic Modules. *Journal of Solar Energy Engineering SME*, 2011, Vol. 133, No. 2, pp. 1012–1016.

16. Zaghba L., Abdelhalim B., Abdelhak B. Intelligent Control MPPT Technique for PV Module at Varying Atmospheric Conditions Using MATLAB/SIMULINK. *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Morocco, 2014.

17. Ahteshamul Haque. Maximum Power Point Tracking (MPPT) Scheme for Solar Photovoltaic System. *Energy Technol.*, 2014, Vol. 1, pp. 115–122.

18. Andreev V.I., Goncharuk M.D., Klimenko L.P., Zyulyaev D.D., Kubov V.I., Kubova R.M., Pavlenko A.A. Analiz temperaturnykh anomalii v solnechnykh fotoelektricheskikh batareyakh [Analysis of Temperature Anomalies in Solar Photovoltaic Batteries]. *Nauchnye trudy. Tekhnogennaya bezopasnost'. Radiobiologiya* [Scientific works. Technogenic safety. Radiobiology]. 2015, Vol. 261, Issue 249. [in Russian].

19. Huang B.J., Yang P.E., Lin Y.P., Chen H.J. Solar Cell Junction Temperature Measurement

of PV Module. *Solar Energy*, 2011, Vol. 85, pp. 388–392.

20. Vittorini D., Cipollone R. Fin-Cooled Photovoltaic Module Modeling e Performances Mapping and Electric Efficiency Assessment under Real Operating Conditions. *Energy*, 2019, Vol. 167, pp. 159–167.

21. Irshad Abdin Jaffery Zainu, Haque Ahteshamu. Temperature Measurement of Solar

Module in Outdoor Operating Conditions Using Thermal Imaging. *Infrared Physics & Technology*, 2018, Vol. 92, pp. 134–138.

22. V Tadjikistane s 1 sentyabrya povysyat tarify na elektroenergiyu [Starting from September 1, Tajikistan Will Increase Electricity Tariffs]. URL: <https://sptnkne.ws/5SxV> (assessed 14.09.2019). [in Russian].



**Шуваева А. О.**  
**Shuvaeva A. O.**

аспирант,  
ФГБОУ ВО «Камчатский государственный  
технический университет»,  
г. Петропавловск-Камчатский,  
Российская Федерация



**Труднев С. Ю.**  
**Trudnev S. Yu.**

кандидат технических наук,  
декан мореходного факультета,  
ФГБОУ ВО «Камчатский государственный  
технический университет»,  
г. Петропавловск-Камчатский,  
Российская Федерация

УДК 621.311.68

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-30-38

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА АВТОНОМНОЙ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ

Рассмотрена структурная схема устройства, позволяющего обеспечить катодную защиту нефтяных платформ и сооружений. Усовершенствована существующая система питания устройства автономной катодной защиты, позволяющая обеспечить подачу электрической энергии в систему защищаемого сооружения и увеличить срок службы источников и всей системы в целом. Актуальность данного устройства обусловлена несовершенством эксплуатируемых систем защиты нефтяных платформ. Коррозия металлических частей морской платформы является естественным самопроизвольным процессом. Для частичного предотвращения и его замедления регулярно разрабатываются методы по совершенствованию систем катодной электрохимической защиты. Были разработаны и сконструированы различные автоматизированные системы, позволяющие регулировать скорость коррозионного процесса. Так как существующие на сегодняшний день системы защиты от коррозии металлических сооружений нуждаются в постоянном обслуживании, вопрос их совершенствования до сих пор остается открытым и актуальным. Предлагаемая система обеспечит защиту металлических сооружений от агрессивного влияния морской среды. Одной из уязвимых частей системы катодной защиты является ее источник питания, выходные параметры которого зависят от возобновляемых источников энергии. В связи с этим авторами предлагается усовершенствовать источник электрической энергии катодной защиты. Для того чтобы наглядно представить работу предлагаемой схемы, авторами статьи создана компьютерная модель в программной среде MATLAB. Для создания компьютерной модели был выполнен обзор математических уравнений синхронного генератора, которые описывают принцип работы силовой части источника тока. Рассмотрена математическая модель мостового выпрямителя тока. На основании математических моделей и уравнений была разработана и исследована имитационная модель предлагаемого устройства в программной среде MATLAB.

**Ключевые слова:** коррозия, ветер, скорость, модель, источник питания, синхронный генератор, мостовой выпрямитель, постоянный ток.

## SIMULATION OF AUTONOMOUS CATHODIC PROTECTION SOURCE

A block diagram of a device that allows to provide cathodic protection of oil platforms and structures is considered. The existing power supply system of the autonomous cathodic protection device has been improved, allowing to ensure the supply of electrical energy to the system of the protected

structure and to increase the service life of sources and the entire system. The relevance of this device is due to the imperfection of the operated systems for the protection of oil platforms. Corrosion of metallic parts of the offshore platform is a natural spontaneous process. For partial prevention and deceleration, methods are regularly developed to improve cathodic electrochemical protection systems. Various automated systems were developed and designed to regulate the rate of the corrosive process. Since the current corrosion protection systems for metal structures need constant maintenance, the question of their perfection still remains open and relevant. The proposed system will protect metal structures from the aggressive influence of the marine environment. One of the vulnerable parts of the cathodic protection system is its power source, the output parameters of which depend on renewable energy sources. In this regard, the author proposes to improve the source of electrical energy of cathodic protection. In order to visually present the work of the proposed scheme, the authors of the article created a computer model in the MATLAB software. To create a computer model, we reviewed the mathematical equations of a synchronous generator, which describes the principle of operation of the power part of the current source. The mathematical model of a bridge rectifier is considered. On the basis of mathematical models and equations, a simulation model of the proposed device was developed and investigated in the MATLAB software.

**Key words:** corrosion, wind, speed, model, power supply, synchronous generator, bridge rectifier, direct current.

### *Введение*

На сегодняшний день основную роль в увеличении добычи нефти и газа, как правило, играет освоение новых морских нефтяных месторождений. Морские шельфы изучены в среднем всего на 7 %, при этом основные сухопутные нефтегазоносные регионы — более чем на 50 %, поэтому потенциал шельфовых запасов огромен, также следует отметить, что в настоящее время больше трети добытой нефти и газа во всём мире поступает из морских источников.

При освоении и разработке новых морских нефтяных месторождений необходимо строительство эстакад, индивидуальных оснований, площадок под буровые установки и других сооружений. Металлические конструкции в морских условиях подвергаются постоянной интенсивной коррозии, что приводит к их разрушению, а это снижает как промышленную, так и пожарную безопасность платформы в целом. Применение возобновляемых источников энергии совместно с системой катодной защиты способно дать значительный экономический и экологический эффект. Увеличение срока между восстановительными мероприятиями путем совершенствования технической части автономного источника электрической энергии с внешним источником тока и самостоятельного контроля бесперебойной подачи для обеспечения работы устройства катодной

защиты является главной целью данной статьи.

Одним из оптимальных методов по увеличению эффективности защиты от коррозии является катодная электрохимическая защита нефтегазовых платформ. Это доказывают исследования, которые провели кандидаты наук А.С. Наботова и В.З. Нгуен. Научные школы под руководством А.А. Фатхуллина и С.Я. Дунаевского также регулярно разрабатывают методы по совершенствованию систем катодной электрохимической защиты [1].

В рамках данной статьи были поставлены следующие задачи:

1. Провести обзор статистических значений скорости ветра в нефте- и газодобывающих районах;
2. Провести анализ математической модели силового модуля устройства катодной защиты;
3. Разработать структурную усовершенствованную схему источника питания;
4. Разработать и исследовать компьютерную модель источника питания катодной защиты;
5. Провести апробацию результатов, полученных при исследовании компьютерной модели источника питания.

### *Методы и материалы*

Катодная защита с внешним источником тока получила наибольшее распространение в связи с простотой монтажа и эксплуатации,

невысокой стоимостью и при этом высокой технологичностью. Традиционно применяют автономные катодные станции, которые содержат источники постоянного тока, такие как термоэлектрогенераторы, ветроэлектрогенераторы, турбоальтернаторы и фотоэлектрогенераторы.

Однако при использовании альтернативных источников электрической энергии в системах катодной защиты, в частности на морских нефтяных установках, существует значительный недостаток — ограниченная выходная мощность. Так, для обеспечения

работы оборудования электрохимической защиты с потребляемой мощностью 200 Вт необходимо использовать ветрогенератор, диаметр лопастей которого составит 3 м, скорость ветра при этом должна составлять не менее 4,5 м/с.

В климатических условиях РФ в зависимости от времени года и территориального района ветровая активность отличается в разы. На рисунке 1 [2] наглядно представлены районы нефте- и газодобычи России.

Рассмотрим ветряные характеристики, в частности скорость ветра, для морей аркти-

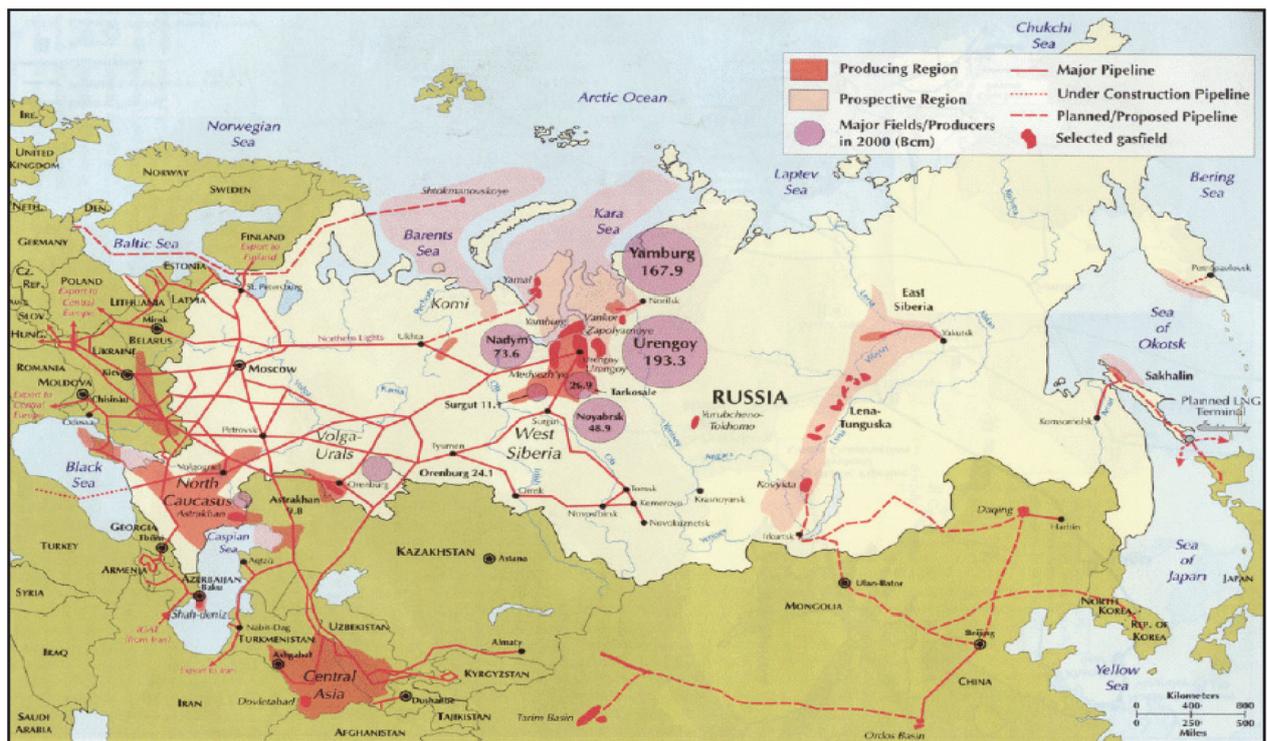


Рисунок 1. Основные нефтяные и газовые бассейны

ческого региона России, где добывается более 90 % всего отечественного газа и около 10 % нефти. Из рисунка 1 видно, что большая часть нефтегазовых запасов находится в Баренцевом, Карском и Охотском морях. Ниже приведены графики зависимостей средних скоростей ветра от времени года для этих морей.

Из анализа графиков (рисунок 2) можно сделать вывод, что за наблюдаемый период времени средняя скорость ветра во всех морях не опускается ниже отметки минимального значения для эффективной работы системы катодной защиты. Но в весенне-летний период происходит достаточное снижение ветровой активности. В таких условиях

энергоэффективность оборудования является важнейшим фактором.

На сегодняшний день существующие системы электрохимической катодной защиты работают на переменном токе, значение номинального напряжения составляет 220 В. Для работы системы защиты от постоянного тока необходимо применение инверторных установок, что приводит к потере значительной части полезной мощности — 15–20 %.

Для компенсации мощностных потерь возникает необходимость в кратном увеличении габаритных размеров ветрогенераторных установок, что приведет к увеличению их стоимости. Это противоречит одной из

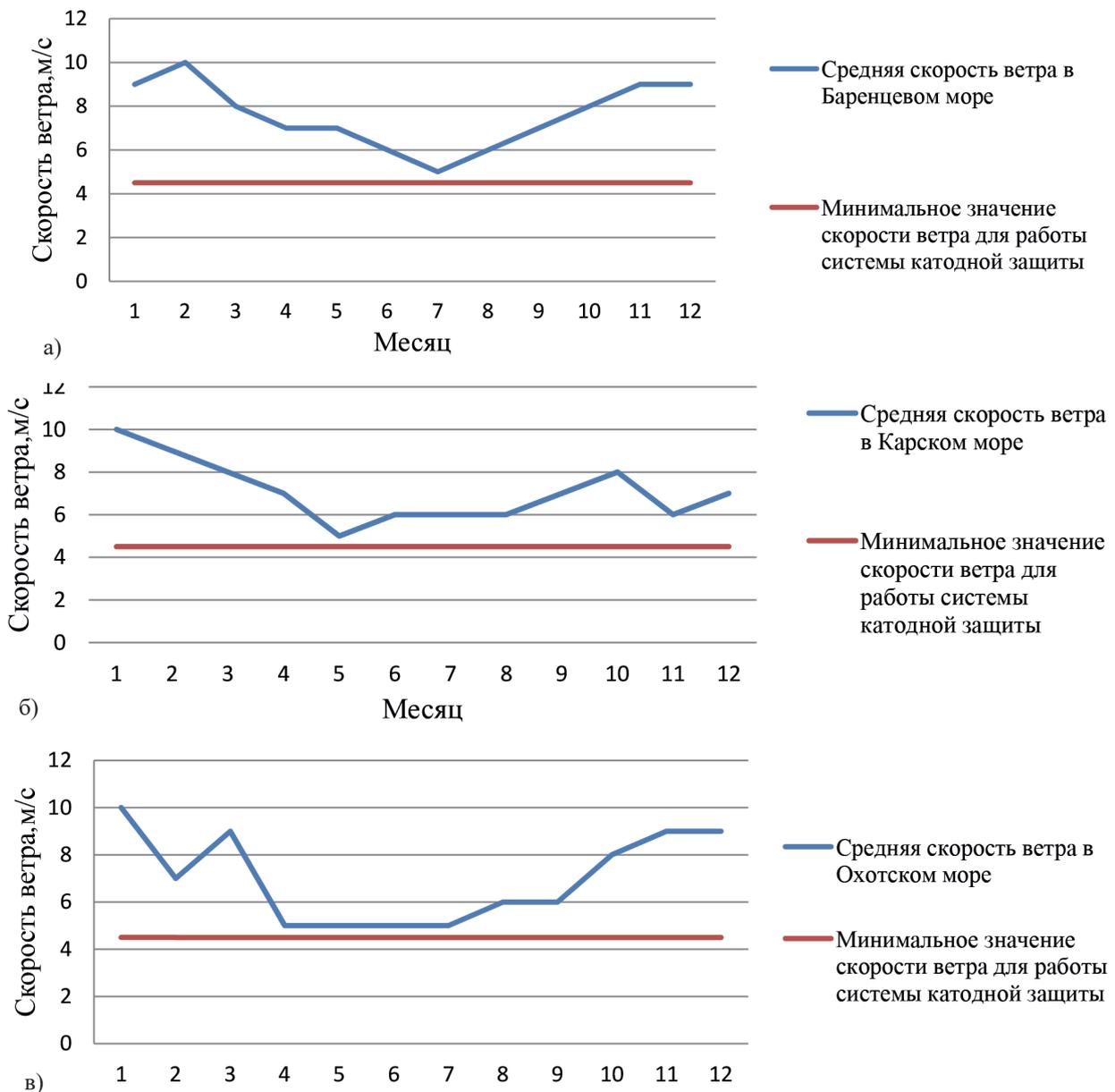


Рисунок 2. Зависимость средней скорости ветра от времени года в Баренцевом (а), Карском (б), Охотском (в) морях

основных задач — снижению затрат. Чтобы решить данную проблему, необходимо применять станции катодной защиты напряжением питания 12–48 В постоянного тока, основными элементами которых являются силовые модули и модули управления [3].

Силовые модули катодной защиты включают в себя модули управления, состоящие из устройств, которые обеспечивают следующие параметры и режимы работы: управление и измерение выходного напряжения, выходного тока, защитного потенциала сооружения и мониторинг датчика коррозии. Данный модуль также может быть использован для управления источниками питания

любого типа, имеющими внешний аналоговый вход управления [4].

Для разработки и построения принципиальной схемы системы катодной защиты необходимо рассмотреть математическую модель синхронной машины, учет её насыщения и структурную схему синхронного генератора, которые входят в состав силового модуля систем катодной защиты [5].

Уравнения якорной цепи в системе координат  $d, q$ :

$$\begin{cases} U_d = -R_a I_d + p\psi_d - \psi_q \Omega \\ U_q = -R_a I_q + p\psi_q - \psi_d \Omega \end{cases} \quad (1)$$

Уравнение цепи обмотки возбуждения:

$$U_f = R_f I_f + p\psi_f \quad (2)$$

Уравнения для потокосцеплений:

$$\psi_d = (-L_{ad}I_d + M_{afd}I_f + M_{akd}I_{kd}) - L_{as}I_a; \quad (3)$$

$$\psi_q = (M_{akd}I_{kq} - L_{aq}I_q) - L_{as}I_a; \quad (4)$$

$$\psi_f = \left[ -\frac{3}{2}M_{afd}I_d + M_{fkd}I_{kd} + (L_f - L_{fs})I_f \right] + L_{js}I_f; \quad (5)$$

$$\psi_{kd} = \left[ -\frac{3}{2}M_{akd}I_d + M_{fkd}I_f + (L_{kd} - L_{ks})I_{kd} \right] + L_{ks}I_{fd}; \quad (6)$$

$$\psi_{kq} = \left[ -\frac{3}{2}M_{akq}I_q + (L_{kq} - L_{ks})I_{kq} \right] + L_{ks}I_{kq}. \quad (7)$$

Уравнение цепи нагрузки:

$$U_d = R_n I_d + \frac{X_n}{\Omega_0} p I_d - X_n I_q \frac{\Omega}{\Omega_0}; \quad (8)$$

$$U_q = R_n I_q + \frac{X_n}{\Omega_0} p I_q - X_n I_d \frac{\Omega}{\Omega_0}, \quad (9)$$

где  $\Omega_0 = 2\pi f_0$  синхронная угловая частота.

Уравнения связи записи по двум системам:

$$U_A^2 = U_d^2 + U_q^2; \quad (10)$$

$$I_A^2 = I_d^2 + I_q^2. \quad (11)$$

Уравнение активной мощности:

$$P = U_d I_d + U_q I_q. \quad (12)$$

Уравнение реактивной мощности:

$$Q = -U_d I_q + U_q I_d. \quad (13)$$

Уравнение движения электропривода:

$$M = J \frac{d\Omega}{dt} + \frac{3}{2} (\psi_q I_d - \psi_d I_q), \quad (13)$$

где  $J$  — суммарный момент инерции ротора и нагрузки.

Уравнения (1)–(13) содержат переменные с физической размерностью. В теории синхронных машин уравнения записывают в относительных единицах, а не в абсолютных [6, 7].

Запись уравнений в относительных единицах позволяет принять уравнениям более простой вид, а это дает возможность для сравнения различных синхронных машин.

Для перехода от физических величин к относительным необходимо задаться базисными значениями переменных, в долях от которых определяются относительные величины.

К основным базисным величинам относятся следующие:

— базисный ток статора, равный максимальному значению (амплитуде) номинального фазного тока

$$I_{a.б.} = I_{a0};$$

— базисное напряжение статора, равное амплитуде номинального фазного напряжения

$$U_{a.б.} = U_{a0};$$

— базисное потокосцепление статора, наводящее в обмотке статора при базисной угловой частоте базисное напряжение

$$\psi_{a.б.} = \psi_{a0} = \frac{U_{a0}}{\Omega_{a0}};$$

— базисная частота, равная синхронной угловой частоте

$$\Omega_б = \Omega_0 = 2\pi f_0;$$

— базисное сопротивление статора, равное

$$Z_{a.б.} = Z_{a0} = \frac{U_{a0}}{I_{a0}};$$

— базисная мощность статора, равная номинальной мощности синхронной машины

$$P_б = P_0 = 3 \times U_n I_n = \frac{3}{2} U_{a0} I_{a0};$$

— базисный момент

$$M_б = M_0 = \frac{P_0}{\Omega_0} p^*,$$

где  $p^*$  — число пар полюсов синхронной машины;

$$L_{a.б.} = L_{a0} = \frac{Z_{a0}}{\Omega_0};$$

— базисная индуктивность статора

$$t_б = \frac{1}{\Omega_0} = \frac{1}{2\pi f_0};$$

— базисное время, соответствующее повороту ротора синхронной машины на 1 эл. град при базисной угловой частоте

$$t_б = \frac{1}{\Omega_0} = \frac{1}{2\pi f_0}.$$

Вышеизложенные уравнения синхронной машины лежат в основе построения обобщенной структурной схемы синхронного двигателя, которая представлена на рисунке 3.

Структурная схема содержит: 1 — генератор; 2 — выпрямительное устройство; 3 — регулирующее устройство; 4 — выключатель зажигания; 5 — амперметр; Ш — вывод обмотки возбуждения; «+» — плюсовой вывод выпрямителя [8].

Поскольку синхронный ветрогенератор вырабатывает переменный ток, а для работы системы катодной защиты необходим постоянный, то устройство преобразования

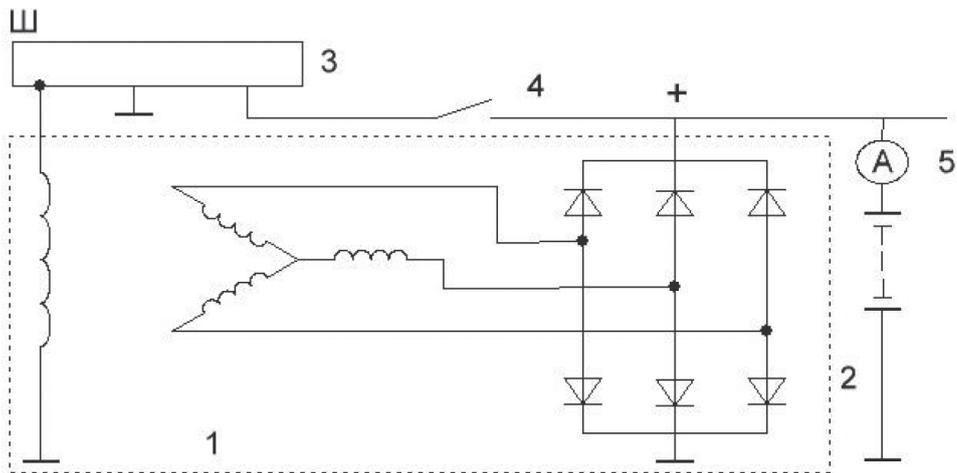


Рисунок 3. Математическая модель схемы синхронного генератора переменного тока

переменного тока в постоянный — выпрямитель — является ключевым элементом, входящим в систему катодной защиты [9].

Рассмотрим математическую модель, которая описывает работу выпрямителя тока. При описании работы электрических схем основными динамическими переменными на отдельных участках схемы являются токи  $I$  и напряжения  $U$ . Математическое описание элементов электрических цепей базируется на выражениях, представленных ниже, которые определяют математические связи между токами и напряжениями.

— Резистивный элемент  $U = I \cdot R$  или  $I = G \cdot U$ ,

где  $G = \frac{1}{R}$ ,  $R$  — сопротивление,  $G$  — проводимость.

— Емкостной элемент ( $C = \text{const}$ )

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt}(C \cdot U) = C \cdot \frac{dU}{dt},$$

или  $U = \frac{1}{C} \int I \cdot dt$ , где  $Q = C \cdot U$ ,

где  $Q$  — заряд и  $C$  — емкость конденсатора,  $t$  — время.

— Индуктивный элемент ( $L = \text{const}$ )

$$U = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt}(L \cdot I) = L \cdot \frac{dI}{dt}, \text{ или } I = \frac{1}{L} \int U \cdot dt,$$

где  $\Phi$  — магнитный поток,  $L$  — индуктивность катушки, входящая в состав выпрямителя тока [9].

Для полупроводникового выпрямительного диода математическая модель имеет аналитическое выражение, связывающее ток диода  $I_D$  и ток насыщения полупроводникового диода  $I_S$ :

$$I_D = I_S \cdot \left( e^{\frac{q \cdot U}{kT}} - 1 \right),$$

где  $I_S$  — ток насыщения полупроводникового диода;

$q$  — модуль заряда электрона;

$k$  — постоянная Больцмана;

$T$  — абсолютная температура.

Уравнения тока диода необходимо применить для математической модели схемы выпрямителя, содержащей  $L$ - $C$ -фильтр.

Данная схема изображена на рисунке 4, где  $L$  — индуктивность.

С точки зрения практического использования целесообразно реализовать модель источника питания в программной среде Matlab R2007b Simulink. Его компьютерная модель представлена на рисунке 5.

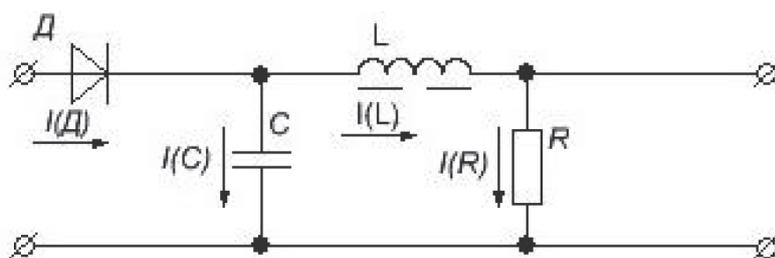


Рисунок 4. Математическая модель схемы выпрямителя, содержащего  $L$ - $C$ -фильтр

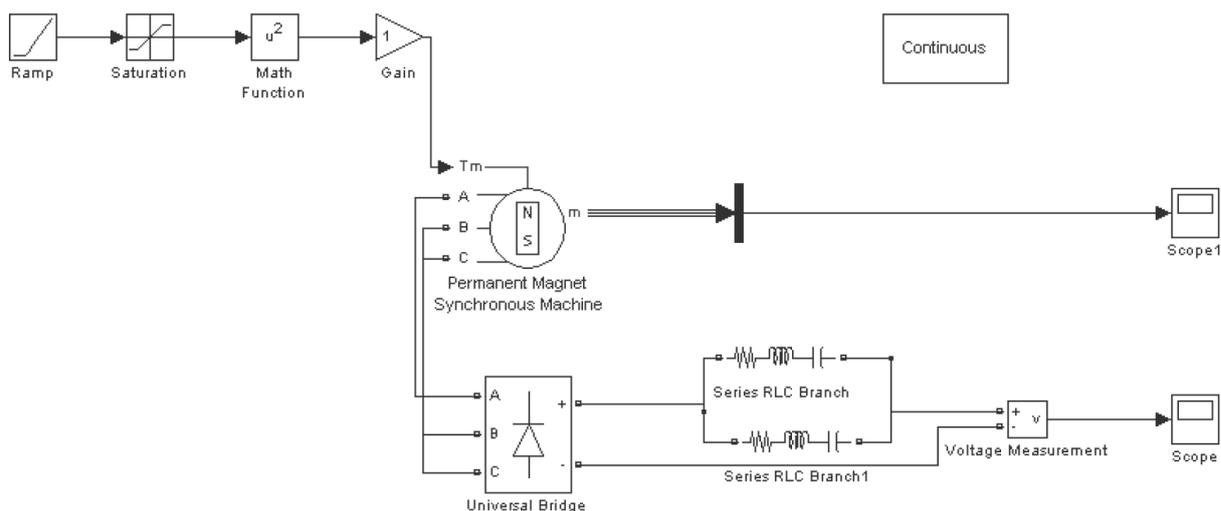


Рисунок 5. Компьютерная модель источника питания катодной защиты в программе Matlab

Скорость ветра и электромагнитный момент генератора являются входными переменными модели.

Отрицательный момент, определяющийся скоростью ветра, прилагается к блоку Permanent Magnet Synchronous Machine. Воздействие момента, приложенного к ротору генератора, определяется с помощью блоков Gain, Math Function и Ramp.

Источником переменного тока и напряжения, которые сложно использовать для нужд потребителя, является генератор. Для получения постоянных характеристик необходим выпрямительный мост Universal Bridge. Для

сглаживания пульсации в схему был включен RLC-фильтр.

### Результаты

На рисунке 6 представлена зависимость крутящего момента ветротурбины, которая разгоняется при увеличении скорости ветра от 6 до 10 м/с на холостом ходу. При этом осуществляется наброс момента нагрузки  $M_n = 50 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Измерение выходного напряжения с выпрямителя, представленное на рисунке 7, осуществляется при помощи вольтметра Voltage Measurement.

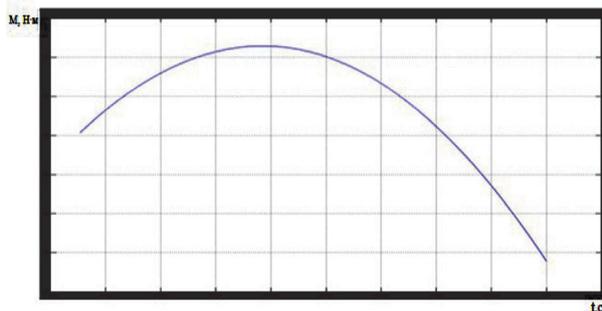


Рисунок 6. Зависимость момента нагрузки на холостом ходу от времени

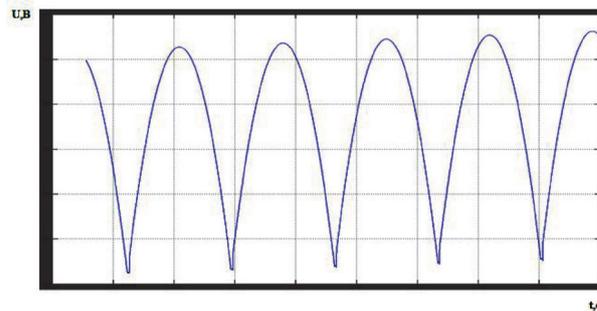


Рисунок 7. Значение выходного напряжения выпрямителя

### Обсуждение результатов

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что представленная модель демонстрирует адекватный переходный процесс. С помощью внедрения в систему питания катодной защиты таких устройств, как генератор постоянного тока, обеспечивающий питанием всю систему в целом, и выпрямительного моста, который

позволяет получить постоянный ток, был выявлен факт адекватности переходного процесса [10].

В режиме холостого хода предложенная модель источника питания достаточно точно отражает работу установки. Она может быть использована при разработке и исследовании системы управления и питания катодной защиты.

## Выводы

Полученный источник электрической энергии позволяет исследовать динамические процессы, зависящие от входных параметров и величин. Оптимальная настройка системы управления повышает энергоэффективность работы систем катодной защиты.

## Список литературы

1. Труднев С.Ю., Шуваева А.О. Исследование работы импульсного стабилизатора напряжения для питания катодной защиты морских платформ // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2018. № 4 (50). С. 818–827.
2. Полезные ископаемые России. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki>.
3. Dar M., Yusuf A. Experimental Study on Innovative Sections for Cold Formed Steel Beams: Steel and Composite Structures // *An Int'l Journal, South Korea*. 2015. Vol. 19, No. 6, P. 545–554.
4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPowerSystems и Simulink. СПб.: Питер, 2008. 288 с.
5. Arcangelo M. Local Diagnoses in Modal Analysis through Additional Poles: Mechanic of Advanced Materials and Structures. UK, 2017. Vol. 24, No. 6. P. 271–286.
6. Федюк Р.С., Ильинский Ю.Ю., Ибрагимов Д.И. Разработка источника питания устройства ограничения замыкания на корпус судна // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2015. № 4 (32). С. 177–185.
7. Фатхуллин А.А., Гараев И.Г. Новые перспективные материалы для анодов катодной защиты от коррозии // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 8. С. 296–299.
8. Никулин С.А., Карнавский Е.Л. Оптимизация режимов установок электрохимической защиты // Системы управления и информационные технологии. 2014. Т. 57. № 3. С. 64–68.
9. Дунаевский С.Я. Моделирование элементов электромеханических систем. 2 изд. М.: Энергия, 1971. 288 с.

Для верификации полученных результатов в дальнейшем необходимо разработать испытательный макет предлагаемого устройства, исследование которого позволит в полной мере объективно оценить его работоспособность.

10. Труднев С.Ю. Разработка компьютерной модели параллельной работы генераторного агрегата и трехфазного безынерционного источника питания // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2015. Вып. 2 (30). С. 191–198.

## References

1. Trudnev S.Yu., Shuvaeva A.O. Issledovanie raboty impul'snogo stabilizatora napryazheniya dlya pitaniya katodnoi zashchity morskikh platform [Study of the operation of a pulsed voltage regulator for cathodic protection of offshore platforms]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* — *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*, 2018, No 4 (50), pp. 818-827. [in Russian].
2. Poleznye iskopaemye Rossii [Minerals of Russia]. Rezhim dostupa: <https://ru.wikipedia.org/wiki>. [in Russian].
3. Dar M., Yusuf A. Experimental Study on Innovative Sections for Cold Formed Steel Beams: Steel and Composite Structures. *An Int'l Journal, South Korea*, 2015, Vol. 19, No. 6, pp. 545-554.
4. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of Electrical Devices in MATLAB SimPowerSystems and Simulink]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p. [in Russian].
5. Arcangelo M. Local Diagnoses in Modal Analysis through Additional Poles: Mechanic of Advanced Materials and Structures. UK, 2017. Vol. 24, No. 6. P. 271-286.
6. Fedjuk R.S., Il'inskiy Yu.Yu., Ibragimov D.I. Razrabotka istochnika pitaniya ustroystva ogranicheniya zamykaniya na korpus sudna [Development of a Power Source for a Device for Limiting a Short Circuit to a Ship's Hull]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta*

*morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* — *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*, 2015, No. 4 (32), pp. 177–185. [in Russian].

7. Fatkhullin A.A., Garaev I.G. Novye perspektivnye materialy dlya anodov katodnoi zashchity ot korrozii [New Perspective Materials for Anodes of Cathodic Corrosion Protection]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* — *Bulletin of Kazan Technological University*, 2014, Vol. 17, No. 8, pp. 296–299. [in Russian].

8. Nikulin S.A., Karnavskii E.L. Optimizatsiya rezhimov ustanovok elektrokhimicheskoi zashchity [Electrochemical Protection Installations Modes Optimization]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* — *Control Systems and Information Technologies*, 2014, Vol. 57, No. 3, pp. 64–68. [in Russian].

9. Dunaevskii S.Ya. Modelirovanie elementov elektromekhanicheskikh system [Electromechanical Systems Elements Modeling]. 2 izd. Moscow, Energiya Publ., 1971. 288 p. [in Russian].

10. Trudnev S.Yu. Razrabotka komp'yuternoi modeli parallel'noi raboty generatornogo agregata i trekhfaznogo bezynertsionnogo istochnika pitaniya [Development of a Computer Model of Parallel Operation of a Generator Unit and a Three-Phase Inertia-Free Power Source]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* — *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*, 2015, Issue 2 (30), pp. 191–198. [in Russian].



**Герасимов В. Е.**  
**Gerasimov V. E.**  
ассистент кафедры  
«Электроэнергетика»,  
ФГБОУ ВО «Тюменский  
индустриальный  
университет»,  
г. Тюмень,  
Российская Федерация



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



**Малышева Н. Н.**  
**Malysheva N. N.**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Энергетика»,  
ФГБОУ ВО  
«Нижневартровский  
государственный  
университет»,  
г. Нижневартовск,  
Российская Федерация

УДК 621.311:620.92

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-39-47

## РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРООБОГРЕВА НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРОМЫСЛОВ

Рассматривается вопрос повышения энергоэффективности функционирования систем электроснабжения нефтегазовых промыслов. В статье указывается, что в рамках реализации нового пилотного проекта в сфере электроэнергетики (Постановление Правительства РФ № 287), направленного на повышение эффективности и снижение расходов на энергоснабжение, добавляется новый механизм взаимодействия системного оператора с потребителями, который носит название «эффективное управление спросом». Определено, что возможным целевым объектом управления в рамках реализации концепции эффективного управления спросом применительно к нефтегазовым промыслам могут стать системы электрообогрева трубопроводов, так как их доля в энергопотреблении данных промышленных предприятий, особенно расположенных в районах с холодным климатом, значительна. В частности, в данной статье рассматривается система электрообогрева на основе индуктивно-резистивного нагрева (скин-эффект) протяженных межплощадочных нефтепроводов, по которым добываемая на кустах нефть транспортируется до площадки установки комплексной подготовки нефти.

Предлагаемый в данной работе вариант энергоэффективной системы электроснабжения скин-обогрева межплощадочных нефтепроводов предполагает установку на предприятии объектов собственной генерации на базе возобновляемых источников энергии, в частности на базе ветроэнергетических установок, в совокупности с системами накопления электроэнергии. На объекте также будет установлена новая комплектная трансформаторная подстанция для выдачи мощности с ветроэнергетической установки и системы накопления электроэнергии. В составе данной трансформаторной подстанции также предполагается установка выпрямителей и инверторов. От распределительного устройства 10 кВ данной повышающей трансформаторной подстанции будут отходить питающие линии на существующие трансформаторные подстанции, питающие системы скин-обогрева межплощадочных нефтепроводов. Поскольку данные подстанции обычно запитаны по 3-ей категории надежности электроснабжения, то потребуются замена их вводных

ячеек с целью подключения к ним второго ввода от вновь устанавливаемой подстанции, а также с целью установки блока контроля питания, выполняющего команды системы управления электроснабжения предприятия на переключение источников питания систем скин-обогрева.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, агрегатор, управление спросом, возобновляемые источники энергии, система накопления электроэнергии, ветроэнергетическая установка, электрообогрев, нефтепровод.

## CONCEPT DEVELOPMENT OF ENERGY-EFFICIENT MANAGEMENT OF INDUSTRIAL ELECTRIC HEATING SYSTEMS FOR OIL AND GAS FIELDS

Issue of improving the energy efficiency of power supply systems functioning for oil and gas fields is devoted. The article indicates that as part of the implementation of a new pilot project in the electric power industry (Decree of the Government of the Russian Federation No. 287), aimed at increasing efficiency and reducing energy costs, a new mechanism for interaction between the system operator and consumers, which is called effective demand management, is being added. It has been determined that the electric heating systems of pipelines may become a possible target for managing within the framework of the concept of effective demand management in the oil and gas fields, since their share in the energy consumption of these industrial enterprises, especially those located in areas with cold climates, is significant. In particular, this article discusses an electric heating system based on inductively-resistive heating (skin effect) of extended inter-site oil pipelines, through which oil extracted from bushes is transported to the site of the complex oil treatment installation.

The option of an energy-efficient skin-heating system for inter-site oil pipelines that is proposed in this work involves the installation of facilities of own generation at the enterprise based on renewable energy sources, in particular, on the basis of wind power plants in conjunction with electric power storage systems. Also, a new complete transformer substation will be installed at the facility to provide power from a wind power installation and an electric power storage system. The installation of rectifiers and inverters is also planned in this transformer substation. From the 10 kV switchgear of this step-up transformer substation, supply lines will go to existing transformer substations that supply skin-heating systems for inter-site oil pipelines. Since these substations are usually powered in 3 categories of reliability of power supply, it is necessary to replace their input cells in order to connect a second input to them from a newly installed substation, as well as to install a power control unit that executes commands of the enterprise's power supply control system to switch the system's power sources skin heating.

**Key words:** energy efficiency, aggregator, demand management, renewable energy, electricity storage system, wind farm, electric heating, oil pipeline.

### *Введение*

Вопросам повышения энергоэффективности промышленных предприятий посвящено большое количество работ, значительное число которых тем или иным образом сводится к выравниванию графиков нагрузок предприятия. Равномерность графика нагрузки предприятия в определенной степени сказывается на загрузке питающих магистральных линий электропередачи. Чем более равномерными и предсказуемыми будут графики нагрузки некоторого множества предприятий, подключённых к одной и той же магистральной линии электропередачи, тем проще будет системному оператору

планировать перетоки мощности. Однако когда в часы максимума энергосистемы возникает вопрос об ограничении энергопотребления предприятий, то не всякое предприятие способно отключить часть нагрузки или перевести ее на питание от установок собственной генерации. Это может быть связано с отсутствием на объекте собственных генерирующих мощностей или других устройств, способных компенсировать недостаток мощности на определенный промежуток времени. Для подобных целей, например в работах [1–10], рассматривается применение распределенной генерации (РГ), в том числе на базе возобновляемых источников энергии.

Среди данных работ можно выделить [10], которая посвящена оценке интеграции локальных источников питания (ЛИП) в систему электроснабжения предприятия (СЭС) и оптимизации их параметров. Однако в работе не рассматривается возможность применения систем накопления электроэнергии (СНЭ), а также их возможное влияние на СЭС промышленного предприятия, на его энергоэффективность. Влияние СНЭ на СЭС промышленного предприятия рассматривается в работе [11]. В данной работе также рассматриваются возможность использования тарифной политики в области электроэнергетики и применение СНЭ как потребителей-регуляторов нагрузки предприятия, что в значительной мере отличается от традиционных способов выравнивания графиков нагрузок. Однако в данной работе не рассматривается общий технико-экономический эффект от внедрения РГ в СЭС.

Все перечисленные работы не учитывают специфику организации СЭС предприятий нефтегазового сектора, в частности роль электрообогрева в их энергопотреблении. Например, в работе [12] приводится статистика увеличения доли энергопотребления систем промышленного электрообогрева как следствие смены источников тепла с водяного и парового теплоспутника на электрические способы обогрева. В данной работе также отмечается, что доля энергопотребления систем электрообогрева кустов эксплуатационных скважин составляет до 25 % в районах Заполярья и до 20 % в районе Среднего Приобья. Для технологических площадок — до 40 % в любом районе. Для линейных трубопроводов — до 90 % (нефтепроводы) и до 100 % (водоводы системы поддержания пластового давления) в районах Заполярья.

Таким образом, специфической особенностью предприятий нефтегазового сектора, особенно нефтегазопромысловых, расположенных в районах с холодным климатом, является значительная роль электрообогрева в их энергопотреблении и, соответственно, существенная доля в платежах за услуги электроснабжения.

Следует отметить, что 20 марта 2019 г. Правительством Российской Федерации под-

писано Постановление № 287, согласно которому с 1 июля 2019 г. запускается новый пилотный проект в сфере электроэнергетики, направленный на повышение эффективности и снижение расходов на энергоснабжение. В соответствии с изменениями, внесёнными в нормативную базу, к традиционным методам снижения стоимости потребляемой электроэнергии (энергоаудит, установка эффективного энергосберегающего оборудования, выбор оптимальных ценовых категорий и т.д.) добавляется новый механизм — эффективное управление спросом. Идея заключается в снижении собственного потребления электроэнергии на определённый уровень в указанные Системным оператором (СО) часы и получения за счёт этого вознаграждения. Это означает, что любое предприятие сможет активно влиять на эффективность работы рынка, снижать цены на электроэнергию по всему региону и получать за это деньги. При этом от потребителя не требуется значительных дополнительных финансовых затрат: достаточно наличия почасового учёта, возможности дистанционно передавать почасовые данные и регулировать свое потребление.

Целью данной работы является разработка концепции энергоэффективной системы электроснабжения нефтегазопромышленного предприятия для решения задач эффективного управления спросом.

#### *Обсуждение*

Поскольку объем электроэнергии, потребляемой системами промышленного обогрева, неуклонно растет, то в перспективе они будут оказывать все большее влияние на загрузку магистральных линий электропередачи, поэтому для разгрузки электрических сетей в рамках реализации проекта управляемого спроса авторами статьи предлагается управлять системами промышленного электрообогрева посредством перевода их питания с централизованного на собственную генерацию. Известно [13], что пилотный проект эффективного управления спросом предполагает использование энергосбытовых компаний в данном проекте в качестве Агрегатора спроса, который осуществляет взаимодействие между потребителями и СО. В свою очередь, СО

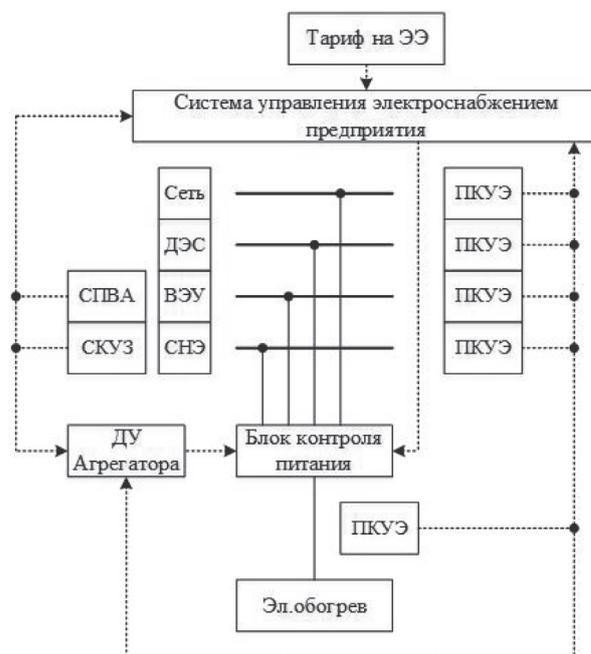
через Агрегатора будет подавать сигналы на снижение потребления в определённые часы. По итогам расчётного периода СО, на основе данных коммерческого учета, определится уровень выполнения поданных сигналов, соответственно, Агрегатор оплатит данные услуги своим клиентам.

Для выполнения подаваемых Агрегатором сигналов на снижение энергопотребления авторами статьи предлагается установка оборудования собственной генерации на стороне потребителя. В качестве источников собственной генерации предлагается использовать возобновляемые источники энергии (ВИЭ), которыми могут стать ветродизельные электростанции (ВДЭС).

Включение в состав ветроэнергетической установки (ВЭУ) дизельного генератора обусловлено тем, что сама по себе ВЭУ без дополнительного источника питания (в данном случае без ДЭС) не может гарантировано обеспечить требуемый объем электроэнергии. Объем электроэнергии будет варьироваться во времени произвольным характером, а ее качественные характеристики, такие как амплитуда, частота, форма кривой напряжения, также будут непостоянны ввиду сильной зависимости данных параметров от скорости ветра в заданном районе. Для приведения перечисленных выше параметров питания к нормируемому уровню применяется двухступенчатое управляемое преобразование — выпрямление-инвертирование. Однако стабилизировать непостоянство ветра нет возможности, поэтому возможны безветренные паузы. Для оценки ветрового потенциала предполагаемого района установки ВЭУ можно обратиться к карте ветров России, как это продемонстрировано в работах [14–16] или же к данным статистики по близлежащим метеостанциям для более точного прогнозирования. Точное прогнозирование ветра позволит сделать выводы о целесообразности применения ВЭУ на базе вертикально- или горизонтально-осевых ветрогенераторов, а также подобрать оптимальные параметры системы управления.

Помимо дизельного генератора в состав ВДЭС могут входить СНЭ, которые спо-

собны заряжаться от ветрогенератора или от ДЭС посредством выпрямителя. Питание нагрузки в таком случае осуществляется даже в безветренную погоду от аккумуляторов СНЭ через инверторы или от ДЭС. Таким образом, применение ВДЭС совместно с СНЭ для питания систем электрообогрева позволит обеспечить требуемый уровень надежности электроснабжения системы электрообогрева, а переключать источники питания системы электрообогрева можно будет даже дистанционно из пункта диспетчерского управления (ДУ) Агрегатора, если завести необходимые сигналы в АСДУЭ. Помимо сигналов от приборов контроля и учета электроэнергии (ПКУЭ) возможно, например, организовать передачу данных от системы прогнозирования ветровой активности (СПВА), а также от системы контроля и управления зарядом (СКУЗ) аккумуляторов СНЭ. Вариант организации системы электроснабжения для описанной системы эффективного управления спросом применительно к системе электрообогрева межплощадочных нефтепроводов представлен на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Функциональная схема электроснабжения системы электрообогрева межплощадочных нефтепроводов

В наличии имеется несколько источников питания. Блок «Сеть» представляет связь с централизованной системой электроснабже-

ния. Блоки «ДЭС», «ВЭУ», «СНЭ» представляют устанавливаемые на объекте дизельные электростанции, ветроэнергетические установки и системы накопления электроэнергии соответственно.

В систему управления электроснабжением предприятия стекается информация о количестве потребляемой и генерируемой электроэнергии. Система управления электроснабжением предприятия в соответствии с тарифным планом будет осуществлять управление блоками контроля питания потребителей электрообогрева таким образом, чтобы обеспечить наиболее экономически и технологически выгодный вариант питания в соответствующий период времени. Таким образом, появится возможность эко-

номить как посредством выполнения требований Агрегатора о снижении энергопотребления, так и по усмотрению предприятия путем перевода питания системы электрообогрева на питание от ВЭУ — возобновляемого источника энергии.

Также необходимо отметить, что ДЭС в предлагаемой схеме не являются основными источниками питания, и их подключение к нагрузке должно производиться при условии невозможности обеспечения потребителей электроэнергией от остальных, представленных в схеме источников.

На рисунке 2 упрощенно представлен возможный план электроснабжения системы электрообогрева межплощадочных нефтепроводов.

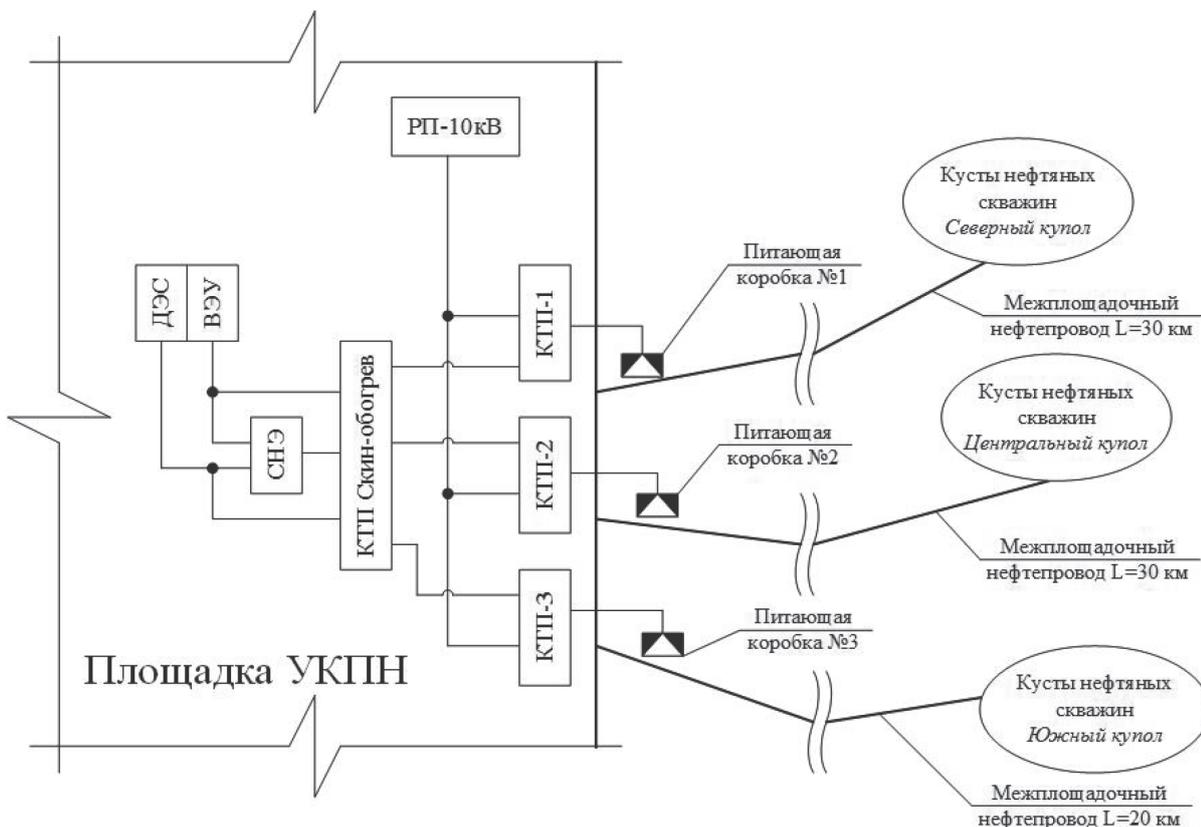


Рисунок 2. План электроснабжения системы электрообогрева межплощадочных нефтепроводов

Кусты нефтяных скважин на месторождении территориально объединены в Северный, Южный и Центральный купола. В пределах каждого купола осуществляется сбор нефти. Далее собранная нефть по межплощадочному нефтепроводу перекачивается до площадки установки комплексной подготовки нефти (УКПН). Обогрев межплощадочных

нефтепроводов осуществляется посредством системы скин-обогрева, называемой иначе системой индукционно-резистивного (ИР) нагрева.

Типовой вариант подвода электропитания и компоновка скин-системы обогрева нефтепроводов приведен рисунке 3 [17].



1 — высоковольтная линия; 2 — КТП; 3 — ИР-нагреватель;  
4 — ИР-проводник; 5 — теплоизоляция;  
6 — обогреваемый трубопровод

**Рисунок 3.** Типовой вариант подвода питания и компоновка системы скин-обогрева межплощадочных нефтепроводов

Целесообразно установить блок контроля питания, отвечающий за переключение источников питания системы электрообогрева, в существующих КТП (рисунок 2 и 2 на рисунке 3). КТП системы электрообогрева зачастую запитываются по 3-ей категории надежности электроснабжения отпайками от воздушных линий 10 кВ и не всегда оборудованы высоковольтными выключателями на вводе. Вместо выключателя может использоваться блок «разъединитель-предохранитель». Таким образом, установка блока контроля питания в существующих КТП предполагает замену шкафов ввода 10 кВ, так как планируется подключение второго ввода от установки собственной генерации на базе ВДЭС. Установка собственной генерации будет выдавать мощность при напряжении 10 кВ через вновь сооружаемую КТП, скин-обогрев, внутри которого также планируется установка выпрямителей для осуществления заряда аккумуляторов СНЭ и установка инверторов на низкой стороне для преобразования постоянного напряжения в

переменное и его последующей трансформации до 10 кВ.

### Выводы

Предлагаемая концепция энергоэффективной системы электроснабжения нефтегазового предприятия предполагает управление системами электрообогрева протяженных нефтепроводов с целью решения задач эффективного управления спросом. В соответствии с требованиями СО в часы максимума энергосистемы электрообогрев межплощадочных нефтепроводов предприятия будет переключаться на питание от установок собственной генерации на базе ВИЭ, что позволит разгрузить питающую сеть на единицы мегаватт в рамках реализации предлагаемой концепции для одного предприятия и на десятки мегаватт, если реализовывать концепцию повсеместно в районах с холодным климатом.

Возможные проблемы на пути к повсеместной реализации предлагаемого решения:

- высокая стоимость ветроэнергетических установок;

- высокая стоимость систем накопления электроэнергии;
- необходимость отвода земли для размещения установок собственной генерации;
- нежелание применять проектные решения, связанные с возобновляемой энергетикой, ввиду отсутствия типовых решений и неполноты нормативно-технической базы.

### Список литературы

1. Федоров В.К., Леонов Е.Н., Федоров Д.В. Влияние распределенной генерации на потери и качество электрической энергии // Омский научный вестник. 2016. № 6 (150). С. 72–76.
2. Харченко В.В., Гусаров В.А., Адомавичюс В.Б., Валицкас И.Ю. Выбор источников генерации для использования в микросетях на основе ВИЭ // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. № 240. С. 31–43.
3. Лапшин С.А., Харченко В.В. Система электроснабжения потребителей в сетях низкого напряжения с использованием различных источников энергии и управлением генерацией электроэнергии // Вестник аграрной науки Дона. 2015. Т. 4. № 32. С. 52–57.
4. Гусаров В.А., Лапшин С.А., Харченко В.В. Использование локальной генерации от возобновляемых источников энергии в тупиковых участках протяженных линий электропередачи низкого напряжения // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 7 (129). С. 15–18.
5. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Применение генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределенной генерации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 2. С. 30–45.
6. Крюков А.В., Алексеева М.С., Попов О.О. Влияние установок распределенной генерации на энергоэффективность систем электроснабжения // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2016. № 1. С. 212–216.
7. Georgilakis P.S., Hatziargyrios N.D. Optimal Distributed Generation Placement in Power Distributed Network: Models, Methods, and Future Research // IEEE Trans. Power Syst. August, 2013. Vol. 28, № 3.
8. Meera Shareef S.D., Vinod Kumar T. A Review on Models and Methods for Optimal Placement of Distributed Generation in Power Distribution Systems // IJEAR. Jan — June 2014, Vol. 4, Issue Spl-1.
9. Wong S.M. Some Aspect of Distribution System Planning in the Context of Investment in Distributed Generation: A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering. University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada. 2009. 153 p.
10. Казанов М.С. Разработка алгоритма оптимизации параметров и комплексной оценки эффекта внедрения локальных источников питания в системах электроснабжения потребителей с распределенной генерацией: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2017. 230 с.
11. Брагин А.А. Алгоритм формирования графиков электрических нагрузок предприятия с применением аккумуляторных батарей в качестве потребителей-регуляторов мощности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 20 с.
12. Фрайштетер В.П., Кудряшов Р.А. Электрические нагрузки и электропотребление систем электрообогрева трубопроводов на нефтяных промыслах северных районов Сибири // Промышленный электрообогрев и электроотопление. 2015. № 3–4. С. 42–53.
13. Управление спросом на электроэнергию [Электронный ресурс]. URL: <http://www.omesc.ru/dlya-abonentov/yuridicheskim-litsam/upravlenie-sprosom-na-elektroenergiyu>.
14. Степаненко В.П. Анализ перспектив применения в горной промышленности нетрадиционных возобновляемых источников энергии и суперконденсаторов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 1. С. 185–194.
15. Степаненко В.П. Выбор ресурсоберегающих источников и накопителей энергии в системах автономного энергоснабже-

ния//Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 2. С. 42–49.

16. Мингалеева Р.Д., Зайцев В.С., Бесель В.В. Оценка технического потенциала ветровой и солнечной энергетики России // Территория НЕФТЕГАЗ. 2014. № 3. С. 82–90.

17. Система ИРСН-15000 на основе скин-эффекта [Электронный ресурс]. URL: [https://sstprom.ru/products/skin\\_system](https://sstprom.ru/products/skin_system).

### References

1. Fedorov V.K., Leonov E.N., Fedorov D.V. Vliyanie raspredelennoi generatsii na poteri i kachestvo elektricheskoi energii [The Influence of Distributed Generation to Electric Power Losses and Quality]. *Omskii nauchnyi vestnik — Omsk Scientific Bulletin*, 2016, No. 6 (150), pp. 72–76. [in Russian].

2. Kharchenko V.V., Gusarov V.A., Adomavichyus V.B., Valitskas I.Yu. Vybor istochnikov generatsii dlya ispol'zovaniya v mikrosetyakh na osnove VIE [Selection of Generation Sources in RES-Based Microgrids]. *Naukovii visnik NUBiP Ukraini. Seriya: Tekhnika ta energetika APK — Scientific Bulletin of SUBN. Series: Machinery and Energy in APC*, 2016, No. 240, pp. 31-43. [in Russian].

3. Lapshin S.A., Kharchenko V.V. Sistema elektrosnabzheniya potrebiteli v setyakh nizkogo napryazheniya s ispol'zovaniem razlichnykh istochnikov energii i upravleniem generatsiei elektroenergii [The Power Supply System of Consumers in Low Voltage Networks Using Various Energy Sources and the Management of Electricity Generation]. *Vestnik agrarnoi nauki Dona — Bulletin of Don Agricultural Science*, 2015, Vol. 4, No. 32, pp. 52–57. [in Russian].

4. Gusarov V.A., Lapshin S.A., Kharchenko V.V. Ispol'zovanie lokal'noi generatsii ot vozobnovlyaemykh istochnikov energii v tupikovykh uchastkakh protyazhennykh linii elektroperedachi nizkogo napryazheniya [Using Local Generation from Renewable Energy Sources in Dead Ends of Long Low Voltage Power Lines]. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya — Alternative Energy and Ecology*, 2013, No. 7 (129), pp. 15–18. [in Russian].

5. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Primenenie geneticheskikh algoritmov dlya nastroiки avtomaticheskikh regulyatorov

ustanovok raspredelennoi generatsii [The Use of Genetic Algorithms for Tuning Automatic Regulators of Distributed Generation Facilities]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii — Information and Mathematical Technologies in Science and Management*, 2016, No. 2, pp. 30–45. [in Russian].

6. Kryukov A.V., Alekseeva M.S., Popov O.O. Vliyanie ustanovok raspredelennoi generatsii na energoeffektivnost' sistem elektrosnabzheniya [Influence of Distributed Generation Units on Energy Efficiency of Power Supply Systems]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Collection of Scientific Papers of the Angarsk State Technical University*, 2016, No. 1, pp. 212–216. [in Russian].

7. Georgilakis P.S., Hatzigargyrios N.D. Optimal Distributed Generation Placement in Power Distributed Network: Models, Methods, and Future Research. *IEEE Trans. Power Syst.*, August, 2013. Vol. 28, No. 3.

8. Meera Shareef S.D., Vinod Kumar T. A Review on Models and Methods for Optimal Placement of Distributed Generation in Power Distribution Systems. *IJEAR*, Jan — June 2014, Vol. 4, Issue Spl-1.

9. Wong S.M. Some Aspect of Distribution System Planning in the Context of Investment in Distributed Generation: A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering. University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada. 2009. 153 p.

10. Kazanov M.S. *Razrabotka algoritma optimizatsii parametrov i kompleksnoi otsenki effekta vnedreniya lokal'nykh istochnikov pitaniya v sistemakh elektrosnabzheniya potrebiteli s raspredelennoi generatsiei: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development of an Algorithm for Optimization of Parameters and a Comprehensive Assessment of the Effect of the Introduction of Local Power Sources in Consumer Power Systems with Distributed Generation: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Moscow, 2017. 230 p. [in Russian].

11. Bragin A.A. *Algoritm formirovaniya grafikov elektricheskikh nagruzok predpriyatiya s primeneniem akkumulyatornykh batarei v kachestve potrebiteli-regulyatorov moshchnosti: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Algorithm for Generating Graphs of Electrical Loads of an Enterprise Using Rechargeable

Batteries as Consumer Power Regulators: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Saint-Petersburg, 2013. 20 p. [in Russian].

12. Fraishteter V.P., Kudryashov R.A. Elektricheskie nagruzki i elektropotreblenie sistem elektroobogreva truboprovodov na neftyanykh promyslakh severnykh raionov Sibiri [Electric Loads and Electrical Energy Consumption of Pipelines Electric Heating Systems in North Siberian Oilfields]. *Promyshlenniye elektroobogrev i elektrootoplenie — Industrial Electric Heating and Electric Heating*, 2015, No. 3-4, pp. 42-53. [in Russian].

13. Upravlenie sprosom na elektroenergiyu [Electricity Demand Management]. URL: <http://www.omesc.ru/dlya-abonentov/yuridicheskim-litsam/upravlenie-sprosom-na-elektroenergiyu>. [in Russian].

14. Stepanenko V.P. Analiz perspektiv primeneniya v gornoi promyshlennosti netraditsionnykh vozobnovlyaemykh istochnikov energii i superkondensatorov [Analysis of Application Prospects in the Mining Industry Renewable and Combined Energy Storage]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-technicheskii zhurnal) — Mining*

*Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2017, No. 1, pp. 185-194. [in Russian].

15. Stepanenko V.P. Vybor resurso-sberegayushchikh istochnikov i nakopitelei energii v sistemakh avtonomnogo energosnabzheniya [Resource-Saving Energy Sources and Storage Units for Self-Contained Power Supply]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-technicheskii zhurnal) — Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2018, No. 2, pp. 42-49. [in Russian].

16. Mingaleeva R.D., Zaitsev V.S., Bessel' V.V. Otsenka tekhnicheskogo potentsiala vetrovoi i solnechnoi energetiki Rossii [Assessment of the Technical Potential of Wind and Solar Energy in Russia]. *Territoriya NEFTEGAZ — Territory of NEFTEGAZ*, 2014, No. 3, pp. 82-90. [in Russian].

17. Sistema IRSN-15000 na osnove skin-effekta [System IRSN-15000 Based on Skin Effect]. URL: [https://sstprom.ru/products/skin\\_system](https://sstprom.ru/products/skin_system). [in Russian].



**Ахметшин Р. С.**  
**Ahmetshin R. S.**

*кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Электроэнергетика  
и электротехника»,  
Набережночелнинский институт (филиал)  
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский)  
федеральный университет»,  
г. Набережные Челны,  
Российская Федерация*



**Пичугин П. И.**  
**Pichugin P. I.**

*магистрант кафедры «Техника  
и электрофизика высоких напряжений»,  
ФГБОУ ВО «Национальный  
исследовательский университет  
«Московский энергетический институт»,  
г. Москва, Российская Федерация*

УДК 621.318

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-48-55

## **ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОИНДУКЦИИ В НЕКОТОРЫХ ВОПРОСАХ РАБОТЫ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

В статье рассмотрен эффект взаимодействия магнитных полей двух и более проводников с токами в части увеличения (уменьшения) их результирующего индуктивного сопротивления, которое существенным образом влияет на функционирование того или иного электрического оборудования. В качестве такового были рассмотрены провода линий электропередачи, из-за многожильности которых возникает негативное для данного объекта явление взаимоиנדукции; заземлители в заземляющем устройстве подстанции, сопротивление которых является важным параметром и также зависит от данного явления. В качестве объектов, где наблюдается положительный эффект от явления взаимоиנדукции, были рассмотрены токоограничивающие реакторы и трансформаторы с расщеплённой обмоткой. Обозначены параметры и предложены технические решения, изменение и применение которых соответственно позволяют использовать данный эффект для энергоэффективного использования электротехнического оборудования и электрических сетей. Также приводятся возможности перспективных конструктивных изменений, уменьшающие проявление взаимоиנדукции в случае её негативного влияния. Утверждения о пользе или вреде явления были подтверждены аналитическими расчётами. В результате установлено, что применение полого единого провода для линий электропередачи позволит снизить его индуктивное сопротивление по сравнению с многожильным. На примере двух заземлителей показано, какой экономии стали можно добиться при их оптимальном расположении с сохранением результирующего сопротивления. На примере работы токоограничивающих реакторов был предложен способ, позволяющий увеличить токоограничивающий эффект посредством определённого расположения обмотки фазы реактора, при котором от явления взаимоиנדукции будет наблюдаться положительный эффект.

**Ключевые слова:** магнитный поток, взаимная индукция, собственная индуктивность, индуктивное сопротивление, провода, заземлители, токоограничивающие реакторы, электрические потери, трёхфазные ЛЭП, заземляющее устройство.

## MUTUAL INDUCTION INFLUENCE ON SPECIFIC TERMS OF ELECTRICAL EQUIPMENT AND ELECTRICAL CIRCUITS USE AND OPERATION

This article points to the different effect of the interaction of the magnetic fields of two or more conductors with currents in terms of increasing (decreasing) their final inductive reactance, which affects the functioning of a particular piece of electrical equipment significantly. As such, power line wires were considered, the multicore nature of which causes a mutual induction phenomenon, negative for this object, grounding conductors in the switching station's grounding device, the resistance of which is an important parameter and is also dependent on this phenomenon. Current-limiting reactors and split-winding transformers were selected as objects, which benefit from the mutual induction phenomenon. The parameters and technical solutions, the change and application of which will respectively allow using this effect for the energy-efficient use of electrical equipment and electrical circuits, have been indicated and proposed. The possibilities for advanced structural changes, that reduce the manifestation of mutual induction in case of its negative influence, are also introduced. Assumptions about the benefits or harms of the phenomenon have been backed by analytical calculations. As a result, it has been discovered, that the application of a single hollow wire for power lines will reduce its inductive reactance compared to a multi-core wire. Application of two grounding devices as an example showed how much steel could be saved, if they are optimally located, while maintaining the resulting resistance. Using the operation of current-limiting reactors as an example, a method, allowing to increase the current-limiting effect by means of a specific arrangement of the reactor phase winding, in which the phenomenon of mutual induction will have a positive effect, was proposed.

**Key words:** magnetic flux, mutual induction, self-inductance, inductive reactance, wires, grounding, current-limiting reactors, electric losses, three-phase power transmission lines, grounding device.

### Введение

В теоретических основах электротехники имеются понятия «поток самоиндукции», «взаимная индукция» и «взаимная индуктивность» двух контуров с током, которые иллюстрируются на рисунке 1.

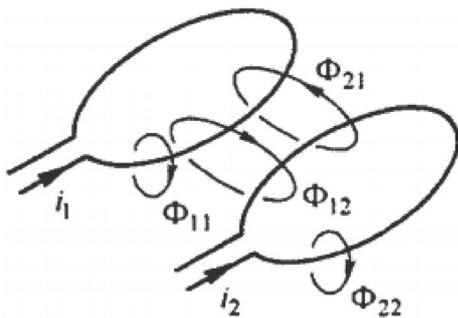


Рисунок 1. Потокосцепления двух контуров с током

При протекании тока  $i_1$  в первом контуре и тока  $i_2$  во втором контуре первым контуром создаётся магнитный поток  $\Phi_1$ , часть которого  $\Phi_{11}$  пронизывает только первый контур, а другая часть  $\Phi_{12}$  замыкается через второй контур (рисунок 1). Тогда поток  $\Phi_{11}$  называется потоком самоиндукции, а поток  $\Phi_{12}$ , сцепляющийся со вторым контуром и определя-

емый током в первом контуре, называется потоком взаимной индукции [1]. Аналогичны рассуждения и для второго контура.

Коэффициент пропорциональности между потоком взаимной индукции  $\Phi_{12}$  и током  $i_1$  в первом контуре называется взаимной индуктивностью  $M$  двух контуров, она зависит от взаимного расположения, геометрических размеров контуров и от магнитной проницаемости среды [2]. Математически данная зависимость выражается следующим образом:

$$M = \frac{\Phi_{12}}{i_1} = \frac{\Phi_{21}}{i_2}.$$

Если изменяется поток взаимной индукции  $\Phi_{12}$ , сцепляющийся со вторым контуром, то в этом контуре наводится электродвижущая сила (ЭДС)  $e_{2M}$ . Достичь её возникновения можно изменением либо тока  $i_1$  в первом контуре, либо изменением взаимной индуктивности  $M$ . В данной статье рассматривается только первый случай. Описанное явление называется явлением взаимной индукции, а упомянутая ЭДС называется ЭДС взаимной индукции.

В соответствии с принципом электромагнитной инерции Ленца возникающие ЭДС

стремятся препятствовать всякому изменению потока, сцепляющемуся с контурами. Иными словами, при возрастании (убывании) потока через контур наведённая в нём ЭДС стремится вызвать ток такого направления, чтобы создаваемый им магнитный поток препятствовал соответствующему изменению потока взаимной индукции:

$$e_{2M} = -M \frac{di_1}{dt}.$$

Данная закономерность верна и для двух проводников, поскольку контур можно представить как совокупность трубок тока.

Явление взаимной индукции играет огромную роль в электроэнергетике и электротехнике. Ярким примером этого являются трансформаторы, действие которых основано на явлении взаимной индукции, благодаря которому происходит наведение ЭДС во вторичной обмотке при изменении тока в первичной обмотке и, следовательно, передача энергии из первичной цепи во вторичную. Несмотря на то, что явление взаимной индукции находит полезное применение в различных аппаратах и машинах, иногда оно может быть крайне нежелательным. Например, при близком расположении с линией электропередачи (ЛЭП) линии связи в последней наблюдается наведение ЭДС взаимной индукции, приводящее к помехам в работе линии связи [3].

Целью данной статьи является оценка степени положительного или негативного влияния явления взаимной индукции в некоторых практических задачах электроэнергетики, анализ возможных сфер полезного использования явления, а также методов борьбы с ним при негативном эффекте.

#### *Многожильность проводов для передачи электроэнергии*

Наибольшее распространение на воздушных линиях (ВЛ) получили неизолированные сталеалюминиевые провода. Стальной сердечник служит для обеспечения необходимой механической прочности, а токопроводящей частью является алюминий. Проводимость стального сердечника не учитывается, как и поверхностный эффект, которым при промышленной частоте 50 Гц можно пренебречь вследствие значительной толщины проникновения тока в проводник. Как традиционные, широко применяемые сталеалюминие-

вые провода марок АС, АСКС, АСКП и АСК, так и инновационные с алюминиевыми сплавами или компактные профилированные провода являются многопроволочными, то есть поверх стального сердечника располагаются алюминиевые проволоки, скрученные или уложенные определённым образом.

Заметим, что каждая жила оказывает магнитное влияние вследствие явления взаимной индукции, что приводит к возникновению в каждой жиле противодействующей электродвижущей силы, эффект от которой аналогичен повышению индуктивного сопротивления жилы. С другой стороны, в отношении протекания тока многожильность провода означает параллельное соединение токопроводящих жил в схеме замещения и уменьшение результирующего сопротивления всего провода. Отсюда возникает необходимость сравнения индуктивных сопротивлений многожильных проводов и проводов, токопроводящая часть которых была бы представлена полым цилиндром вместо набора жил.

Выполним соответствующую оценку на конкретном примере, взяв для расчётов сталеалюминиевый провод АС 70/11 длиной  $l=1$  м, состоящий из  $n=6$  алюминиевых проволок диаметром  $d_0=3,8$  мм, симметрично расположенных вокруг стального сердечника диаметром  $d_{\text{серд}}=3,8$  мм (рисунок 2).

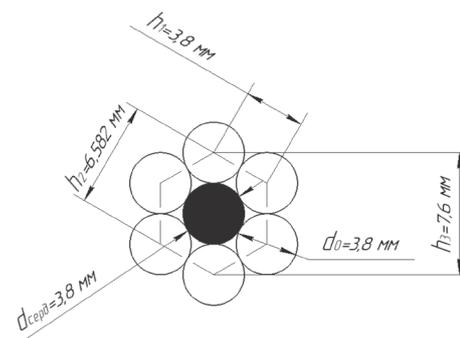


Рисунок 2. Расчётная модель провода АС 70/11

Каждая жила обладает внешней  $L_{\text{внеш}}$  и внутренней  $L_{\text{внут}}$  индуктивностями (суммарно собственная индуктивность  $L$ ), а также магнитно связана с двумя соседними жилами с коэффициентом взаимной индукции  $M_1$ , с двумя жилами по другую сторону от соседних с коэффициентом взаимной индукции  $M_2$ , а также с одной дальней противоположной жилой с коэффициентом взаимной индукции  $M_3$ .

Поскольку в каждой жиле ток имеет одинаковое направление, то её можно представить на схеме замещения собственной индуктивностью  $L$  и тремя вышеперечисленными индуктивностями  $M_i$  ( $i=1, 2, 3$ ), которые вносятся со знаком «+» и приносят жиле дополнительное индуктивное сопротивление.

В силу симметрии проводника каждая жила находится в равных условиях, а потому обладает одним и тем же индуктивным сопротивлением  $X_0$ .

Поскольку ток растекается по жилам равномерно, то результирующее сопротивление всего провода  $X_1$  находится как параллельное соединение жил:

$$X = \frac{X_0}{n}. \quad (1)$$

Индуктивное сопротивление одной жилы  $X_0$  можно найти по следующей формуле:

$$X_0 = 2\pi f(L + 2M_1 + 2M_2 + M_3), \quad (2)$$

где  $f$  — частота тока, протекающего по жиле,  $f=50$  Гц;

Далее используем расчётные формулы из [4]. Собственная индуктивность  $L$  одиночного прямолинейного провода круглого сечения находится по следующей формуле (внутренняя индуктивность материала жилы учтена в ней):

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4} \right), \quad (3)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная (относительная магнитная проницаемость алюминия с большой степенью точности равна 1),  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

$r$  — радиус поперечного сечения жилы,  $r=d_0/2=1,9$  мм.

Взаимная индуктивность двух прямолинейных проводов круглого сечения  $M$  находится по формуле:

$$M_i = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{h_i} - 1 \right), \quad (4)$$

где  $h_i$  — расстояние между проводами (центрами).

Данная формула справедлива при условии  $h \ll l$ , что имеет место в дальнейших расчётах.

Из рисунка 2 определяем расстояния между жилами для нахождения трёх вышеупомянутых взаимных индуктивностей. Расстояние  $h_2$  находим как основание равно-

стороннего треугольника с углом при нём  $30^\circ$  в правильном шестиугольнике, который образуется при соединении центров жил:

$$h_1 = 2r = d_0 = 3,8 \text{ мм};$$

$$h_2 = 2 \cdot 2r \cdot \cos(30^\circ) = 2d_0 \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot 3,8 = 6,582 \text{ мм};$$

$$h_3 = 2r + d_{\text{серд}} = 2d_0 = 7,6 \text{ мм}.$$

Тогда индуктивное сопротивление одной жилы  $X_0$  по формуле (2) равно:

$$\begin{aligned} X_0 &= 2\pi f(L + 2M_1 + 2M_2 + M_3) = \\ &= \frac{2\pi f \mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4} + 2 \ln \frac{2l}{h_1} - 2 + 2 \ln \frac{2l}{h_2} - 2 + \ln \frac{2l}{h_3} - 1 \right) = \\ &= \mu_0 f l \left( \ln \frac{4l^2}{rh_3} + 2 \ln \frac{4l^2}{h_1 h_2} - \frac{23}{4} \right) = \\ &= 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 1 \cdot \left( \ln \frac{4 \cdot 1000^2}{1,9 \cdot 7,6} + \right. \\ &\quad \left. + 2 \ln \frac{4 \cdot 1000^3}{3,8 \cdot 6,582} - \frac{23}{4} \right) = 1,932 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Результирующее сопротивление всего провода  $X_1$  по формуле (1) равно:

$$X_1 = \frac{X_0}{n} = \frac{1,932 \cdot 10^{-3}}{6} = 3,22 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}.$$

Теперь подсчитаем индуктивное сопротивление  $X_2$  полого прямолинейного провода длиной  $l=1$  м кругового сечения, в котором набор жил заменён цельным алюминием. Сначала рассчитаем собственную индуктивность  $L$  для цельного полого провода:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{rc} - 1 \right), \quad (5)$$

где  $r$  — внешний радиус провода,  $r=d_0+d_{\text{серд}}/2=5,7$  мм;

$c$  — величина, значение которой берётся в таблице [4] в зависимости от отношения внутреннего радиуса полости к внешнему радиусу.

В нашем случае отношение внутреннего радиуса полости к внешнему (рисунок 3) равно 0,333. По таблице [4] интерполяцией определяем, что  $c=0,8153$ .

Индуктивность  $L$  для цельного полого провода по формуле (5) равна:

$$\begin{aligned} L &= \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{rc} - 1 \right) = \\ &= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}{2\pi} \left( \ln \frac{2000}{5,7 \cdot 0,8153} - 1 \right) = 1,0129 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}. \end{aligned}$$

Индуктивное сопротивление  $X_2$  полого прямолинейного провода:

$$X_2 = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50 \cdot 1,0129 \cdot 10^{-6} = 3,182 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}.$$

Отсюда видно, что индуктивное сопротивление многожильного провода больше индуктивного сопротивления такой же геометрии полого провода, разница в процентах составляет:

$$\Delta = \frac{X_1 - X_2}{X_1} \cdot 100\% = \frac{3,22 \cdot 10^{-4} - 3,182 \cdot 10^{-4}}{3,22 \cdot 10^{-4}} \cdot 100\% = 1,18\%.$$

Можно сделать вывод, что повышение сопротивления от влияния взаимной индукции не полностью компенсируется параллельным соединением жил в проводе. Превышение сопротивления хотя и не является значительным, но всё же обуславливает некоторые потери мощности при передаче мощности в линиях электропередачи. В связи с этим имеет смысл рассмотреть возможность эксплуатации трубчатого провода в ЛЭП. Помимо негативного влияния взаимной индукции между жилами многожильные провода имеют недостаток, заключающийся в том, что при повреждении одной из жил соседние жилы стремятся вытолкнуть её вследствие клинового эффекта (например для трапециевидного профиля) [5]. Очевидно, что полые провода лишены такого минуса.

Дополнительно выведем формулу для погонной индуктивности полого провода в трёхфазной сети в расчёте на одну фазу. Из [6] находим, что эквивалентная индуктивность одного провода  $L'$  в трёхфазной линии при симметричном режиме токов равна:

$$L' = L - M, \quad (6)$$

где  $L$  — собственная индуктивность полого провода по формуле (5);

$M$  — взаимная индуктивность между параллельными проводами длиной  $l$  с расстоянием между осями  $D$  при  $l \gg D$ :

$$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{D} - 1 \right).$$

Под расстоянием  $D$  понимают среднегеометрическое расстояние между проводами трёхфазной системы. Примем для расчёта номинальное напряжение 110 кВ, которому

соответствует среднегеометрическое расстояние  $D=5$  м.

Тогда эквивалентная индуктивность одного провода  $L'$  по формуле (6) равна:

$$L' = L - M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{rc} - 1 \right) - \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{D} - 1 \right) = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{D}{rc}.$$

Тогда формула для погонной индуктивности полого провода имеет вид:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{rc}.$$

Рассчитаем погонное сопротивление  $X$  такого провода на  $l=1$  км длины:

$$X = 2\pi fL' = 2\pi \cdot 50 \cdot 1000 \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \times \ln \frac{5000}{5,7 \cdot 0,8153} = 0,439 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}.$$

В справочных данных [7] для провода АС 70/11 даётся значение погонной индуктивности 0,444 Ом/км, что на 1,14 % больше рассчитанного значения для полого провода.

*Влияние друг на друга вертикальных заземлителей в заземляющем устройстве подстанции*

Более существенное негативное влияние явления взаимной индукции наблюдается в заземляющих устройствах, служащих для защиты людей и животных от напряжения прикосновения. Поскольку направление тока в заземляющих электродах при коротком замыкании одинаковое, то происходит наведение противодействующих ЭДС в каждом из электродов от соседнего, что ведёт к повышению их сопротивления и ухудшению растекания тока. Степень влияния электродов друг на друга характеризуется коэффициентом использования  $\eta$ , который приводится в справочных таблицах.

Практически проблема состоит в необходимости обеспечить нормируемое ПУЭ результирующее сопротивление заземляющего устройства, добиться которого зачастую приходится посредством неоправданно большой тратой материала заземлителей (в основном сталь).

На примере двух вертикальных стальных электродов круглого сечения проведём расчёт, ставящий целью выяснить, как можно

добиться уменьшения расхода стали при сохранении необходимого значения сопротивления заземляющего устройства (рисунок 3).

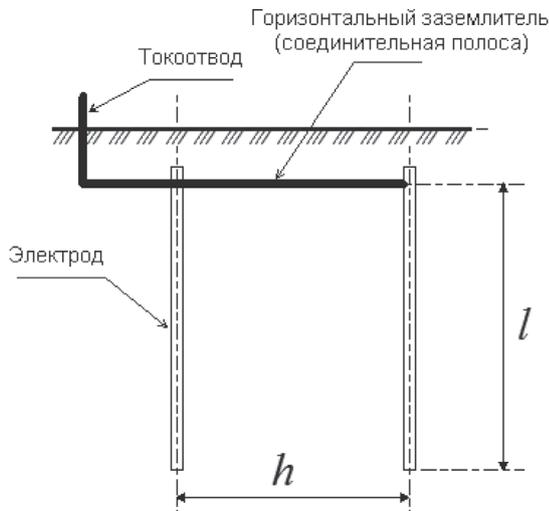


Рисунок 3. Конфигурация заземляющего устройства

Дальнейшие формулы для расчёта взяты из [8]. Сопротивление группы вертикальных электродов  $R_B$  находится по формуле:

$$R_B = \frac{r_B}{\eta_B n}, \quad (7)$$

где  $r_B$  — сопротивление одного вертикального электрода, Ом;

$\eta_B$  — коэффициент использования группы вертикальных электродов;

$n$  — число электродов. В расчёте  $n=2$ .

Сопротивление одного вертикального электрода  $r_B$  находится следующим образом:

$$r_B = \frac{0,366\rho}{l} \left( \lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right), \quad (8)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление земли. Принимаем в качестве почвы чернозём,  $\rho=50$  Ом·м;

$l$  — длина электрода,  $l=5$  м;

$d$  — внешний диаметр электрода, принимаем  $d=16$  мм;

$t$  — глубина заложения электрода, примем  $t=3,2$  м.

Для начала подсчитаем результирующее сопротивление данной пары электродов  $R_B$ , находящихся на расстоянии  $h=l=5$  м друг от друга. По таблице [8] определяем, что коэффициент использования для двух вертикальных электродов и  $h/l=1$  равен  $\eta_B=0,84$ .

Сопротивление одного вертикального электрода  $r_B$  по формуле (8):

$$\begin{aligned} r_B &= \frac{0,366\rho}{l} \left( \lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right) = \\ &= \frac{0,366 \cdot 50}{5} \left( \lg \frac{2 \cdot 5}{16 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 3,2 + 5}{4 \cdot 3,2 - 5} \right) = \\ &= 10,889 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Сопротивление данной пары электродов  $R_B$  по формуле (7):

$$R_B = \frac{r_B}{\eta_B n} = \frac{10,889}{0,84 \cdot 2} = 6,482 \text{ Ом.}$$

Из формулы для взаимной индуктивности двух прямолинейных проводников следует, что уменьшить взаимную индуктивность  $M$  (повысив коэффициент использования) можно уменьшением длины электрода  $l$  или увеличением расстояния  $h$  между ними. Анализируя формулу для сопротивления одиночного электрода, делаем вывод, что увеличение длины электрода приведёт к увеличению его сопротивления.

Единственным вариантом остаётся увеличение расстояния  $h$  между электродами. Теперь расположим второй электрод дальше от первого так, чтобы выполнялось равенство  $h/l=2$ . Для этого отношения новый коэффициент использования  $\eta_{B1}=0,91$ . Поскольку мы условились сохранить значение сопротивления  $R_B$  постоянным, то за счёт увеличения коэффициента использования можно увеличить сопротивление одиночного электрода  $r_B$ . Уменьшим диаметр  $d$  электрода, тем самым снизив количество стали, идущее на изготовление электрода.

Новое сопротивление одиночного электрода  $r_B$ :

$$r_B = \eta_{B1} n R_B = 0,91 \cdot 2 \cdot 6,482 = 11,797 \text{ Ом.}$$

Получаем уравнение:

$$\begin{aligned} r_B &= \frac{0,366\rho}{l} \left( \lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right) = \\ &= \frac{0,366 \cdot 50}{5} \left( \lg \frac{2 \cdot 5}{d \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 3,2 + 5}{4 \cdot 3,2 - 5} \right) = 11,797 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Решая уравнение, находим новый диаметр электрода  $d_0=9,04$  мм.

Представляя стальной электрод как цилиндр, найдём приблизительно экономию стали по массе для двух электродов  $\Delta m$ :

$$\Delta m = 2\gamma\pi \left( \frac{d^2}{4} - \frac{d_0^2}{4} \right) l,$$

где  $\gamma$  — плотность стали,  $\gamma=7800$  кг/м<sup>3</sup>.

Экономия стали составит:

$$\Delta m = 2\gamma\pi \left( \frac{d^2}{4} - \frac{d_0^2}{4} \right) l = 2 \cdot 7800 \cdot \pi \times \\ \times \left( \frac{(16 \cdot 10^{-3})^2}{4} - \frac{(9,04 \cdot 10^{-3})^2}{4} \right) \cdot 5 = 10,68 \text{ кг.}$$

Заметим, что экономия стали по массе составляет 68 % от суммарной массы двух электродов первоначального диаметра и расположенных друг к другу ближе на длину электрода.

Отсюда делаем вывод о высокой эффективности более дальнего расположения электродов (при позволении условий местности) и попутного уменьшения диаметра электродов.

*Явление взаимовлияния в сдвоенных токоограничивающих реакторах и трансформаторах с расщеплённой обмоткой*

Токоограничивающим реактором (ТР) называют электрический аппарат (катушку), предназначенный для ограничения ударного тока короткого замыкания (КЗ) посредством последовательного включения в цепь и работающий как дополнительное индуктивное сопротивление [9].

Разновидностью ТР являются сдвоенные токоограничивающие реакторы. Они имеют в средней точке вывод, от которого отходят две индуктивности (одна фаза), встречно сходящиеся в выводе (рисунок 4).

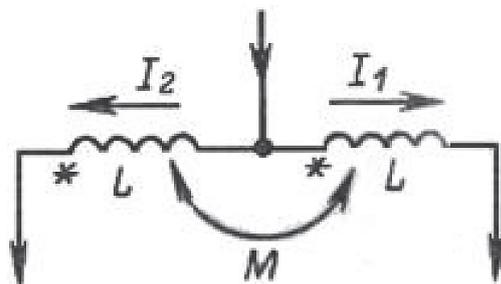


Рисунок 4. Электрическая схема сдвоенного ТР

Явление взаимоиנדукции в сдвоенных реакторах с пользой используется в разных режимах. Поскольку катушки включены встречно, то результирующее индуктивное сопротивление каждой ветви падает, что приводит к снижению потери напряжения в номинальном режиме.

При КЗ на одной из ветвей ток КЗ значительно больше тока в неповрежденной ветви, и, следовательно, влиянием взаимоиנדукции, уменьшающим индуктивное сопротивление ветви, можно пренебречь.

Если же на концах ветвей расположены генераторы, и произошло КЗ на одной из ветвей, то токи в двух остальных ветвях протекают в одном направлении к точке КЗ. Поскольку в этом случае катушки включены согласно, индуктивное сопротивление катушки ветви с КЗ повышается, что приводит к значительному токоограничивающему эффекту.

Обойтись без токоограничивающих реакторов позволяет эксплуатация трансформаторов с расщеплённой обмоткой, например ТРДН. Благодаря определённому включению двух обмоток со стороны низкого напряжения явление взаимоиנדукции позволяет уменьшить ток КЗ в 1,5–2 раза по сравнению с трансформатором без расщеплённой обмотки.

Принцип действия обычного ТР основан на явлении самоиндукции. Обмотки соседних фаз ТР включают встречно, чтобы ограничить действие электродинамических усилий в момент КЗ. Однако нам представляется возможным конструктивное выполнение одной фазы ТР так, чтобы она была представлена согласным включением двух магнитно-связанных катушек, что повысит индуктивность и токоограничивающие свойства реактора.

### Выводы

Явление взаимоиנדукции играет важную роль в электроэнергетических вопросах и даёт разный эффект в тех или иных случаях. В некоторых случаях представляется возможным эффективно нивелировать негативное влияние взаимоиנדукции или разработать конструктивное решение, уменьшающее его, а иногда извлечь из него пользу. Например, из-за многожильности проводов линий электропередачи имеет место негативное влияние взаимоиנדукции, которое повышает индуктивное сопротивление провода, что ведёт к дополнительным потерям электрической энергии при её передаче. В совокупности с другими факторами имеет смысл рассмотреть возможные варианты эксплуата-

ции цельных полых проводов, в которых явление взаимной индукции не наблюдается. Было установлено, что если уменьшить диаметр заземлителей в заземляющем устройстве подстанции и сократить влияние взаимной индукции путём отдаления их друг от друга, можно добиться экономии стали на

производство заземлителей. В токоограничивающих реакторах можно рассмотреть вопрос о согласном включении частей обмотки фазы реактора для того, чтобы они взаимно увеличивали своё индуктивное сопротивление и улучшали токоограничивающий эффект.

### Список литературы

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 3 т. 4-е изд. СПб.: Питер, 2003. Т. 1. 463 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. 9-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1996. 638 с.
3. Попов В.С., Николаев С.А. Общая электротехника с основами электроники. М.: Энергия, 1972. 504 с.
4. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчёт индуктивностей: справочная книга. Ленинград: Энергия, 1986. 488 с.
5. Лопарев В.В., Образцов Ю.В. Об особенностях современных неизолированных проводов для воздушных линий электропередачи // Кабели и провода. 2014. № 6. С. 9–15.
6. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 3 т. 4-е изд. СПб.: Питер, 2003. Т. 3. 377 с.
7. Ершевич В.В., Зейлингер А.Н., Илларионов Г.А. и др. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под ред. С.С. Рокотяна, И.М. Шапиро. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 352 с.
8. Найфельд М.Р. Заземление, защитные меры электробезопасности. М.: Энергия, 1971. 312 с.
9. Токоограничивающий реактор. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Токоограничивающий\\_реактор](https://ru.wikipedia.org/wiki/Токоограничивающий_реактор) (дата обращения: 03.08.2019).

### References

1. Demirchyan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: uchebnik dlya vuzov: v 3 t.* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Textbook for High Schools: in 3 Vol.]. 4 ed. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2003. Vol. 1. 463 p. [in Russian].

2. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektricheskie tsepi* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electric Circuits]. 9 ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1996. 638 p. [in Russian].

3. Popov V.S., Nikolaev S.A. *Obshchaya elektrotekhnika s osnovami elektroniki* [General Electrical Engineering with the Basics of Electronics]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 504 p. [in Russian].

4. Kalantarov P.L., Tseitlin L.A. *Raschet induktivnostei: spravochnaya kniga* [Inductance Calculation: A Reference Book]. Leningrad, Energiya Pobl., 1986. 488 p. [in Russian].

5. Loparev V.V., Obratsov Yu.V. Ob osobennostyakh sovremennykh neizolirovannykh provodov dlya vozdushnykh linii elektroperedachi [On the Features of Modern Non-Insulated Wires for Overhead Power Lines]. *Kabeli i provoda — Cables and Wires*. 2014, No. 6, pp. 9–15. [in Russian].

6. Demirchyan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: uchebnik dlya vuzov: v 3 t.* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Textbook for High Schools: in 3 Vol.]. 4 ed. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2003. Vol. 3. 377 p. [in Russian].

7. Ershevich V.V., Zeilinger A.N., Illarionov G.A. e.a. *Spravochnik po proektirovaniyu elektroenergeticheskikh sistem* [Handbook for the Design of Electric Power Systems]. 3d ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 352 p. [in Russian].

8. Naifel'd M.R. *Zazemlenie, zashchitnyye меры elektrobezopasnosti* [Grounding, Protective Electrical Safety Measures]. Moscow, Energiya Publ., 1971. 312 p. [in Russian].

9. *Tokoogranichivayushchii reaktor* [Current Limiting Reactor]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Токоограничивающий\\_реактор](https://ru.wikipedia.org/wiki/Токоограничивающий_реактор) (assessed 03.08.2019). [in Russian].



*Галимова А. А.*

**Galimova A. A.**

*кандидат технических наук,*

*доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника»,*

*ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,*

*г. Самара, Российская Федерация*

УДК 621.316

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-56-60

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОТНОСИТЕЛЬНОГО СРОКА СЛУЖБЫ ТРАНСФОРМАТОРА В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

При выборе мощности трансформатора на этапе проектирования необходимы количественные оценки надежности и долговечности работы электрооборудования, эффективности затрат на сооружение системы электроснабжения. Особенно актуален этот вопрос для распределительных сетей 6–10 кВ, так как существенная часть подстанций этого класса напряжений находится на балансе потребителя, и он несет затраты на проектирование, сооружение и эксплуатацию этих подстанций. Срок службы трансформатора, а также аппаратов высокого и низкого напряжения подстанций зависит от класса напряжения, условий эксплуатации, работы силового электрооборудования в нормальном и аварийном режимах, а также от коэффициента загрузки трансформатора в различных режимах работы. Для распределительных трансформаторов максимальное значение КПД возникает при коэффициенте загрузки  $\beta=0,4 \div 0,5$ . На практике при выборе мощности трансформатора во многих случаях руководствуются экономическим коэффициентом загрузки, который равен  $\beta=0,6 \div 0,7$ . В распределительных трансформаторах с естественным масляным охлаждением типа ОН в установившемся режиме температура наиболее нагретой точки и металлических частей, соприкасающихся с изоляцией, не должна превышать 140 °С, температура, при которой обеспечивается нормальный срок службы трансформатора, — 98 °С. Превышение температуры на каждые 6 °С более 98 °С увеличивает скорость износа изоляции в 2 раза (так называемое 6-градусное правило), а, следовательно, значительно уменьшает срок службы трансформатора. Известно, что в 43,6 % случаев отказ работы трансформаторов мощностью до 2500 кВА происходит по причине нарушения изоляции. Основным компонентом, влияющим на температуру наиболее нагретой точки, является коэффициент загрузки  $\beta$ .

В статье рассмотрены влияние коэффициента загрузки масляного трансформатора для комплектных наружных трансформаторных подстанций напряжением 6–10 кВ, причины уменьшения его срока службы, влияние коэффициента загрузки трансформатора на износ изоляции и уменьшение срока службы его безопасной эксплуатации. Приведены методика и результаты расчета относительного срока службы трансформатора в зависимости от коэффициента загрузки, определены критерии выбора коэффициента загрузки в зависимости от мощности, структуры и типа потребителей электроэнергии.

**Ключевые слова:** мощность трансформатора, коэффициент загрузки, скорость износа изоляции, методика расчета относительного срока службы трансформатора для масляных трансформаторов.

## CALCULATION METHOD OF TRANSFORMER RELATIVE SERVICE LIFE IN DISTRIBUTION NETWORKS AT THE DESIGN STAGE

When choosing power of the transformer at a design stage quantitative assessment of reliability and durability of operation of electric equipment, efficiency of costs of a power supply system construction is necessary. This question is especially relevant for distribution networks of 6–10 kV as an essential part of substations of this class of tension is on balance of the consumer

and he incurs expenses for design, a construction and operation of these substations. Transformer service life and also devices of high and low voltage of substations depends on a class of tension, service conditions, operation of power electric equipment in the normal and emergency modes and also on transformer load factor in various operating modes. For distributive transformers the efficiency maximum value arises at load factor  $\beta=0.4 \div 0.5$ . In practice when choosing power of the transformer in many cases are guided by the economic load factor which is equal  $\beta=0.6 \div 0.7$ . In distributive transformers with natural oil ON cooling in the set mode temperature of the most heated point and the metal parts adjoining to isolation should not exceed  $140^{\circ}\text{C}$ , temperature at which normal service life of the transformer of  $98^{\circ}\text{C}$  is provided. Excess of temperature increases the speed of wear of isolation by each  $6^{\circ}\text{C}$  more than  $98^{\circ}\text{C}$  twice — the so-called 6-degree rule — and, therefore, considerably reduces transformer service life. It is known that in 43.6 % of cases failure in the functioning of transformers with a power up to 2500 kVA occurs for an isolation cause of infringement. The main component influencing temperature of the most heated point is load factor  $\beta$ .

In article influence of load factor of the oil transformer for complete external transformer substations of 6–10 kV, the reason of reduction of its service life is considered, influence of load factor of the transformer on wear of isolation and reduction of service life of its safe operation is considered. The technique and results of calculation of relative service life of the transformer depending on load factor are given, criteria for selection of load factor depending on the power, structure and type of consumers of the electric power are defined.

**Key words:** transformer power, load factor, speed of wear of isolation, a method of calculation of relative service life of the transformer for oil transformers.

При эксплуатации силовых трансформаторов существует множество факторов, снижающих срок нормальной работы трансформатора: возникающие в процессе работы перегревы, снижение магнитных свойств стали сердечника и увеличение потерь холостого хода, ухудшение диэлектрических свойств изоляции обмоток и выводов. Грамотное обслуживание и контроль за режимами работы в процессе эксплуатации позволяют поддерживать трансформатор и электрооборудование подстанции в работоспособном состоянии длительное время [1]. Однако ошибки при расчете и выборе оборудования трансформаторной подстанции на этапе проектирования невозможно исправить даже в процессе грамотной эксплуатации.

Трансформаторная подстанция является одним из ключевых разделов проекта системы электроснабжения. При этом параметры трансформатора зависят от мощности проектируемой системы электроснабжения и от режимов ее работы. Паспортные данные электрооборудования практически не содержат информации для потребителей [2].

При проектировании силовой трансформатор выбирается по мощности нагрузки, подключаемой к подстанции. На стадии проектирования выполняется сбор нагрузок электроприемников с учетом коэффициентов

одновременности, максимального использования и др. Такой расчет нагрузок оправдывает себя, если предприятие не планирует дальнейшего развития производства. В современных условиях, как правило, предприятия планируют развиваться, постепенно увеличивая объемы производства, поэтому выбор мощности трансформатора целесообразно выполнять по его номинальному значению.

Срок службы трансформатора определяет эффективную работу предприятия в перспективе. Срок нормальной работы трансформатора оценить сложно. Действительный срок службы зависит также от перенапряжений, возникающих в сети коротких замыканий, аварийных перегрузок. При допустимых перегрузках увеличение температуры некоторых частей трансформатора уменьшает его срок безотказной работы, поэтому потребитель должен контролировать работу аппарата [3, 4].

Степень загрузки трансформатора  $\beta$  существенно влияет на срок службы трансформатора и электрических аппаратов подстанции. Он определяет процент или относительную величину загруженности трансформатора относительно его номинальных параметров в рабочем режиме работы, а также влияет на допустимое время при перегрузке до 40 % [4].

Коэффициент загрузки влияет на КПД [5]. При правильно выбранном коэффициенте

загрузки потери в обмотках будут равны потерям холостого хода:

$$\Delta P_0 = \beta^2 \cdot \Delta P_K. \quad (1)$$

Тогда оптимальный коэффициент загрузки:

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_K}}. \quad (2)$$

Для трансформаторов распределительных сетей максимальное значение КПД наблюдается при загрузке на 40–50 %. На практике при выборе мощности трансформатора во многих случаях руководствуются загрузкой 70–75 %, которая позволяет работать трансформатору в аварийных режимах с допустимой перегрузкой. Такой процент загрузки часто называют экономическим.

Регламентирует допустимые нагрузки и перегрузки масляных трансформаторов ГОСТ 14209-97 (МЭК 354-91) «Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов» [6]. Температура рассчитывается для разных частей аппарата и зависит от мощности и системы охлаждения. Каждая группа имеет свои предельные значения по допустимым перегрузкам. И если трансформаторы большой мощности, как правило, эксплуатируются энергетиками, распределительные трансформаторы мощностью до 2500 кВА часто обслуживаются самими промышленными предприятиями и учреждениями различной сферы деятельности.

В распределительных трансформаторах, согласно таблице 1 [6], температура в установленном режиме должна быть не более 140 °С, а «... трансформатор с температурой наиболее нагретой точки, равной 98 °С, стареет нормально. Срок службы в этом случае составляет несколько десятков лет» [7, с. 21]. Скорость износа изоляции удваивается при каждом изменении температуры приблизительно на 6 °С [6, 7]. Это происходит и при увеличении нагрузки. Почти половина отказов в работе трансформаторов средней мощности происходит из-за нарушения изоляции [7]. Температура рассчитывается при неизменной нагрузке, а также для нагрузки, которая изменяется в течение интервала времени [4]. В системах электроснабжения предприятий нагрузку трансформатора целесообразно принимать в соответствии с отпус-

ной мощностью и проверять на допустимую перегрузку в аварийном режиме. Часто предприятия на начальном этапе развития не используют всю мощность, которую покупают у энергетиков. Но в процессе расширения мощность увеличивается, и при большой нагрузке трансформатора это приводит к увеличению потерь в обмотках и снижению напряжения на выходе подстанции.

В установленном тепловом режиме для трансформаторов средней мощности температуру можно рассчитать по зависимости (1), применив характеристики из таблицы 2 [6]. Максимальная температура наиболее нагретой точки определяется:

$$\Theta_h = 65 \cdot \beta + 23 \cdot \beta^{1,6} + 33, \quad (3)$$

где  $\beta$  — коэффициент загрузки трансформатора.

Рассчитав максимальную температуру по формуле (3), можно определить показатели термического износа изоляции:

$$V = A \cdot 2^{\frac{\Theta_h - 98}{6}}, \quad (4)$$

где  $A$  — постоянная, соответствует сроку службы при  $t=0^\circ$ ,  $A=0,112$ , срок службы определяется экспоненциальным отношением Монтсингер:

$$\text{Срок службы} = e^{-\rho \Theta_h}, \quad (5)$$

где  $\rho$  — постоянная.

Согласно [6], отношение Монтсингер дает оценку термического износа с запасом прочности. Расчет коэффициента выполняется в [8] в уравнении (1-3а) и принимается  $\rho=0,1155 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Чтобы определить полезный срок эксплуатации трансформатора, необходима количественная оценка его срока службы. В соответствии с [6] можно определить скорость износа изоляции, но невозможно составить прогноз сроков нормальной работы трансформатора, поэтому при проектировании системы электроснабжения важно иметь количественный критерий. Для количественной оценки автором предлагается коэффициент  $N$ . При температуре 98 °С коэффициент  $N=1$ . Таблица расчета коэффициента  $N$  приведена в [2]. Для  $N=1$  коэффициент загрузки  $\beta=0,77$ . Коэффициент  $N$  изменяется нели-

нейно, и снижение загрузки до 0,6–0,7 увеличивается срок службы в несколько раз.

Одним из важнейших параметров эффективной работы трансформатора является КПД, который зависит от потерь электрической мощности. Как известно, нагрузочные потери мощности в обмотках трансформатора также зависят от коэффициента загрузки  $\beta$  [9, 10]. Расчеты потерь мощности и КПД для масляных трансформаторов марки ТМ мощностью от 100 до 2500 кВА показали, что снижение загрузки трансформатора до 45–50 % увеличивает КПД на 1–2 %.

Стоимость трансформатора составляет не более 20 %, остальная часть — стоимость коммутационных аппаратов, релейная защита и автоматика и корпуса. Следовательно,

увеличение мощности значительно увеличит срок службы трансформатора.

### Выводы

Экономический коэффициент загрузки 0,7–0,75 можно рекомендовать для трансформаторов небольшой и средней мощности. Если предприятие имеет существенное потребление электроэнергии или планирует расширять производство в дальнейшем, рекомендуется загружать трансформатор не более чем на 50 %, при этом КПД будет также высоким. Если нагрузка, подключенная к трансформатору, близка к его номинальной мощности, срок службы значительно снижается. Уменьшение коэффициента загрузки также приводит к снижению потерь мощности в обмотках трансформатора и увеличению КПД.

### Список литературы

1. Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыков Р.Р. Учет потерь холостого хода трансформаторов в период эксплуатации при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 1–2. С. 53–63.

2. Галимова А.А. Выбор мощности трансформатора при проектировании систем электроснабжения // Состояние и перспективы развития электротехнологии: матер. Междунар. науч.-техн. конф. (XVII Бенардосовские чтения), 29–31 мая 2013 г. Иваново: Электроэнергетика, 2013. Т. I. С. 245–248.

3. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.

4. Галимова А.А. Критерии выбора коэффициента загрузки силового трансформатора при проектировании подстанций распределительных сетей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. № 5-6. С. 66-71.

5. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ. М.: Папирус Про, 2004. Т. II. 688 с.

6. ГОСТ 14209-97 (МЭК 354-91). Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов.

7. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. М.: Энергия, 1980. 208 с.

8. Цирель Я.А., Поляков В.С. Эксплуатация силовых трансформаторов на электростанциях и в электрических сетях. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 263 с.

9. Копылов И.П. Электрические машины: учебник для вузов. 5-е изд. М.: Высшая школа, 2006. 607 с.

10. Тульчинская Я.И. Оценка эффективности применения трансформаторов с низким коэффициентом загрузки // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 5. С. 580–590. URL: [http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Tulchinskaya/Tulchinskaya\\_4.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Tulchinskaya/Tulchinskaya_4.pdf).

### References

1. Gracheva E.I., Naumov O.V., Sadykov R.R. Uchet poter' kholostogo khoda transformatorov v period ekspluatatsii pri raschete poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh setyakh [Accounting Losses of Idling of Transformers in the Period of Exploitation at Calculation Losses of the Electric Power in Distributive Networks]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki — Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 2016, No. 1–2, pp. 53–63.

2. Galimova A.A. Vybora moshchnosti transformatora pri proektirovanii sistem elektrosnabzheniya [Transformer Power Selection in the Design of Power Supply Systems] *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-*

- tekhnicheskoi konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii» (XVII Benardosovskie chteniya), 29-31 maya 2013 g.* [Materials of the International Scientific and Technical Conference «State and Prospects for the Development of Electrotechnology» (XVII Benardos Readings), May 29–31, 2013]. Ivanovo, Elektroenergetika, 2013, Vol. I, pp. 245–248.
3. GOST 11677-85. Transformatory silovye. Obshchie tekhnicheskie usloviya. [State Standard 11677-85. Power Transformers. General Specifications].
  4. Galimova A.A. Kriterii vybora koeffitsienta zagruzki silovogo transformatora pri proektirovanii podstantsii raspredelitel'nykh setei [Criteria of Choice of Load of Power Transformer Factor at Planning of Substations of Distributive Networks]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki — Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 2013, No. 5–6, pp. 66–71.
  5. Makarov E.F. Spravochnik po elektricheskim setyam 0,4–35 kV i 110–1150 kV [Handbook of Electrical Networks 0.4–35 kV and 110–1150 kV]. Moscow, Papirus Pro Publ., 2004, Vol. II, 688 p.
  6. GOST 14209-97 (MEK 354-91). Rukovodstvo po nagruzke silovykh maslyanykh transformatorov [State Standard 14209-97 (IEC 354-91). Manual for Load Power Oil Transformers].
  7. Kish L. *Nagrev i okhlazhdenie transformatorov* [Transformer Heating and Cooling]. Moscow, Energiya Publ., 1980. 208 p.
  8. Tsirel' Ya.A., Polyakov V.S. Eksploatsiya silovykh transformatorov na elektrostantsiyakh i v elektricheskikh setyakh [Operation of Power Transformers in Power Plants and Electric Networks]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1985. 263 p.
  9. Kopylov I.P. *Elektricheskie mashiny: uchebnik dlya vuzov* [Electric Cars: Textbook for High Schools]. 5 ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 607 p.
  10. Tul'chinskaya Ya.I. Otsenka effektivnosti primeneniya transformatorov s nizkim koeffitsientom zagruzki [Evaluation of the Effectiveness of Application of Transformer with Low Load Factor]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2012, No. 5, pp. 580-590. URL: [http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Tulchinskaya/Tulchinskaya\\_4.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Tulchinskaya/Tulchinskaya_4.pdf).



**Решетняк М. Ю.**  
**Reshetnyak M. Yu.**

ассистент кафедры «Энергетика  
и энергоэффективность горной промышленности»,  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»,  
г. Москва, Российская Федерация

УДК 621.395.66

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-61-67

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПОВЕРХНОСТНОГО КОМПЛЕКСА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

В последнее время достаточно остро стоит вопрос снижения себестоимости добычи угля подземным способом. Этот фактор обусловлен значительными колебаниями цен на уголь в мировом масштабе. Россия входит в число стран-экспортеров угля на мировой рынок и занимает шестое место по объемам поставок. Нестабильность цен на мировом рынке углеводородов, а также увеличение числа месторождений со сложными горно-геологическими условиями вынуждают отечественные и зарубежные угледобывающие компании идти по пути разработки новых технологических и управленческих решений по снижению себестоимости добычи угля. Одним из таких решений следует назвать рост уровня энерговооруженности оборудования в высоконагруженных забоях угольных шахт, который обусловлен использованием современных высокопроизводительных механизированных комплексов. В настоящее время большинство высокопроизводительных комплексов угольных шахт включает в системы управления электроприводами технологических машин и установок преобразовательные устройства. Работа преобразовательных устройств связана со значительной генерацией высших гармоник в питающую электрическую сеть, негативно влияющих на качество электрической энергии в подземных сетях угольных шахт. Помимо негативного влияния в виде увеличения потерь в основных элементах подземной сети, высшие гармоники также негативно влияют на режимы работы оборудования, что сказывается на его характеристиках и производительности. По результатам проведенных экспериментальных исследований на понизительных подстанциях высокопроизводительной угольной шахты были получены коэффициенты  $n$ -ых гармонических составляющих напряжения, которые позволяют провести их оценку на соответствие параметрам качества электрической энергии. Установлено значительное отклонение фактических значений по суммарному коэффициенту гармонической составляющей от нормируемых ГОСТ 32144-2013 (для некоторых понизительных подстанции составляет превышение в 9,7 раза), что негативно влияет на работу основного технологического оборудования как на поверхности шахты, так и подземных условиях. В публикации предложено направление, способствующее контролю и улучшению качества электрической энергии в электрических сетях угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли.

**Ключевые слова:** электрическая энергия, угольная шахта, выемочный участок, электромагнитная совместимость, гармоники, энергетическая эффективность, показатели качества электрической энергии, гармоники.

## HARMONIC COMPOSITION STUDY IN ELECTRICAL NETWORKS OF SURFACE COMPLEX OF HIGH-PERFORMANCE COAL MINE

Recently, the issue of reducing the cost of coal mining by underground method is quite acute. This factor is due to significant fluctuations in coal prices on a global scale. Russia is among the countries exporting coal to the world market and ranks sixth in terms of supplies. The instability of

prices on the world market of hydrocarbons, as well as the increase in the number of deposits with complex mining and geological conditions force domestic and foreign coal mining companies to develop new technological and management solutions to reduce the cost of coal production. One of these solutions should be called the increase in the level of power equipment in high-loaded faces of coal mines, which is due to the use of modern high-performance mechanized complexes. Currently, the majority of high-performance complexes of coal mines includes conversion devices in the control systems of electric drives of technological machines and installations. The operation of the Converter devices is associated with a significant generation of higher harmonics in the power supply network, which negatively affect the quality of electrical energy in underground networks of coal mines. In addition to the negative impact in the form of increased losses in the main elements of the underground network, higher harmonics also negatively affect the operating modes of the equipment, which affects its characteristics and performance. According to the results of experimental researches on step-down substations high-performance coal mines was obtained the coefficients of the  $n$ -th harmonic voltage components that allow you to measure for compliance with the quality parameters of electric energy. A significant deviation of the actual values for the total coefficient of the harmonic component from the normalized GOST 32144-2013 (for some step-down substations is an excess of 9.7 times), which negatively affects the operation of the main process equipment both on the surface of the mine and underground conditions. In the publication the direction promoting control and improvement of quality of electric energy in electric networks of coal mines, including dangerous on sudden emissions of gas and dust is offered.

**Key words:** electrical energy, coal mine, excavation site, electromagnetic compatibility, harmonics, energy efficiency, quality indicators of electrical energy, harmonics.

В последнее время достаточно остро стоит проблема снижения себестоимости добычи угля подземным способом. Этот фактор обусловлен значительными колебаниями цен на уголь в мировом масштабе. Россия входит в число стран-экспортеров угля на мировой рынок и занимает в настоящее время шестое место по объемам поставок [1]. Нестабильность цен на мировом рынке углеводородов, а также увеличение числа месторождений со сложными горно-геологическими условиями вынуждают отечественные и зарубежные угледобывающие компании идти по пути разработки новых технологических и управленческих решений по снижению себестоимости добычи угля [2, 3]. Одним из таких решений следует назвать рост уровня энергооборуженности оборудования в высоконагруженных забоях угольных шахт, который обусловлен использованием современных высокопроизводительных механизированных комплексов [4, 5]. В настоящее время большинство высокопроизводительных комплексов угольных шахт включает в системы управления электроприводами технологических машин и установок преобразовательные устройства [6]. К таким устройствам относятся: тиристорные регуляторы (устройства плавного пуска); преобразователи частоты (двухзвенные и с непосредственной связью);

управляемые и неуправляемые выпрямители. Следует отметить, что вопросам электромагнитной совместимости, в частности влиянию высших гармоник на работу подземных потребителей угольных шахт, уделено недостаточно внимания, хотя в общепромышленном масштабе этот вопрос хорошо проработан [7–10]. Работа преобразовательных устройств связана со значительной генерацией высших гармоник в питающую электрическую сеть, негативно влияющих на качество электрической энергии в подземных сетях угольных шахт. Помимо негативного влияния на подземные электрические сети в виде увеличения потерь в основных элементах подземной сети высшие гармоники также негативно влияют на режимы работы оборудования, что сказывается на его характеристиках и производительности [11–13]. Кроме того, высшие гармоники передаются на питающие понизительные подстанции, расположенные на поверхности, поэтому анализ гармонического состава в электрических сетях понизительных подстанций угольных шахт является актуальной и требующей решения задачей.

Исследования показателей качества электрической энергии на соответствие требованиям ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических

средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [14] проведены на понизительных подстанциях шахты «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс», питающих как подземных потребителей электроэнергии, так и потребителей поверхностного комплекса, с использованием анализатора ПКЭ «Ресурс UF2MB-3П15-5». Исследования проводились на ПС-12 «Полысаевская», ПС-910 и ПС-948 в соответствии с [15]. Алгоритмы измерения показателей качества электрической энергии, установленные ГОСТ 32144–2013, определяют порядок расчета, отвечающий основному требованию непрерывности измерений. Анализатор обрабатывает аналоговый сигнал напряжения (тока) дискретно с высокой частотой: за один период основной частоты (0,02 с) с помощью аналого-цифрового преобразования производится 256 измерений. Это позволило с требуемой точностью определить действующее значение гармонической составляющей входного напряжения 40-го порядка, частота которой 2 кГц. Из полученных на каждом периоде действующих значений гармонических составляющих от 1-ой (50 Гц) до 40-ой гармоники рассчитывают среднее на  $i$ -ом интервале.

Длительность этого интервала принимается равной 8–16 периодам основной частоты, или 0,16–0,32 с и определяет длительность так называемого «окна измерения». Значение того или иного показателя качества электрической энергии определялось как среднеквадратическое значение по нескольким  $N$  измерениям.

По результатам проведенных экспериментальных исследований на подстанциях шахты «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс» были получены коэффициенты  $n$ -ых гармонических составляющих напряжения  $U_{ав}$ , представленные на рисунке 1 (ПС-12), рисунке 2 (ПС-910), рисунке 3 (ПС-948).

Анализ результатов исследований показателей качества электроэнергии на понизительных подстанциях ПС-12, ПС-910 и ПС-948 шахты «Полысаевская» позволяет сделать вывод, что качество электрической энергии соответствует предъявляемым тре-

бованиям по всем точкам измерения: по отклонению частоты, по коэффициенту искажения синусоидальности напряжения, по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности.

Анализ показателей качества электроэнергии на подстанциях по коэффициенту  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения показал, что практически по всему спектру гармонического состава имеются превышения допустимых значений, что является нарушением ГОСТ 32144-2013. Особенно это характерно для 5-ой и 7-ой гармоник, которые значительно превышают допустимый уровень по всем подстанциям. 5-ая гармоника на подстанции ПС-12 превышает допустимый уровень в 1,5 раза, на подстанции ПС-910 — в 1,65 раза, на подстанции ПС-948 — в 1,85 раза. Соответственно 7-ая гармоника на подстанции ПС-12 превышает допустимый уровень в 2,53 раза, на подстанции ПС-910 — в 1,5 раза, на подстанции ПС-948 — в 1,5 раза.

Анализ гармонического состава для четных гармоник на исследуемых подстанциях также показал, что наблюдается превышение допустимых значений.

Следует отметить, что ГОСТ 32144-2013 регламентирует также значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих, которые не должны превышать 5 % для напряжения 6 кВ. Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по суммарному коэффициенту гармонической составляющей напряжения (таблица 1) показал, что при нормируемой величине 5 % фактическое значение коэффициента на подстанциях превышает в 9,7 раза, в 7,5 и 8,4 раза соответственно.

Анализ времени проявления данных несоответствий показывает, что наиболее часто вышеперечисленные гармоники появляются при снижении нагрузки предприятия (ремонтные смены), а также при пусках оборудования. Это говорит о том, что наибольшее искажение параметров качества электрической энергии обусловлено оборудованием, работающим с преобразовательными устройствами.

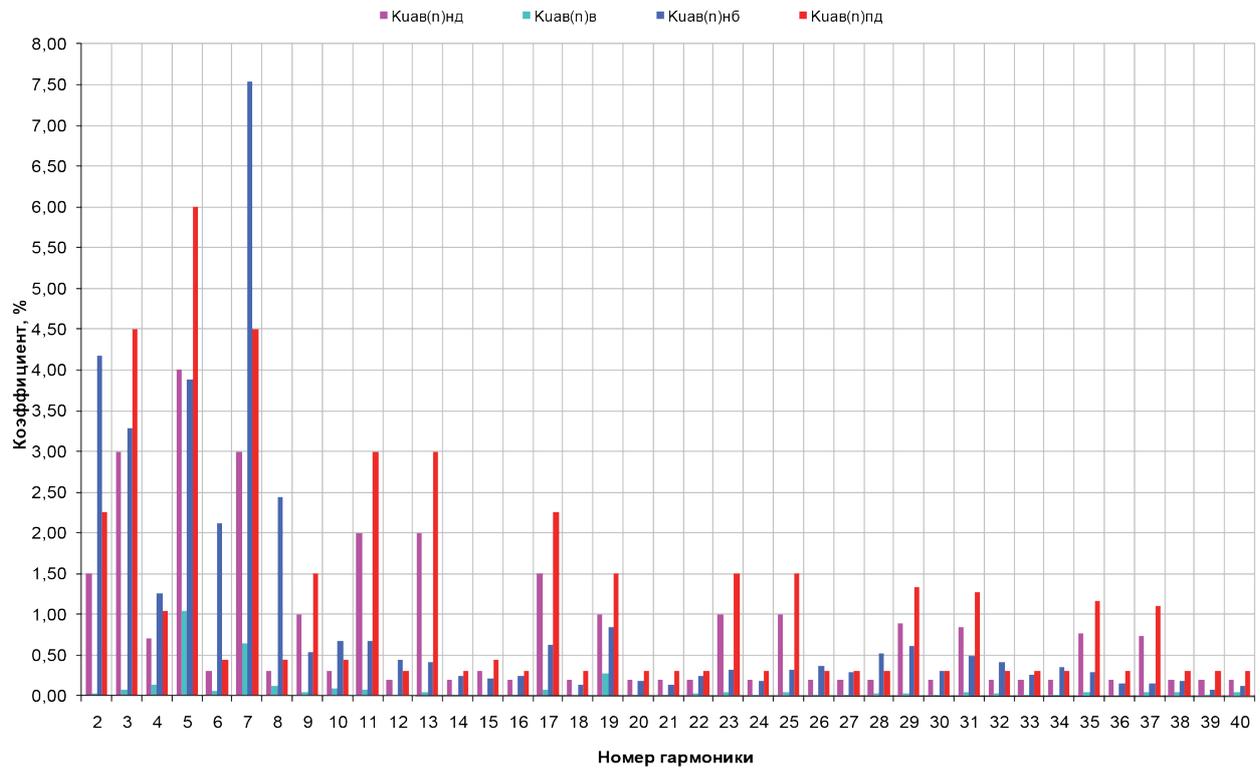


Рисунок 1. Коэффициенты  $n$ -ых гармонических составляющих напряжения  $U_{ав}$  по ПС-12

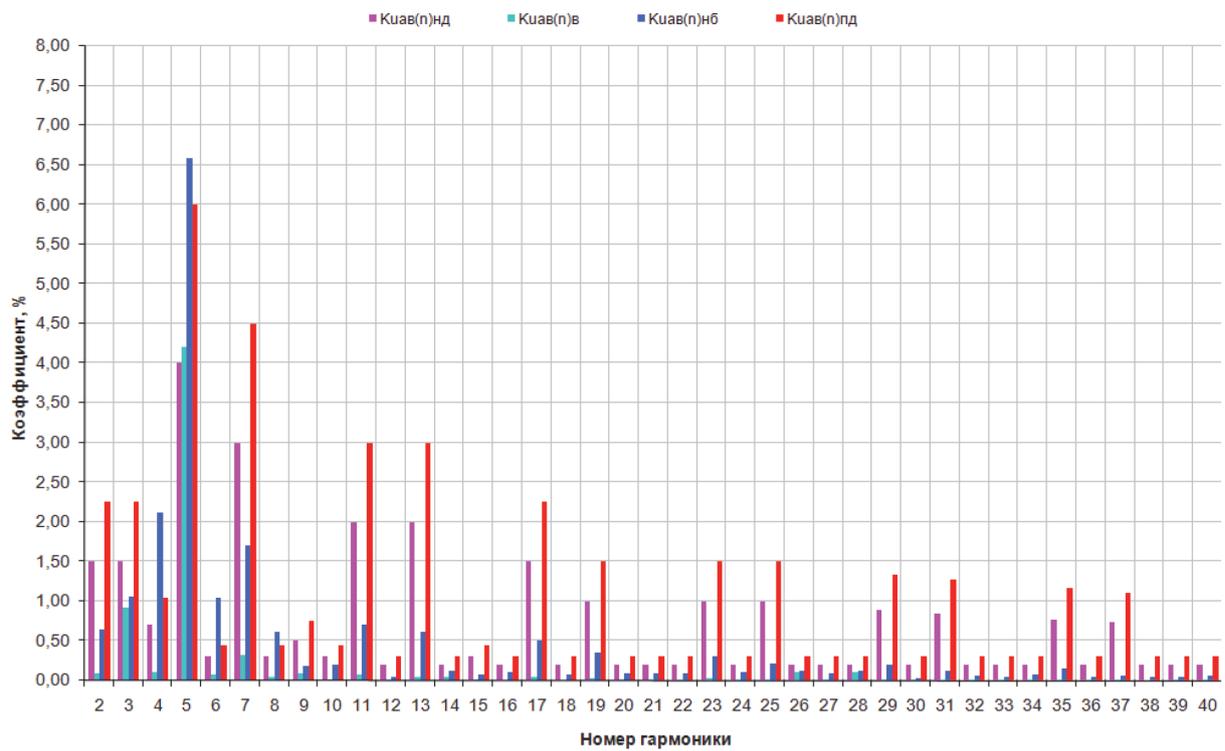


Рисунок 2. Коэффициенты  $n$ -ых гармонических составляющих напряжения  $U_{ав}$  по ПС-910

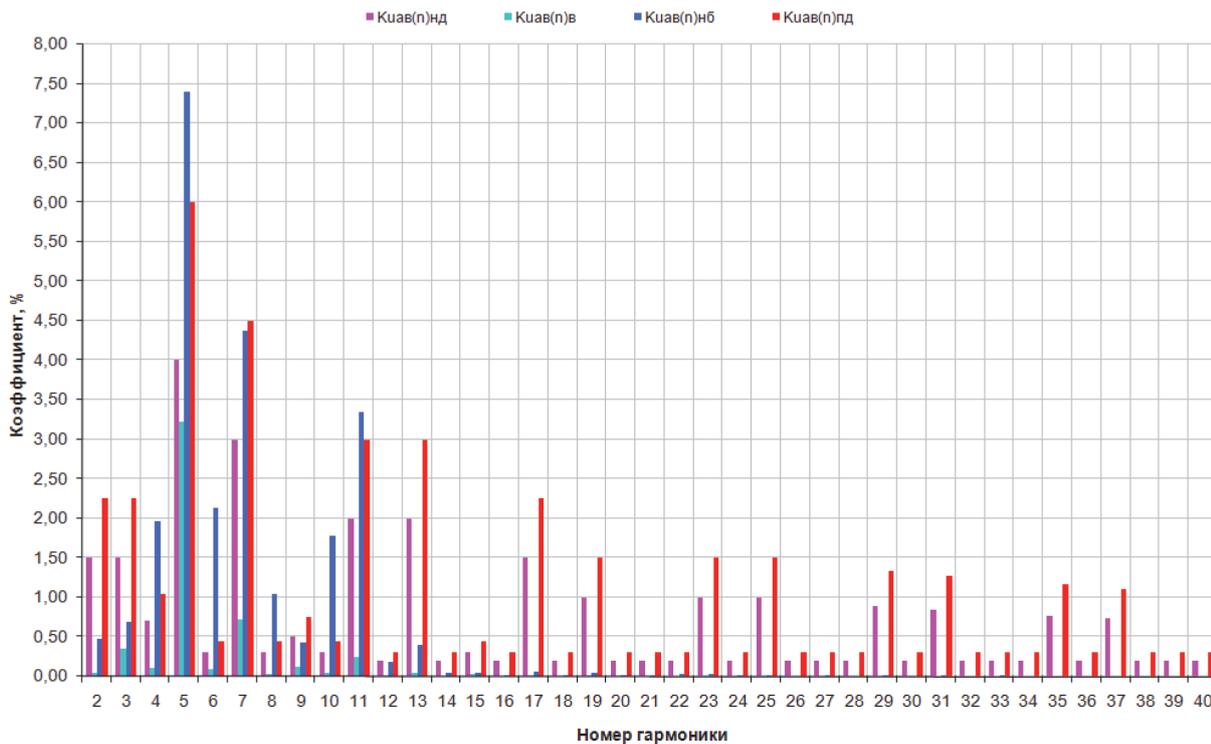


Рисунок 3. Коэффициенты  $n$ -ых гармонических составляющих напряжения  $U_{ав}$  по ПС-948

Таблица 1. Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по суммарному коэффициенту гармонической составляющей напряжения

Показатель	Допустимые пределы по ГОСТ 32144-2103 (уровень напряжения 6 кВ), %	ПС-12, %	ПС-910, %	ПС-948, %
Суммарное значение напряжений нечетных гармонических составляющих	—	34,90	29,20	30,85
Суммарное значение напряжений четных гармонических составляющих	—	13,58	8,50	10,90
Суммарное значение напряжений гармонических составляющих	5,00	48,48	37,70	41,75

### Выводы

В результате исследования установлено значительное отклонение фактических значений по суммарному коэффициенту гармонической составляющей от нормируемых по ГОСТ 32144-2013 (для некоторых подстанции превышающее в 9,7 раза).

Разработанные мероприятия по снижению влияния гармонических составляющих на питающую сеть и режимы работы основного технологического оборудования позволяют

снизить потери в кабельных линиях, трансформаторах, а также повысить производительность основного технологического оборудования за счет приведения энергетических параметров потребителей к номинальным режимам эксплуатации. Этому способствует разработанное устройство автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных электрических сетях, что подтверждено получением патента на промышленный образец [16].

### Список литературы

1. Плакиткина Л.С., Плакиткин Ю.А., Дьяченко К.И. Анализ и прогнозы развития добычи и потребления угля в ведущих угледобывающих странах мира в период 2000-2035 гг. // Горный журнал. 2018. № 3. С. 4–9.

2. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Повышение уровня энергоэффективности и безопасности выемочного участка угольной шахты // Горный журнал. 2019. № 4. С. 85–89. ISSN 0017-2278.

3. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Загорш-менный И.М., Решетняк С.Н. Резервы повы-

шения эффективности работы выемочных участков угольных шахт // Уголь. 2019. № 3. С. 46–49.

4. Reshetnyak S., Bondarenko A. Analysis of Technological Performance of the Extraction Area of the Coal Mine // III International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018 Kemerovo. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101014.

5. Беляк В.Л., Плащанский Л.А. Увеличение напряжения участковых сетей как способ повышения эффективности использования горных машин в высоконагруженных забоях угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 5. С. 286–290.

6. Ляхомский А.В., Плащанский Л.А., Решетняк С.Н., Решетняк М.Ю. Разработка высоковольтного устройства автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 7. С. 207–213.

7. Ronnberg S., Bollen M. Power Quality Issues in the Electric Power System of the Future // *Electricity Journal*. 2016. No. 29 (10). С. 49–61.

8. Cheng M., Yanbin L. Research on Application of Active Power Filter in Harmonic Wave Suppression of Coal Mine // *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*. 2014. No. 28 (11). P. 107–110.

9. Zhao H., Lu X., Wang H., Yue Y. Study on Control Strategy Based on Compound Control for Hybrid Active Power Filter Harmonic Governance // *Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi/Power System Protection and Control*. 2015. No. 43 (21). P. 60–66.

10. Litran S.P., Salmeron P. Electromagnetic Compatibility Analysis of a Control Strategy for a Hybrid Active Filter // *Electric Power Systems Research*. 2017. No. 144, pp. 81–88.

11. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 2004. 350 с.

12. Жежеленко И.В., Шидловский А.К., Пивняк Г.Г. Электромагнитная совместимость потребителей. М.: Машиностроение, 2012. 351 с.

13. Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г., Шаров Ю.В., Воробьев А.Ю.

Управление качеством электроэнергии. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 320 с.

14. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

15. РД 153-34.0-15.501-00. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 1. Контроль качества электрической энергии.

16. Плащанский Л.А., Ляхомский А.В., Решетняк М.Ю., Решетняк С.Н. Высоковольтное устройство автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт. Патент на полезную модель № 185421 бюл. № 34 от 04.12.2018.

## References

1. Plakitkina L.S., Plakitkin Yu.A., D'yachenko K.I. Analiz i prognozy razvitiya dobychi i potrebleniya uglja v vedushchikh ugledobyvayushchikh stranakh mira v period 2000-2035 gg. [Analysis and Forecasts of Coal Production and Consumption in the Leading Coal-Producing Countries of the World in the Period 2000-2035]. *Gornyi zhurnal — Mining Journal*, 2018, No. 3, pp. 4–9. [in Russian].

2. Kopylov K.N., Kubrin S.S., Reshetnyak S.N. Povyshenie urovnya energoeffektivnosti i bezopasnosti vyemochnogo uchastka ugol'noi shakhty [Improving the Level of Energy Efficiency and Safety of the Excavation Site of a Coal Mine]. *Gornyi zhurnal — Mining Journal*, 2019, No. 4, pp. 85–89. ISSN 0017-2278. [in Russian].

3. Kopylov K.N., Kubrin S.S., Zakorshmenniy I.M., Reshetnyak S.N. Rezervy povysheniya effektivnosti raboty vyemochnykh uchastkov ugol'nykh shakht [Reserves of Increase of Efficiency of Work of Dredging Sites of Coal Mines]. *Ugol' — Coal*, 2019, No. 3, pp. 46–49. [in Russian].

4. Reshetnyak S., Bondarenko A. Analysis of Technological Performance of the Extraction Area of the Coal Mine. III International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018 Kemerovo. DOI:10.1051/e3sconf/20184101014.

5. Belyak V.L., Plashchanskii L.A. Uvelichenie napryazheniya uchastkovykh setei kak sposob povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya gornykh mashin v vysokonagruzhennykh zaboyakh ugol'nykh shakht [Increasing the Voltage of District Networks as a Way to Improve the Efficiency of Mining Machines in High-Loaded Faces of Coal Mines]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' — Mining Information and Analytical Bulletin*, 2009, No. 5, pp. 286-290. [in Russian].
6. Lyakhomskii A.V., Plashchanskii L.A., Reshetnyak S.N., Reshetnyak M.Yu. Razrabotka vysokovol'tnogo ustroystva avtomatizirovannogo monitoringa kachestva elektricheskoi energii v podzemnykh setyakh ugol'nykh shakht [Development of a High-Voltage Device for Automated Monitoring of Electric Energy Quality in Underground Coal Mine Networks]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' — Mining Information and Analytical Bulletin*, 2019, No. 7, pp. 207-213. [in Russian].
7. Ronnberg S., Bollen M. Power Quality Issues in the Electric Power System of the Future. *Electricity Journal*, 2016, No. 29 (10), pp. 49-61.
8. Cheng M., Yanbin L. Research on Application of Active Power Filter in Harmonic Wave Suppression of Coal Mine. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2014, No. 28 (11), pp. 107-110.
9. Zhao H., Lu X., Wang H., Yue Y. Study on Control Strategy Based on Compound Control for Hybrid Active Power Filter Harmonic Governance. *Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi — Power System Protection and Control*, 2015, No. 43 (21), pp. 60-66.
10. Litran S.P., Salmeron P. Electromagnetic Compatibility Analysis of a Control Strategy for a Hybrid Active Filter. *Electric Power Systems Research*, 2017, No. 144, pp. 81-88.
11. Zhezhelenko I.V. Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii [Higher Harmonics in Power Supply Systems of Industrial Enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2004. 350 p. [in Russian].
12. Zhezhelenko I.V., Shidlovskii A.K., Pivnyak G.G. *Elektromagnitnaya sovместimost' potrebitelei* [Electromagnetic Compatibility of Consumers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012. 351 p. [in Russian].
13. Kartashev I.I., Tul'skii V.N., Shamonov R.G., Sharov Yu.V., Vorob'ev A.Yu. *Upravlenie kachestvom elektroenergii* [Electricity Quality Control]. Moscow, Izdatel'skii dom MEI, 2006. 320 p. [in Russian].
14. GOST 32144-2013. *Elektricheskaya energiya. Sovместimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 32144-2013. Electrical Energy. Compatibility of Technical Means Electromagnetic. Standards of Quality of Electric Energy in Systems of Power Supply of General Purpose]. [in Russian].
15. RD 153-34.0-15.501-00. *Metodicheskie ukazaniya po kontrolyu i analizu kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. Chast' 1. Kontrol' kachestva elektricheskoi energii* [RD 153-34.0-15.501-00. Methodical Instructions on Control and the Analysis of Quality of Electric Energy in Systems of Power Supply of the General Purpose. Part 1. Quality Control of Electric Energy]. [in Russian].
16. Plashchanskii L.A., Lyakhomskii A.V., Reshetnyak M.Yu., Reshetnyak S.N. *Vysokovol'tnoe ustroystvo avtomatizirovannogo monitoringa kachestva elektricheskoi energii v podzemnykh setyakh ugol'nykh shakht* [High-Voltage Device for Automated Monitoring of Electric Energy Quality in Underground Networks of Coal Mines]. Patent RF, No. 185421, 04.12.2018. [in Russian].



**Герасименко А. А.**  
**Gerasimenko A. A.**

*доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры  
«Электрические станции  
и электроэнергетические системы»,  
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный  
университет»,  
г. Красноярск, Российская Федерация*



**Пузырев Е. В.**  
**Puzyrev E. V.**

*кандидат технических наук,  
инженер II категории службы релейной  
защиты,  
автоматики и метрологии  
Саяно-Шушенской ГЭС,  
г. Саяногорск, Российская Федерация*

УДК 621.311.001.57

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-68-73

## **ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ И СТАТИСТИЧЕСКОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И УЧЁТА МНОЖЕСТВА РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

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

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

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

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

## **SOFTWARE IMPLEMENTATION OF DETERMINISTIC AND STATISTICAL METHODS FOR CALCULATING POWER LOSSES AND ACCOUNTING FOR MULTIPLE MODES OF ELECTRIC NETWORK**

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

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

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

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

*Введение*

Правильный учёт и анализ, а также снижение потерь электрической энергии всегда были и остаются одними из приоритетных задач для сетевых предприятий и организаций всех уровней и, в первую очередь, систем распределения электрической энергии, поскольку потери электроэнергии (ЭЭ) являются центральным показателем оценки энергоэффективности их функционирования [1–3]. Наряду с этим, планирование и анализ режимов работы электрических сетей (ЭС), в частности, разработка мероприятий снижения потерь ЭЭ и оценка их эффективности, обоснование и установление региональных тарифов на ЭЭ и решение ряда других задач, требует развития и совершенствования различных методов и алгоритмов расчёта потерь ЭЭ. Данный центральный интегральный показатель режимов с высокой надёжностью (с высокой точностью и требуемой достоверностью) определяется полным учётом всего множества электрических режимов работы (многорежимности), связанного с изменением нагрузок, составом и конфигурацией ЭС. Учёт изменения схемы ЭС в ремонтных режимах и влияние на оценку потерь ЭЭ за отчётный месячный интервал времени рассмотрены в [4]. В данном случае представлена программная реализация методов расчёта потерь ЭЭ и соответствующего учёта множества электрических режимов, вызванная изменением нагрузок ЭС.

Наибольшее распространение получили детерминированные методы расчёта потерь ЭЭ [5, 6], в меньшей мере — стохастические и комбинированные подходы к расчёту потерь [7, 8].

*Краткое описание подходов и основных расчётных выражений по определению потерь электроэнергии*

Проблемное содержание данной задачи состоит в необходимости суммирования (точного или приближённого) всего множества или представительного характерного

множества потерь активной мощности на заданном временном интервале (сутки, месяц, квартал). Для ЭС, содержащей  $m$  ветвей и  $n+1$  узлов, с  $d = T / \Delta t$  интервалами усреднения графиков нагрузок и длительностью усреднения  $\Delta t$  на временном интервале  $T$  потери ЭЭ описываются следующими принципиальными выражениями [5]:

$$\Delta W_{\Sigma}^n = 3 \sum_{j=1}^m R_j \int_0^T I_j^2(t) dt = \sum_{j=1}^m \int_0^T \Delta P_j(t) dt = \sum_{i,j}^{n+1} \int_0^T \Delta P_{ij}(t) dt \approx \sum_{i,j}^{n+1} \sum_s^d \Delta P_{ijs} \Delta t_s, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{ij}$  — потери мощности на участке  $i$ - $j$  электросети для интервала усреднения  $s$ .

Реализация (1), выполняемая на основе серии расчётов установившихся режимов и дающая наиболее точные значения потерь ЭЭ, чрезмерно трудоёмка, в том числе из-за большого объёма и также случайного и частично неопределённого характера части исходной информации, особенно для сетей 6–35 кВ. В программном комплексе POTER1, объединяющем под общее управление ряд программно-расчётных модулей, алгоритмы базируются в основном на одном расчёте установившегося режима для средних нагрузок. При этом реализованы три следующих направления учёта совокупности режимов и соответственно расчёта потерь ЭЭ.

1. Детерминированный классический метод среднеквадратичного тока с восстановлением среднеквадратичных токов на основе средних (псевдосредних) значений нагрузок  $I_{cp}$  и коэффициента формы  $k_{\phi}$ , учитывающего множество режимов по данным узлового потребления ЭЭ и отпуска ЭЭ в сеть. Метод реализуется в следующем виде [6]:

$$\Delta W_{det} = 3k_{\phi}^2 \sum_{j=1}^m I_{cpj}^2 R_j T = \left[ \sum_{j=1}^m \Delta P_{cpj} + (k_{\phi}^2 - 1) \Delta P_{cp} \right] T = M \Delta W + \sigma \Delta W, \quad (2)$$

где  $M \Delta W$ ,  $\sigma \Delta W$  — основная и дисперсионная составляющие потерь ЭЭ.

2. Стохастический метод, базирующийся на факторной модели электрических нагрузок и модифицированной стохастической модели анализа многорежимности, представлен выражением [7]:

$$\Delta W_{\text{в.с.}} \approx \left[ \Delta P(MU, M\delta) + \left( \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k(U_i U_j) \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial U_i \partial U_j} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k(U_i \delta_j) \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial U_i \partial \delta_j} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k(\delta_i \delta_j) \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial \delta_i \partial \delta_j} \right) \right] \cdot T =$$

$$= [\Delta P(MU, M\delta) + \sigma(\Delta P)] \cdot T = M\Delta W + \sigma\Delta W, \quad (3)$$

где  $\Delta P(MU, M\delta)$ ,  $\sigma(\Delta P)$  — основная и дисперсионная составляющие потерь мощности;

$k(\delta_i \delta_j)$ ,  $k(\delta_i U_i)$ ,  $k(U_i U_j)$  — корреляционные моменты модулей и фаз напряжений, вычисленные для режима средних нагрузок на основе факторной модели нагрузок;

$\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial U_i \partial U_j}$ ,  $\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial U_i \partial \delta_j}$ ,  $\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial \delta_i \partial \delta_j}$  — вторые производные выражения потерь мощности по соответствующим параметрам, определяемые для данного режима.

3. Комбинированный метод заключается в определении средневзвешенной величины потерь, найденной по результатам расчёта их составляющих  $\Delta W_{\text{дет}}$ ,  $\Delta W_{\text{в.с.}}$  детерминированным и стохастическим алгоритмами [9]:

$$\Delta W_{\text{расч}} = \Delta W_{\text{дет}} \cdot \alpha + \Delta W_{\text{в.с.}} \cdot \beta, \quad (4)$$

где  $\alpha, \beta$  — оптимальные весовые коэффициенты, связанные условием  $\alpha + \beta = 1$ , найденные по критерию минимума ошибки формирования величины потерь детерминированным и стохастическим методами соответственно.

#### *Краткое описание функционирования комплекса POTERI*

Работа над программным комплексом POTERI началась со сборки и отладки хорошо зарекомендовавших себя в инженерных вычислениях программ REG10PVT и SETI. Данные программы были написаны на базе языка программирования FORTRAN, который на сегодняшний день является не востребовавшимся, на его смену пришли современные языки программирования, такие как: C, C++, Delphi и другие. В связи этим перед авторами встала задача актуализации

данных программных разработок. Поэтапное изучение работы отдельных программ и проработка алгоритмов, их доработка и усовершенствование способствовали созданию нового единого программного комплекса POTERI, который на сегодняшний день имеет несколько версий [10]. Каждая из версий комплекса отличается различным набором функциональных возможностей программных модулей. Последняя версия комплекса базируется на взаимодействии четырёх программных модулей: SETI, REG10PVT, VES, RES (рисунок 1).



Рисунок 1. Укрупнённая модульная структура программного комплекса POTERI

В совокупности комплекс POTERI имеет широкие функциональные возможности, поскольку реализует различные методы по расчёту потерь ЭЭ: детерминированный, стохастический и комбинированный.

Далее кратко представлены возможности сформированного программного комплекса POTERI. Подробное описание по работе пользователя с комплексом и его функционированию изложено в инструктивных указаниях к каждому из программных модулей.

В зависимости от имеющейся исходной информации и цели расчёта реализуется соответствующий расчётный модуль-метод. Для этого необходимо заранее подготовить исходный файл, который для каждого из модулей имеет свои особенности построения и ввода параметров схемы замещения.

Расчёт потерь электроэнергии детерминированным способом (вход «Детерминированный метод») организуется с помощью основного диалогового окна программного модуля REG10PVT, выполняющего также расчёт параметров установленного режима

сети по нагрузкам, заданным значениями активной и реактивной мощностей ( $P$  и  $Q$ ) — вход (кнопка) «НАГРУЗКИ  $P$  и  $Q$ » или тока и коэффициента мощности ( $I$  и  $\cos\varphi$ ) — вход (кнопка) «НАГРУЗКИ  $I$  и  $\cos(\varphi_i)$ ».

В программном модуле возможно выполнение расчёта потерь электроэнергии как для отдельного участка сети (вход «РАСЧЁТ ПОТЕРЬ ЭЭ ПО ОТПУСКУ»), так и в целом по всей сети напряжением 6–35 кВ для неограниченного количества фрагментов, составляющих в совокупности рассматриваемую сеть (вход «РАСЧЁТ ПОТЕРЬ ЭЭ ПО ВСЕЙ СЕТИ») — программный модуль RES [10], структурно интегрированный в программный модуль REG10PVT.

Программный модуль SETI предназначен для расчётов установившихся режимов и интегральных характеристик множества режимов при задании нагрузок средними или наибольшими значениями мощностей. Стохастические алгоритмы данного модуля построены на основе факторной модели матрицы корреляционных моментов, выполненной методом главных компонент с получением моделирующих обобщённых (ортогональных) графиков нагрузок (ОГН). Метод эффективен, поскольку с помощью небольшого количества таких графиков (до 3–4 ОГН) интегральные характеристики множества режимов (потери ЭЭ, диапазоны и диаграммы (графики) изменения напряжений в узлах сети и реактивной мощности источников) определяются в результате одного расчёта установившегося режимов для средних нагрузок и трёх-четырёх решений систем линейных уравнений с неизменной матрицей Якоби уравнений данного режима [9]. Основу алгоритмов модуля составляют метод Ньютона и вероятностно-статистическая факторная модель электрических нагрузок. Следует отметить, что расчёт интегральных характеристик возможен при вводе суточных графиков активных и реактивных мощностей  $P(t)$ ,  $Q(t)$  в узлах в явном виде или после считывания отраслевых (типовых) графиков из базы данных и обобщённых факторных моделей — ортогональных графиков нагрузки  $\Gamma(t)$ . При расчёте потерь ЭЭ стохастическим методом (модуль SETI) предусмотрена возможность обновления отдельных ОГН, вновь

полученных после статистической обработки отраслевых графиков различных распределительных систем, что существенно расширяет возможности программного модуля в направлении повышения точности результатов расчёта потерь ЭЭ.

Комбинированный подход практически реализован на основе сочетаний программных модулей REG10PVT и SETI, реализующих соответственно уточнённый детерминированный и стохастический методы. Оптимальное сочетание результатов по данным методам установлено с помощью статистических испытаний и находится в интервале  $\beta=[0,7; 0,8]$ . Выбор соответствующего весового сочетания результатов по детерминированному и вероятностно-статистическому методам выполняется по данным протоколов расчётов в программном модуле VES. На базе комбинированного подхода в данном модуле программно реализован усовершенствованный алгоритм расчёта и оценки норматива потерь ЭЭ [9, 11, 12].

Программный комплекс POTERI имеет государственную регистрацию в реестре программ для ЭВМ, проходит апробацию в сетевых организациях, используется для решения ряда задач эксплуатации и функционирования электрических сетей, применяется в учебных и научных целях.

Примеры расчётов с помощью представленных отдельных программ REG10PVT и SETI и программного комплекса POTERI приведены в [6, 7].

### Выводы

1. Разработан многофункциональный программно-вычислительный комплекс «POTERI» для расчёта, анализа и нормирования потерь электроэнергии, совместимый с различными операционными системами. Разработка выполнена на основе ранее разработанных программных модулей, апробированных в электросетевых предприятиях, в научной и учебной работе.

2. Сформирована математическая, алгоритмическая и программная база для создания программно-вычислительного аппарата расчёта интегральных характеристик множества режимов систем распределения электрической энергии высокой надёжности отраслевого уровня.

### Список литературы

1. Воротницкий В.Э., Кутовой Г.П., Овсейчук В.А. Снижение потерь электроэнергии. Стратегический путь повышения энергетической эффективности сетей // Новости электротехники. 2015. № 4 (94). 22 с.
2. Седельников А.В., Павлюченко Д.А. Компенсация реактивной мощности в распределительных электрических сетях 10/0,4 кВ // Главный энергетик. 2015. № 11–12. С. 25–29.
3. Воротницкий В.Э., Жежеленко И.В., Трофимов Г.Г. Повышение энергетической эффективности сетей // Региональная энергетика и энергосбережение. 2017. № 4. С. 50–52.
4. Герасименко А.А., Пузырев Е.В. Оценка влияния длительности ремонтного состояния электрической сети на рост потерь электрической энергии // Электрические станции. 2017. № 3. С. 21–30.
5. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчёт, анализ, нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2004. 290 с.
6. Герасименко А.А., Тимофеев Г.С. Методика, алгоритм и программа расчёта технических потерь электроэнергии в распределительных сетях энергосистем // Вестник электроэнергетики. 2001. № 4. 74 с.
7. Герасименко А.А., Шульгин И.В. Стохастический метод расчёта нагрузочных потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях // Электрические станции. 2013. № 4. С. 44–59.
8. Манусов В.З., Болоев Е.В., Войтов О.Н., Голуб И.И. Вероятностный анализ переменных режима электроэнергетической системы // Электричество. 2014. № 1. С. 12–20.
9. Герасименко А.А., Пузырев Е.В. The Combined Presentation of Deterministic and Stochastic Approaches in the Algorithm of Calculation of Energy Losses in Electric Networks // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2017. № 10 (1). С. 6–16.
10. Герасименко А.А., Пузырев Е.В. Software Implementation of Deterministic and Stochastic Calculation Methods of Electric Energy Losses in Electrical Distribution Networks // Znanstvena misel journal. 2018. T. 1. No. 14. P. 49–57.
11. Герасименко А.А., Пузырев Е.В. Программный модуль «RES» программного комплекса «POTERI» расчёта потерь элек-

троэнергии в распределительных сетях // Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по матер. XIX междунар. науч.-практ. конф. 2019. № 1 (17). С. 108–114.

12. Герасименко А.А., Пузырев Е.В. Программный модуль «VES» комбинированного расчёта потерь электрической энергии программы «POTERI V1.1: SETI, REG-10PVT» // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники: сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. Казань, 2019. С. 3–8.

### References

1. Vorotnitskii V.E., Kutovoi G.P., Ovseichuk V.A. Snizhenie poter' elektroenergii. Strategicheskii put' povysheniya energeticheskoi effektivnosti setei [Reduction of Power Losses. Strategic Way to Improve the Energy Efficiency of Networks]. *Novosti elektrotekhniki — News of Electrical Engineering*, 2015, No. 4 (94), 22 p. [in Russian].
2. Sedel'nikov A.V., Pavlyuchenko D.A. Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh 10/0,4 kV [Reactive Power Compensation in 10/0.4 kV Distribution Electric Networks]. *Glavnyi energetik — Chief Power Engineer*, 2015, No. 11-12, pp. 25–29. [in Russian].
3. Vorotnitskii V.E., Zhezhelenko I.V., Trofimov G.G. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti setei [Improving the Energy Efficiency of Networks.]. *Regional'naya energetika i energosberezhenie — Regional Energy and Energy Saving*, 2017, No. 4, pp. 50–52. [in Russian].
4. Gerasimenko A.A., Puzyrev E.V. Otsenka vliyaniya dlitel'nosti remontnogo sostoyaniya elektricheskoi seti na rost poter' elektricheskoi energii [Assessment of the Influence of the Duration of the Repair State of the Electric Network on the Growth of Losses of Electric Energy]. *Elektricheskie stantsii — Electric Stations*, 2017, No. 3, pp. 21–30. [in Russian].
5. Zhelezko Yu.S., Artem'ev A.V., Savchenko O.V. Raschet, analiz, normirovanie poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh [Calculation, Analysis, Regulation of Electricity Losses in Electric Networks]. Moscow, NTs ENAS Publ., 2004. 290 p. [in Russian].

6. Gerasimenko A.A., Timofeev G.S. Metodika, algoritm i programma rascheta tekhnicheskikh poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh setyakh energosistem [Methods, Algorithm and Software for Calculation of Technical Losses of Electricity in Distribution Networks Power Systems]. *Vestnik elektroenergetiki — Bulletin of the Electric Power Industry*, 2001, No. 4, 74 p. [in Russian].
7. Gerasimenko A.A., Shul'gin I.V. Stokhasticheskii metod rascheta nagruzochnykh poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh [Stochastic Method of Calculating the Load Losses of Electricity in Distribution Networks]. *Elektricheskie stantsii — Electric Stations*, 2013, No. 4, pp. 44–59. [in Russian].
8. Manusov V.Z., Boleov E.V., Voitov O.N., Golub I.I. Veroyatnostnyi analiz peremennykh rezhima elektroenergeticheskoi sistemy [Probabilistic Analysis of the Transferred Modes of the Electric Power System]. *Elektrichestvo — Electricity*, 2014, No. 1, pp. 12–20. [in Russian].
9. Gerasimenko A.A., Puzyrev E.V. The Combined Presentation of Deterministic and Stochastic Approaches in the Algorithm of Calculation of Energy Losses in Electric Networks. *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii — J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.*, 2017, No. 10 (1), pp. 6–16.
10. Gerasimenko A.A., Puzyrev E.V. Software Implementation of Deterministic and Stochastic Calculation Methods of Electric Energy Losses in Electrical Distribution Networks. *Znanstvena Misel Journal*, 2018, Vol. 1, No. 14, pp. 49–57.
11. Gerasimenko A.A., Puzyrev E.V. Programmnyi modul' «RES» programmno kompleksa «POTERI» rascheta poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh setyakh [Software Module «RES» Software «POTERI» Calculation of Energy Losses in Distribution Networks]. *Sbornik statei po materialam XIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Tekhnicheskie nauki: problemy i resheniya»* [Collection of Articles on Materials of XIX International Scientific-Practical Conference «Technical Sciences: Problems and Solutions». 2019, No. 1 (17), pp. 108–114. [in Russian].
12. Gerasimenko A.A., Puzyrev E.V. Programmnyi modul' «VES» kombinirovannogo rascheta poter' elektricheskoi energii programmy «POTERI V1.1: SETI, REG10PVT» [Program Module «VES» of Combined Calculation of Losses of Electric Energy of the Program «POTERI V1.1: SETI, REG10PVT»]. *Sbornik statei Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya elektroenergetiki i elektrotekhniki»* [Collection of Articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Problems and Prospects of Development of Electric Power Industry and Electrical Engineering»]. Kazan', 2019, pp. 3–8. [in Russian].



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

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



**Иванов М. Д.**  
**Ivanov M. D.**

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

УДК 62-52

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-74-82

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Существует ряд технических задач, решение которых сводится к достижению колебательных режимов работы механической системы. Так, электропривод станков-качалок нефтяных скважин работает в режиме, при котором через определенные промежутки времени меняется направление вращения вала ротора, что обеспечивает вращательное движение головки балансира. Электропривод, приводящий в движение пассажирский или грузовой лифт, также в течение рабочих часов многократно изменяет направление своего вращения. Но в целом в технологических процессах колебательные режимы работы встречаются достаточно редко, преимущественно электромеханический преобразователь работает в установившемся режиме. Подобный режим работы электропривода можно использовать для создания искусственной гравитации.

При питании двигателя постоянного тока независимого возбуждения от источника постоянного тока можно получить электромеханический преобразователь с абсолютно мягкой механической характеристикой. Такая характеристика позволяет получить постоянный электромагнитный момент на валу якоря, который не будет зависеть от угловой скорости вращения вала. Постоянный момент будет создавать постоянное угловое ускорение, которое после преобразования вращательного движения в поступательное обеспечит постоянное линейное ускорение кабины. Силы инерции, возникающие при движении какой-либо системы с таким ускорением, будут создавать внутри системы повышенную гравитацию.

В данной статье представлен анализ процессов, происходящих в такой системе, построена математическая модель системы, получены результаты моделирования с использованием математического пакета MATLAB R2017b и сделаны выводы о возможности применения такой системы для создания заданных перегрузок.

**Ключевые слова:** колебательная механическая система, искусственная гравитация, заданные перегрузки, микрогравитация, электропривод, двигатель постоянного тока независимого возбуждения, источник постоянного тока, постоянный момент, датчик положения, индуктивно-емкостный преобразователь, резонансный LC-контур.

## SIMPLIFIED MATHEMATICAL MODEL OF THE OSCILLATING MECHANICAL SYSTEM

There are a number of technical problems, the solution of which is to achieve oscillatory modes of operation of a mechanical system. So, the electric drive of oil pumping units operates in a mode

in which, at certain intervals, the direction of rotation of the rotor shaft changes, which ensures rotational movement of the balancer head. An electric drive that drives a passenger or freight elevator also changes its direction of rotation many times during working hours. But in general, in technological processes, oscillatory modes of operation are quite rare, mainly the electromechanical converter operates in a steady state.

However, a similar mode of operation of the electric drive can be used to create artificial gravity.

When a DC motor of independent excitation is supplied from a direct current source, an electromechanical converter with an absolutely soft mechanical characteristic can be obtained. This characteristic allows you to get a constant electromagnetic moment on the armature shaft, which will not depend on the angular speed of rotation of the shaft. A constant moment will create a constant angular acceleration, which, after converting rotational motion into translational, will provide constant linear acceleration of the cabin. The inertia forces arising from the movement of any system with such acceleration will create increased gravity inside the system.

In this article, an analysis of the processes occurring in such a system is made, a mathematical model of the system is built, simulation results are obtained using the mathematical package MATLAB R2017b, and conclusions are drawn about the possibility of using such a system to create specified overloads.

**Key words:** oscillatory mechanical system, artificial gravity, predetermined overloads, microgravity, electric drive, independent excitation direct current motor, direct current source, constant torque, position sensor, inductive-capacitive converter, resonant LC circuit.

Существует ряд технических задач, решение которых сводится к достижению колебательных режимов работы механической системы. Так, электропривод станков-качалок нефтяных скважин работает в режиме, при котором через определенные промежутки времени меняется направление вращения вала ротора, что обеспечивает вращательное движение головки балансира. Электропривод, приводящий в движение пассажирский или грузовой лифт, также в течение рабочих часов многократно изменяет направление своего вращения. Но в целом в технологических процессах колебательные режимы работы встречаются достаточно редко, преимущественно электромеханический преобразователь работает в установившемся режиме [1]. Однако подобный режим работы электропривода можно использовать для создания искусственной гравитации [2].

При питании двигателя постоянного тока независимого возбуждения от источника постоянного тока можно получить электромеханический преобразователь с абсолютно мягкой механической характеристикой. Такая характеристика позволяет получить постоянный электромагнитный момент на валу якоря, который не будет зависеть от угловой скорости вращения вала. Постоянный момент будет создавать постоянное

угловое ускорение, которое после преобразования вращательного движения в поступательное обеспечит постоянное линейное ускорение кабины. Силы инерции, возникающие при движении какой-либо системы с таким ускорением, будут создавать внутри системы повышенную гравитацию. Однако при построении такой системы без отрицательной обратной связи исследуемый объект выйдет за границы пространства, отведенного для его движения. Если в качестве обратной связи использовать датчик положения, который будет регистрировать прохождение объекта и отправлять сигнал на выключатель, который будет коммутировать электрическую схему соединения двигателя на другой, менее мощный, источник тока, то под действием сил тяжести изучаемый объект будет тормозить. Таким образом, можно добиться создания устойчивой системы, в которой значение веса тела будет периодически меняться.

Рассмотрим колебания кабины с объектом внутри неё при воздействии на неё сил натяжения троса и силы тяжести.

1) Из состояния покоя кабина разгоняется с постоянным ускорением вертикально вверх по направляющим (рисунок 1). Её движение будет описываться следующим уравнением:

$$ma_1 = T_1 - mg. \quad (1)$$

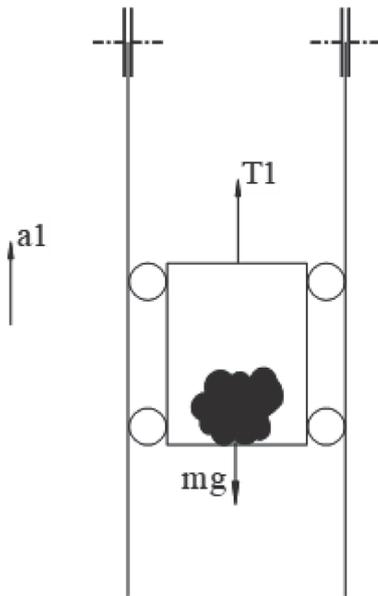


Рисунок 1. Силы, действующие на кабину при перегрузке

При этом на объект, находящийся внутри кабины, будут действовать следующие силы (рисунок 2):

$$N_1 = mg + \Phi_i, \quad (2)$$

где  $\Phi_i = ma_1$ ,  $\Phi_i$  — сила инерции.



Рисунок 2. Силы, действующие на объект при перегрузке

По второму закону Ньютона  $N_1 = P$ , где  $P$  — вес тела. Тогда перегрузка объекта при таком движении  $k_1$  составит:

$$k_1 = \frac{P}{mg} = \frac{N_1}{mg} = \frac{mg + ma_1}{mg} = 1 + \frac{a_1}{g}; \quad (3)$$

$$T_1 = ma_1 + mg = N_1 = k_1 mg. \quad (4)$$

2) После прохождения точки, в которой кабина разовьёт максимальную скорость (в дальнейшем будем называть эту точку переходной), необходимо уменьшить силу натяжения нити таким образом, что под действием силы тяжести начнется отрезок равнозамедленного движения кабины (рисунок 3):

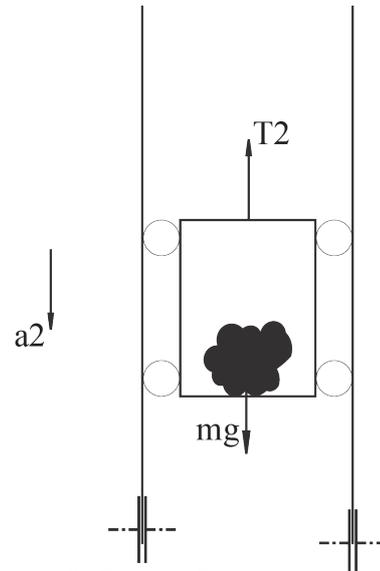


Рисунок 3. Силы, действующие на кабину при пониженной гравитации

$$ma_2 = -T_2 + mg, \quad (5)$$

При этом на объект, находящийся внутри кабины, будут действовать следующие силы (рисунок 4):

$$N_2 = mg - \Phi_i, \quad (6)$$

где  $\Phi_i = ma_2$ ,  $\Phi_i$  — сила инерции.

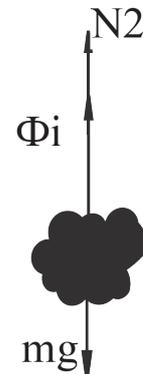


Рисунок 4. Силы, действующие на кабину при пониженной гравитации

По второму закону Ньютона  $N_2 = P$ , где  $P$  — вес тела. Тогда перегрузка объекта при таком движении  $k_2$  составит:

$$k_2 = \frac{P}{mg} = \frac{N_2}{mg} = \frac{mg - ma_2}{mg} = 1 - \frac{a_2}{g}; \quad (7)$$

$$T_2 = -ma_2 + mg = N_2 = k_2 mg. \quad (8)$$

Силой трения качения между роликами и направляющими пренебрежём, поскольку эта величина намного меньше остальных сил, входящих в уравнение.

Из уравнений (3) и (7) выразим значения  $a_1$  и  $a_2$ :

$$a_1 = g(k_1 - 1); \quad (9)$$

$$a_2 = g(1 - k_2). \quad (10)$$

Из уравнения (10) следует, что коэффициент  $k_2$  должен лежать в пределах (0;1),  $k_1$  лежит в пределах (1; +∞).

Поскольку важным условием колебательного режима является периодичность, определим значение амплитуд, на которые отклоняется кабина от переходной точки вниз ( $A_1$ ), вверх ( $A_2$ ), а также периоды времени  $t_1$  и  $t_2$ , за которые происходят эти отклонения.

Пусть высота установки будет равна  $H$ , а значения перегрузок —  $k_1$  и  $k_2$  (рисунок 5):

$$v_{max1}^2 = v_{max2}^2 \Rightarrow 2a_1A_1 = 2a_2A_2. \quad (11)$$

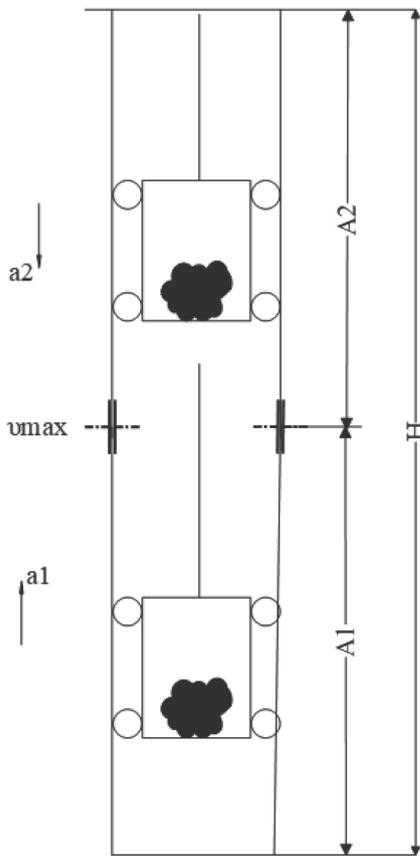


Рисунок 5. Определение параметров  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $t_1$  и  $t_2$

С учетом уравнения (11), а также

$$A_1 + A_2 = H, \quad (12)$$

получим следующие значения  $A_1$ ,  $A_2$  и  $v_{max}$ :

$$A_1 = H \frac{1-k_2}{k_1-k_2}; \quad (13)$$

$$A_2 = H \frac{k_1-1}{k_1-k_2}; \quad (14)$$

$$v_{max} = \sqrt{2gH \frac{(k_1-1)(1-k_2)}{(k_1-k_2)}}. \quad (15)$$

Периоды времени  $t_1$  и  $t_2$  найдём из условий:

$$t_1 = \frac{v_{max}}{a_1}, t_2 = \frac{v_{max}}{a_2}. \quad (16)$$

После подстановки значений получим:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2H}{g} \frac{(1-k_2)}{(k_1-k_2)(k_1-1)}}; \quad (17)$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{2H}{g} \frac{(k_1-1)}{(k_1-k_2)(1-k_2)}}. \quad (18)$$

Полный период колебаний кабины будет равен:

$$T = 2(t_1 + t_2) = \sqrt{\frac{8H}{g} \frac{(k_1-k_2)}{(k_1-1)(1-k_2)}}. \quad (19)$$

Перейдём к рассмотрению механических уравнений вала якоря, вращение которого должно обеспечить такое движение (рисунок 6):

$$\begin{cases} M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \\ M_c = TR, \\ \varepsilon = \frac{a}{R}; \end{cases} \quad (20)$$

где  $J$  — момент инерции вала якоря.

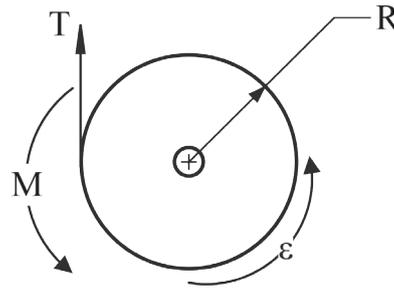


Рисунок 6. Вал якоря

В данных уравнениях пренебрегают пассивной составляющей момента сопротивления (возникают из-за сил трения скольжения и качения на различных участках движения троса и кабины), так как её значения во много раз меньше активной составляющей.

В зависимости от положения кабины (выше переходной точки или ниже) получим различные зависимости момента и момента сопротивления от времени:

$$M_{c1} = k_1 mgR; \quad (21)$$

$$M_{c2} = k_2 mgR; \quad (22)$$

$$M_1 = k_1 mgR + Jg \frac{k_1-1}{R}; \quad (23)$$

$$M_2 = k_2 mgR - Jg \frac{1-k_2}{R}. \quad (24)$$

Построим динамические характеристики двигателя  $M(t)$  и  $\omega(t)$  (рисунок 7).

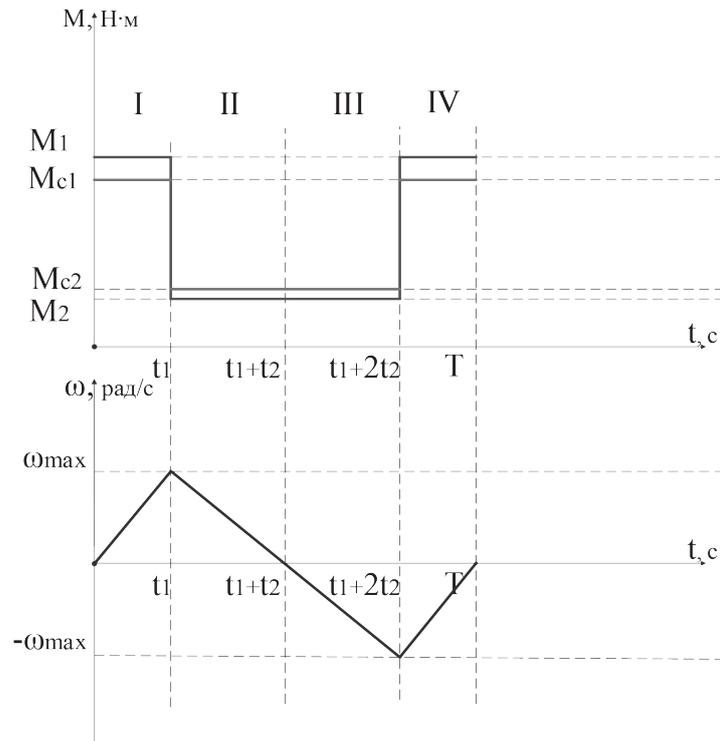


Рисунок 7. Динамические характеристики двигателя

На основе динамических характеристик можно построить статическую механическую характеристику (рисунок 8).

Таким образом, видно, что искусственную гравитацию можно создать только при помощи двигателя, обладающего абсолютно

мягкими механическими характеристиками. Такой характеристикой обладает двигатель постоянного тока независимого возбуждения, якорная цепь которого будет питаться от источника постоянного тока [3].

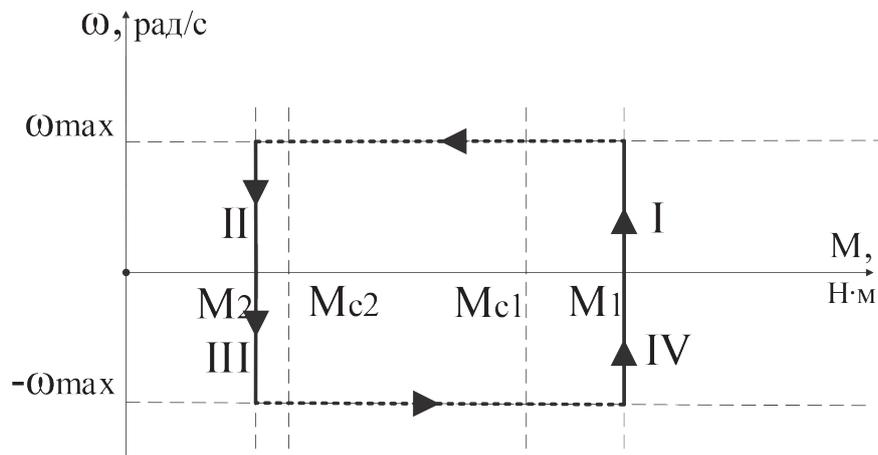


Рисунок 8. Статическая механическая характеристика

В течение одного периода двигатель должен реализовывать 4 режима работы:

I — двигательный режим с моментом  $M_1 > M_{c1}$ , который разгоняет кабину и создаёт заданную перегрузку колебательной системы. Угловая скорость кабины достигает максимума, кабина из нижнего положения перемещается в переходную точку;

II — двигательный режим с моментом  $M_2 < M_{c2}$ , под действием сил тяжести кабина замедляется, создаётся пониженная гравитация. В конце режима угловая скорость вращения ротора падает до 0, а кабина достигает верхнего положения;

III — тормозной режим с моментом  $M_2 < M_{c2}$ , угловая скорость вращения ротора меняет своё направление. В момент времени,

когда кабина вновь достигает переходной точки, модуль угловой скорости становится максимальным;

IV — тормозной режим с моментом  $M_1 > M_{c1}$ , модуль угловой скорости падает до 0, а кабина достигает крайнего нижнего положения.

Поскольку в двигателе постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ), якор-

ная цепь которого питается от источника тока, момент, создаваемый двигателем, будет зависеть исключительно от силы тока, подаваемой на обмотки якоря, управление таким колебательным процессом не будет представлять особых сложностей. В качестве примера рассмотрим следующую электротехническую схему подключения двигателя (рисунок 9).

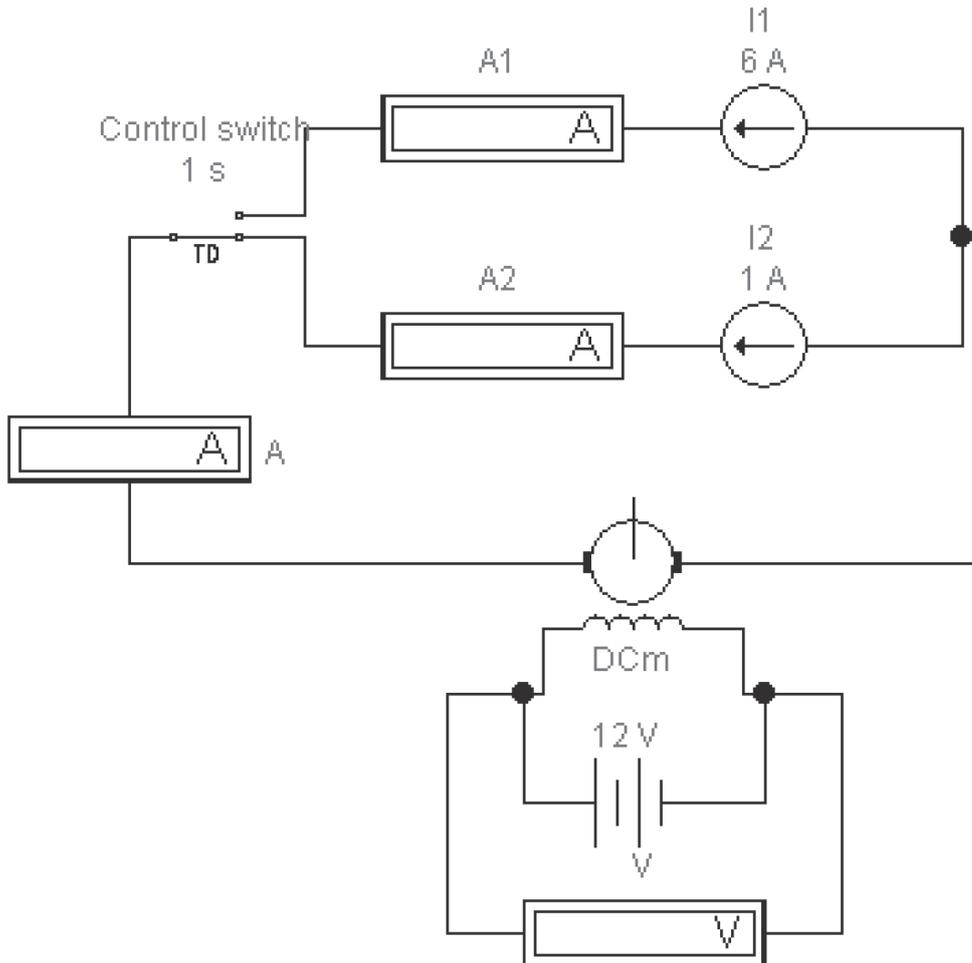


Рисунок 9. Электротехническая схема подключения двигателя

На рисунке 9  $I_1$  и  $I_2$  — источники постоянного тока;  $A_1$  и  $A_2$  — амперметры, необходимые для проверки качества тока, создаваемого источниками. Источники постоянного тока предполагается получить, используя напряжение сети переменного тока и параметрический индуктивно-емкостный преобразователь, представляющий собой резонансный LC-контур. Control switch — управляемый выключатель, который будет осуществлять коммутации при подаче на него сигнала с датчика положения кабины (при движении кабины ниже переходной точки ток к двига-

телю будет поступать от  $I_1$ , а при движении выше переходной точки — от  $I_2$ ). Амперметр  $A$  будет замерять фактическую силу тока на якорной цепи двигателя DCm. Обмотку возбуждения можно питать как источником постоянного тока, так и источником постоянного напряжения, так как ток возбуждения должен оставаться постоянным во все время работы двигателя. Вольтметр  $V$  предназначен для измерения напряжения на обкладках обмотки возбуждения. Токи  $I_1$  и  $I_2$ , необходимые для питания двигателя, можно рассчитать по следующим формулам:

$$I_1 = \frac{M_1}{k\Phi} = \frac{1}{k\Phi} (k_1 mgR + Jg \frac{k_1 - 1}{R}); \quad (25)$$

$$I_2 = \frac{M_2}{k\Phi} = \frac{1}{k\Phi} (k_2 mgR - Jg \frac{1 - k_2}{R}), \quad (26)$$

где  $k$  — конструктивная постоянная двигателя;

$\Phi$  — магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения.

Пренебрегая переходными процессами, возникающими в якорной цепи двигателя при коммутации, а также пассивной составляющей момента сопротивления двигателя, можно изобразить упрощенную математическую модель данной колебательной системы (рисунок 10).

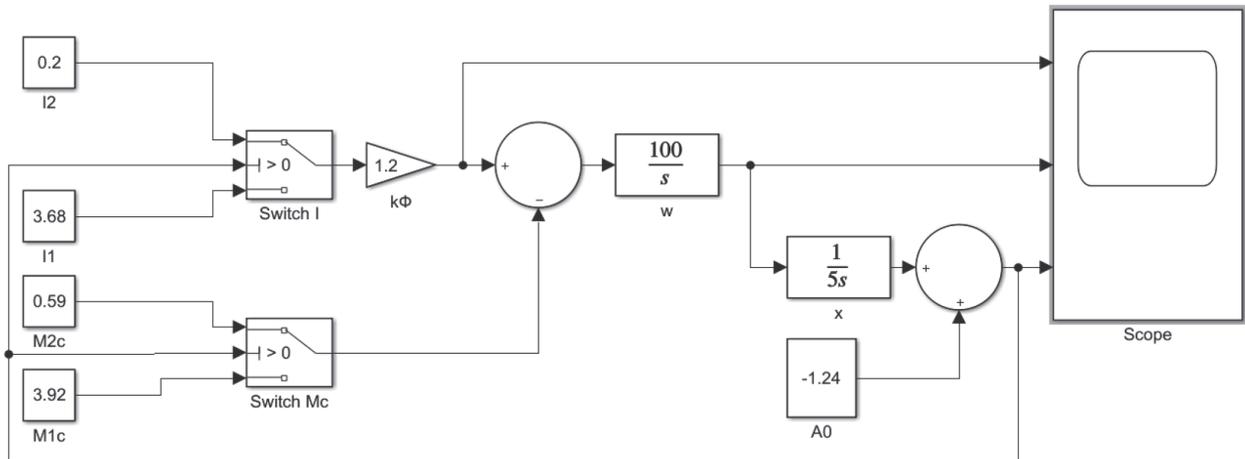


Рисунок 10. Упрощенная математическая модель колебательной системы

На рисунке 10  $I_1, I_2$  — значения токов, создаваемых источниками постоянного тока;  $M_{1c}$  и  $M_{2c}$  — значения активных моментов сопротивления при движении кабины в различных режимах. Switch I, Switch  $M_c$  — переключатели, которые в зависимости от координаты кабины выдают то или иное значение тока и момента сопротивления.  $k\Phi$  — усилительный блок, описывающий основное уравнение ДПТ НВ в данной схеме:

$$M = k\Phi I. \quad (27)$$

Значение динамического момента обрабатывается элементом Scope — на его основе строится первая динамическая характеристика системы — зависимость  $M(t)$  (рисунок 11).

С помощью компаратора реализуется основное уравнение вращательного движения ротора:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (28)$$

Его интегрирование осуществляется на интеграторе  $\omega$ :

$$\omega = \frac{1}{J} \int_0^t (M - M_c) dt \quad (29)$$

или в операторной форме:

$$\omega = \frac{(M - M_c)}{Js}, \quad (30)$$

где  $J$  — момент инерции вала, приводящего систему в движение.

Сигнал  $\omega(t)$  — вторая динамическая характеристика данной системы (рисунок 11).

Координаты положения кабины можно определить, проинтегрировав линейную скорость её движения:

$$x = \int_0^t \vartheta dt = \int_0^t \omega R dt = R \int_0^t \omega dt. \quad (31)$$

В операторной форме:

$$x = \frac{R\omega}{s}. \quad (32)$$

На компараторе учитывается начальное положение кабины:

$$s = x + A_0, \quad (33)$$

где  $A_0 = -A_1$ ,  $A_1$  определяется по уравнению (13);

$s(t)$  — третья динамическая характеристика системы (рисунок 11).

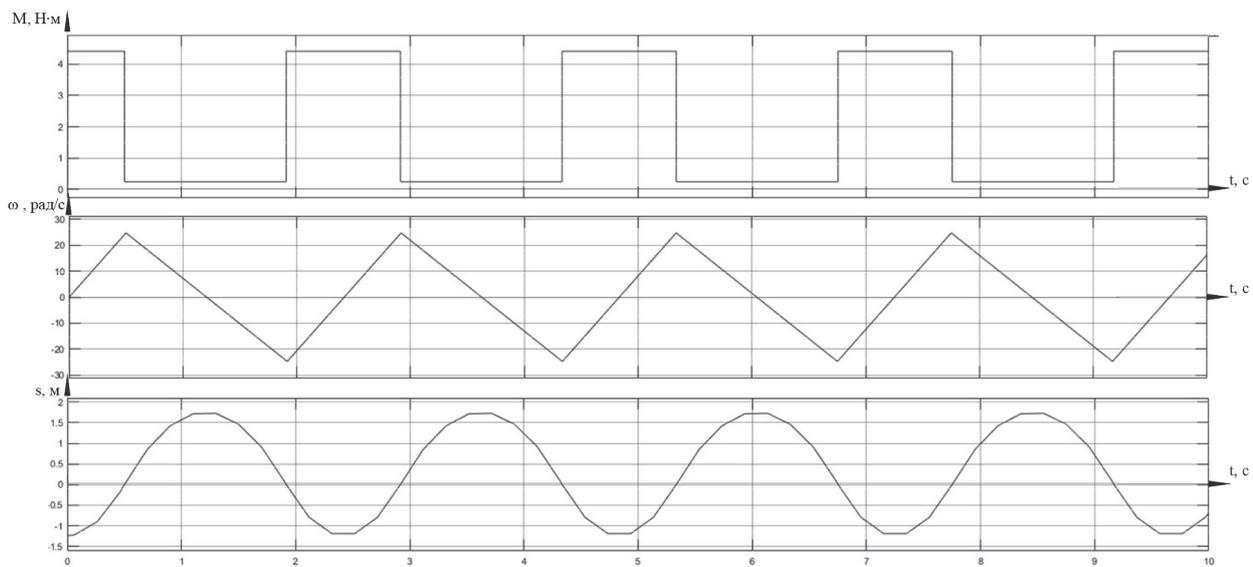
Сравним результаты теоретического расчета и моделирования. Для этого зададимся исходными данными:

$k_1=2$ ;  $k_2=0,3$ ;  $H=3$  м;  $m=1$  кг;  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $R=0,2$  м;  $J=0,01$  кг·м<sup>2</sup>;  $k\Phi=1,2$  В·с.

По формулам (13), (15), (17)–(19), (21)–(26) получим:

$A_0 = -1,24$  м;  $\omega_{max} = 24,6$  рад/с;  $t_1 = 0,50$  с;  $t_2 = 0,72$  с;  $T = 2,44$  с;  $M_{c1} = 3,92$  Н·м;

$M_{c2} = 0,59$  Н·м;  $M_1 = 4,41$  Н·м;  $M_2 = 0,25$  Н·м;  $I_1 = 3,68$  А,  $I_2 = 0,20$  А.



верхний график — зависимость  $M(t)$ ; средний график — зависимость  $\omega(t)$ ;  
нижний график — зависимость  $s(t)$

**Рисунок 11.** Результаты моделирования колебаний системы

Как видим из графиков (рисунок 11), все теоретические расчёты совпадают с результатами моделирования, что свидетельствует об отсутствии ошибок в построении упрощенной математической модели данной колебательной системы.

Данную колебательную систему для создания заданных перегрузок в земных условиях можно применять во многих областях: для тренировки лётчиков и космонавтов перед полетом; в качестве тренажера для людей, страдающих гиподинамией; а также для экипажей подводных лодок; кроме того, возможно применение технологии и в лечебных целях: недавние исследования показали, что воздействие микрогравитации (которая реализуется в режимах II и III работы двигателя, и большая часть периода колебаний происходит именно в этих условиях) способно убивать до 90 % раковых клеток [4]. Вполне возможно, что периодическое воздействие микрогравитации и перегрузки будут оказывать положительное воздействие на здоровье человека.

В дальнейших исследованиях планируется построить математическую модель, учитывающую пассивный момент сопротивления и переходные процессы, происходящие при коммутации якорной цепи обмотки ДПТ НВ. Для изучения влияния данного режима движения кабины на организм, находящийся внутри неё, также предлагается проведение

экспериментов на лабораторных крысах и изучение их основных биологических показателей после серии таких запусков при различных условиях. На основании этих данных можно будет выбрать оптимальные значения коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  уже непосредственно для воздействия на человека.

### Выводы

В ходе исследований проведен аналитический анализ процессов, происходящих в механической колебательной системе, построена математическая модель данной системы и получены результаты моделирования с использованием математического пакета MATLAB R2017b.

Анализ выполнен с рядом допущений: считалось, что пассивный момент сопротивления намного меньше активного, а переходные процессы при коммутации электрической цепи происходят мгновенно.

В результате анализа механической колебательной системы для создания заданных перегрузок построены динамические и статические характеристики электропривода, на основании которых сделан вывод о том, что двигатель, приводящий данную систему в движение, должен иметь абсолютно мягкую механическую характеристику.

Наиболее простым техническим решением является применение двигателя постоянного тока независимого возбуждения, питаемого от источника постоянного тока.

Такой двигатель будет обладать свойством «источника момента».

Использование двигателя с абсолютно мягкой механической характеристикой невозможно без отрицательной обратной связи, так как в таком случае угловая скорость вращения якоря будет неограниченно расти, что приведет к разрушению двигателя.

В данной системе отрицательную обратную связь можно реализовать с помощью датчика положения кабины, при прохождении кабиной переходной точки подающего сигнал на автоматический коммутатор, который будет менять значение тока в якорной

цепи двигателя постоянного тока независимого возбуждения, питаемого от источника постоянного тока.

Результаты моделирования подтвердили теоретическую возможность использования ДПТ НВ, питаемого от источника постоянного тока, для создания заданных перегрузок, что совпадает с результатами аналитического расчета.

Выполнен расчёт параметров основных узлов системы и определение ряда постоянных для частного случая работы системы (при  $k_1=2,0$ ,  $k_2=0,3$ ).

### Список использованной литературы

1. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: учебник для вузов. 6-е изд., доп. и перераб. М.: Энергоиздат, 1981. 576 с.

2. Зотов А.Н., Иванов М.Д. Создание заданной перегрузки при помощи колебательных систем с постоянной восстанавливающей силой при наличии сил тяжести // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Аннотации докладов. 19-24 августа 2019 г., г. Уфа / Отв. ред. д-р физ.-мат. наук А.А. Назаров. Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. 356 с.

3. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 224 с.

4. Ник Лаварс. Может ли микрогравитация убить рак? Ученые готовятся к изучению клеток в космосе. 2 сентября 2019, Новый Атлас. <https://newatlas.com/medical/low-gravity-kill-cancer-cells-space> (дата обращения: 30.10.2019).

### References

1. Chilikin M.G., Sandler A.S. Obshchii kurs elektroprivoda: uchebnyk dlya vuzov [General Course of Electric Drive: Textbook for High Schools]. 6th ed. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 576 p. [in Russian].

2. Zotov A.N., Ivanov M.D. Sozdanie zadannoi peregruzki pri pomoshchi kolebatel'nykh sistem s postoyannoi vosstanavlivayushchei siloi pri nalichii sil tyazhesti [The Creation of a Given Overload Using Oscillatory Systems with Constant Restoring Force in the Presence of Gravity]. *XII Vserossiiskii s"ezd po fundamental'nykh problemam teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki. Annotatsii dokladov. 19-24 avgusta 2019 g., g. Ufa / Otv. red. d-r fiz.-mat. nauk A.A. Nazarov* [XII All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics. Abstracts of Reports. August 19-24, 2019, Ufa / Ed. by Doctor of Physical and Mathematical Sciences A.A. Nazarov]. Ufa, RITs BashGU, 2019. 356 p. [in Russian].

3. Il'inskii N.F. *Osnovy elektroprivoda: ucheb. posobie dlya vuzov* [Fundamentals of Electric Drive: A Manual for Universities]. 2nd ed. Moscow, MEI Publ., 2003. 224 p. [in Russian].

4. Nik Lavars. *Mozhet li mikrogravitatsiya ubit' rak? Uchenye gotovyatsya k izucheniyu kletok v kosmose* [Can Low Gravity Kill Cancer? Scientists Prepare to Study Cells in Space]. 2 sentyabrya 2019, Novyi Atlas. <https://newatlas.com/medical/low-gravity-kill-cancer-cells-space> (data obrashcheniya: 30.10.2019).



**Шабанов В. А.**  
**Shabanov V. A.**

*кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой электротехники и  
электрооборудования предприятий,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*



**Хакимов Э. Ф.**  
**Khakimov E. F.**  
*аспирант,*

*ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*



**Калимгулов А. Р.**  
**Kalimgulov A. R.**

*кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры электротехники и  
электрооборудования предприятий,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*



**Сергеенкова Е. В.**  
**Sergeenkov E. V.**

*старший научный сотрудник,  
ООО «НИИ Транснефть»,  
г. Москва, Российская Федерация*

УДК 622.692.4; 621.31

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-83-90

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КПД ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ОТ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАГРУЗКИ И ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ**

Трубопроводы для перекачки жидкостей проектируются так, что номинальной производительности трубопровода соответствует номинальная подача перекачивающих насосов и номинальная нагрузка их электроприводов. При номинальном режиме трубопровода насосы и электродвигатели будут работать с максимальным (номинальным) КПД. Однако режим работы трубопровода может отличаться от номинального. При этом КПД насосов и электродвигателей снижаются. Для повышения КПД и снижения потерь мощности все шире используется частотно-регулируемый электропривод (ЧРП). При оценке эффективности использования ЧРП необходимо учитывать КПД преобразователя частоты. Поэтому оценка КПД электродвигателей и преобразователей частоты в составе ЧРП при частотах меньше номинальной является актуальной задачей.

В статье рассматривается изменение КПД преобразователя частоты и синхронного электродвигателя мощностью 8000 кВт в составе ЧРП при изменении коэффициента загрузки и частоты вращения. Получены аналитические выражения для КПД, приведены

результаты расчета КПД для преобразователя частоты и электродвигателя при различных функциональных зависимостях. Определены функциональные зависимости, расчеты КПД по которым дают наименьшую погрешность.

**Ключевые слова:** частотно-регулируемый электропривод, преобразователь частоты, электродвигатель, насос, трубопровод, коэффициент полезного действия.

## RESEARCH OF DEPENDENCE OF ELECTRIC MOTOR EFFICIENCY AND FREQUENCY CONVERTER ON LOADING RATE AND ROTATION FREQUENCY

Pipelines for pumping liquids are designed so that the nominal flow rate of the pipeline corresponds to the nominal flow of the transfer pumps and the rated load of their electric drives. In the nominal mode of the pipeline, pumps and electric motors will operate with maximum (nominal) efficiency. However, the operating mode of the pipeline may differ from the nominal. In this case, the efficiency of pumps and electric motors is reduced. To increase efficiency and reduce power losses, a frequency-controlled electric drive (VFD) is increasingly being used. When assessing the effectiveness of the use of VFDs, the efficiency of the frequency converter must be taken into account. Therefore, the evaluation of the efficiency of electric motors and frequency converters in the VFD at frequencies less than the nominal is an important task.

The article discusses the change in the efficiency of the frequency converter and a synchronous electric motor with a capacity of 8000 kW in the VFD when changing the load factor and speed. The analytical expressions for the efficiency are obtained, the results of calculating the efficiency for the frequency converter and electric motor are obtained for various functional dependencies. Functional dependencies are determined, the efficiency calculations for which give the smallest error.

**Key words:** variable frequency drive, frequency converter, electric motor, pump, pipeline, efficiency.

### *Введение*

Трубопроводы для перекачки жидкостей (воды, нефти, нефтепродуктов) проектируются так, что номинальной производительности трубопровода соответствует номинальная подача перекачивающих насосов и номинальная нагрузка их электроприводов. Номинальному режиму работы насосов и электродвигателей соответствует максимальный (номинальный) КПД и, как следствие, минимальный расход электроэнергии на перекачку. Однако режим работы трубопровода может отличаться от номинального [1–3]. При подаче, не равной номинальной, КПД насосов и электродвигателей снижается. При этом растут относительные потери мощности и в насосе, и в электродвигателях. Потери мощности еще больше возрастают при необходимости дросселировать напор насосов [4–7]. Одним из путей повышения эффективности работы производственных механизмов является частотно-регулируемый электропривод (ЧРП) [8–10]. Внедрение ЧРП позволит не только исключить возникновение гидравлических ударов в системе

трубопроводов, но и решать задачу снижения потребления электроэнергии за счет повышения КПД насосов и электродвигателей [11, 12]. Оценка КПД электродвигателей в настоящий момент либо производится путем расчета потерь мощности в электродвигателях, исходные данные для которых отсутствуют в каталогах, либо принимается допущение, что КПД электродвигателя в составе ЧРП не изменяется при изменении частоты питающего напряжения. Целью статьи является исследование зависимости КПД преобразователя частоты и КПД электродвигателя от частоты вращения и коэффициента загрузки.

### *Метод исследований*

Исследования выполнялись методом наименьших квадратов. На первом этапе исследования КПД электродвигателей и преобразователей частоты выполнялись по однофакторным моделям в функции коэффициента загрузки при номинальной частоте. На втором этапе исследовалось одновременное влияние частоты и коэффициента загрузки, для этого в методе наименьших квадратов использовались двухфакторные

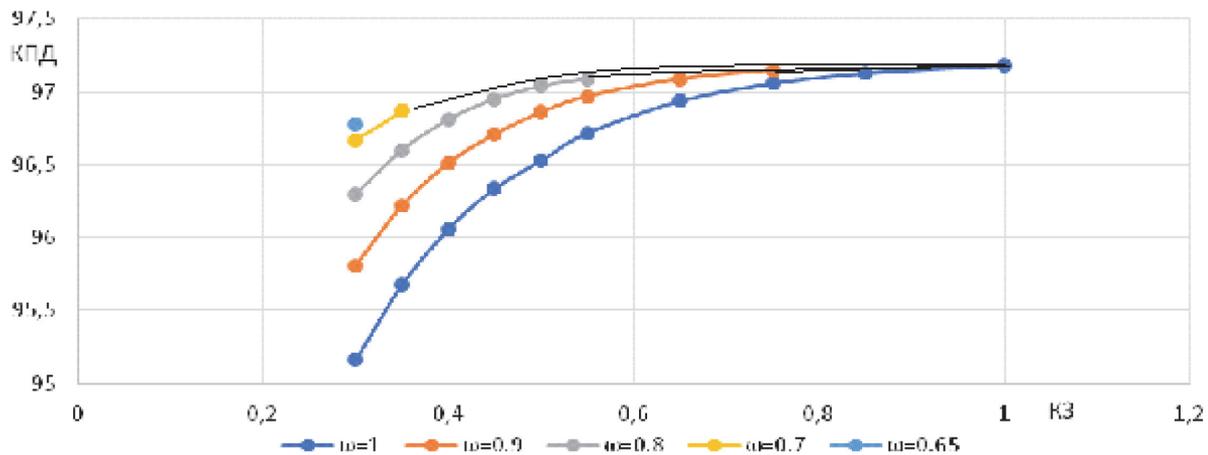


Рисунок 1. Диаграмма рассеяния и линии тренда КПД электродвигателя

математические модели. В качестве корреляционных функций использовались степенные, как наиболее точно описывающие диаграмму рассеяния исходных данных.

#### Исследование КПД электродвигателя

Диаграмма рассеяния исходных данных по КПД синхронного электродвигателя мощностью 8000 кВт в зависимости от коэффициента загрузки и относительной частоты вращения приведена на рисунке 1. По точкам диаграммы рассеяния приведены линии тренда в функции коэффициента загрузки электродвигателя  $k_{з.д}$  для разных частот вращения  $\omega$  от  $\omega=1$  до  $\omega=0,65$ .

Из рисунка 1 видно, что КПД электродвигателя снижается при снижении нагрузки на валу при постоянной частоте питающего напряжения и повышается при снижении частоты при постоянной нагрузке.

Известно, что при номинальной частоте вращения (при  $\omega=1$ ) зависимость КПД электродвигателя от нагрузки  $\eta_{\omega=1}$  может быть аппроксимирована степенной функцией второго порядка вида:

$$\eta_{\omega=1} = r_0 + r_1 \cdot k_{з.д} + r_2 \cdot k_{з.д}^2, \quad (1)$$

где  $k_{з.д}$  — коэффициент загрузки электродвигателя;

$r_0, r_1, r_2$  — коэффициенты аппроксимации [13].

Из диаграммы рассеяния (рисунок 1) видно, что при других частотах графики КПД аналогичны графику при номинальной частоте. Поэтому можно принять, что при любой постоянной частоте вращения зависимость КПД электродвигателя от нагрузки может быть представлена квадратичной

функцией (1), в которую должна быть введена зависимость от частоты. Для определения коэффициентов  $r_0, r_1, r_2$  можно воспользоваться аппроксимацией табличных данных методом наименьших квадратов с помощью табличного процессора MS Excel. Использование этого процессора позволяет автоматически определить и коэффициенты корреляции, и сходимость аппроксимированной кривой с исходными данными. При коэффициентах  $r_0=92,668, r_1=0,10792, r_2=-0,0638$ , приведенных в уравнении на рисунке 2, отличие КПД по аппроксимированной кривой (линии тренда) от табличных данных не превышает 0,2 % во всем рассматриваемом диапазоне.

На рисунке 3 представлены тренды КПД электродвигателя в функции частоты при постоянном коэффициенте загрузки.

Из рисунка 3 видно, что КПД электродвигателя при изменении частоты вращения при постоянном коэффициенте загрузки изменяется нелинейно, увеличиваясь с понижением частоты вращения. Повышение КПД при снижении частоты вращения зависит от нагрузки на валу. При снижении частоты от номинальной до 0,9 КПД электродвигателя повышается на величину от 0,09 % при нагрузке 0,75 до 0,35 % при нагрузке 0,3. При снижении частоты вращения до 0,8 КПД электродвигателя повышается на величину от 0,31 % при нагрузке на валу  $k_з=0,55$  до 1,14 % при нагрузке 0,3.

При поиске функциональной зависимости КПД электродвигателя от коэффициента

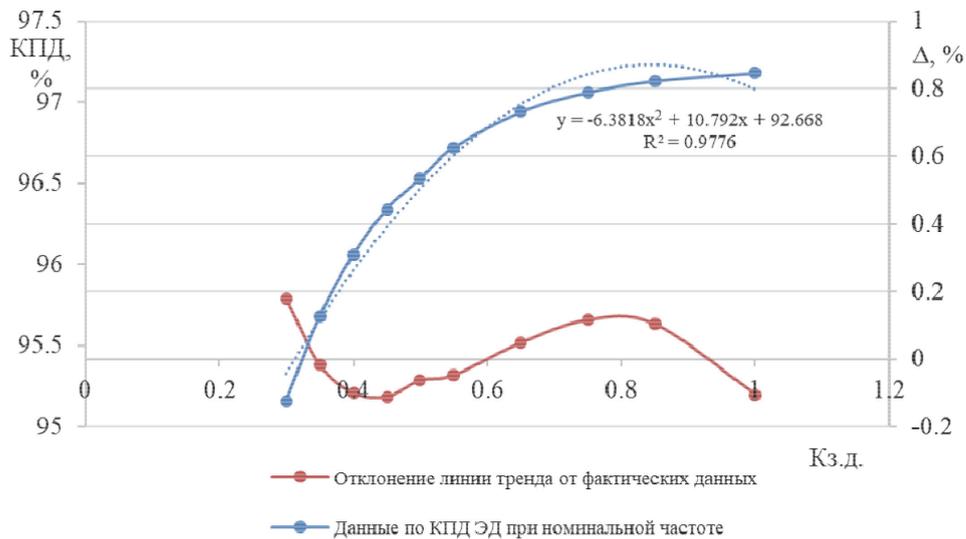


Рисунок 2. Изменение КПД электродвигателя при номинальной  $\omega$

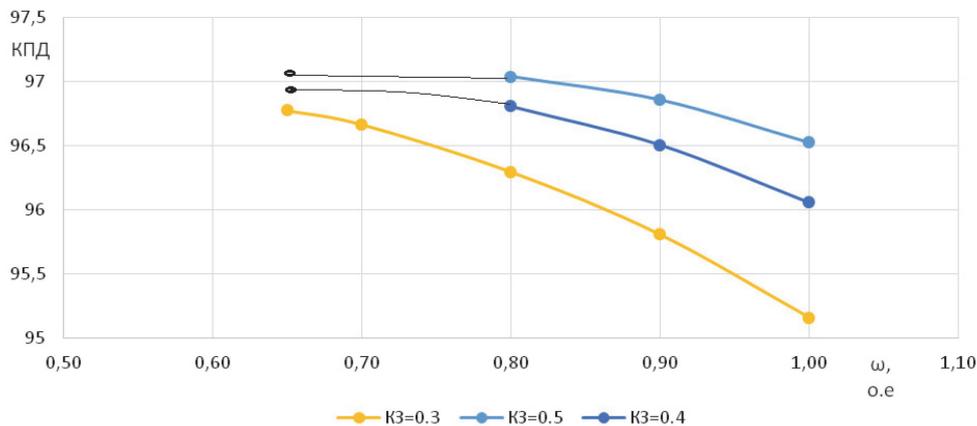


Рисунок 3. Изменение КПД электродвигателя при изменении частоты вращения для различных коэффициентах загрузки

загрузки  $k_{з,д}$  и частоты вращения  $\omega$  были исследованы зависимости вида:

$$\eta = \eta_{\omega=1} + r_3 \cdot f(\omega), \quad (2)$$

где  $\eta_{\omega=1}$  — КПД электродвигателя при номинальной частоте вращения, согласно (1);

$r_3$  — коэффициент аппроксимации при функции  $f(\omega)$ .

Исследуемые виды функции  $f(\omega)$  приведены в таблице 1. Для уравнений (2) при разных функциях  $f(\omega)$  методом наименьших квадратов определяются коэффициент  $r_3$ , среднее  $\Delta_{ср}\%$  и максимальное  $\Delta_{макс}\%$  отклонение от данных диаграммы рассеяния.

Таблица 1. Результаты исследования КПД электродвигателя

№	Функциональная зависимость	Коэффициент $r_3$	$\Delta_{макс}\%$	$\Delta_{ср}\%$
1	$\eta_{\omega=1} + r_3 \cdot (1 - \omega)$	0,03731092437	0,4	0,19
2	$\eta_{\omega=1} + r_3 \cdot (1 - \omega)^2$	0,02055205514	0,4	0,21
3	$\eta_{\omega=1} + r_3 \cdot (1 - \omega_2)$	0,25513205280	1,5	0,39
4	$\eta_{\omega=1} + r_3 \cdot \omega$	0,01150417692	1,1	0,51
5	$\eta_{\omega=1} + r_3 \cdot \omega_2$	0,00874640882	1,1	0,43

Из таблицы 1 видно, что наименьшие среднее  $\Delta_{ср}\%$  и максимальное  $\Delta_{макс}\%$  отклонения от табличных данных имеет зависимость под номером «1». Таким образом, наибольшее приближение к табличным

значениям КПД дает использование функциональной зависимости вида:

$$\eta = r_0 + r_1 \cdot k_{з,д} + r_2 \cdot k_{з,д}^2 + r_3 \cdot (1 - \omega), \quad (3)$$

где  $r_0 = 92,668$ ;

$r_1 = 0,10792$ ;

$$r_2 = -0,0638;$$

$$r_3 = 0,03731092437.$$

*Исследование КПД преобразователя частоты*

Диаграммы рассеяния КПД преобразователя частоты мощностью 8000 кВт в зависимости от коэффициента загрузки и относительной частоты вращения представлены на рисунке 4.

Из рисунка 4 видно, что КПД преобразователя частоты снижается как при снижении частоты, так и при снижении коэффициента загрузки. При снижении частоты на 10 % от 1,0 до 0,9 КПД преобразователя частоты снижается на 0,48–0,51 % при коэффициентах загрузки от  $k_{з,д} = 0,35$  до 1,0. При снижении частоты на 20 % от 1,0 до 0,8 КПД преобразователя частоты снижается на 1,33 % при коэффициенте загрузки 0,65 и на 0,93 % при  $k_{з,д} = 0,3$ .

Формы трендов диаграммы рассеяния преобразователя частоты на рисунке 4 аналогичны формам трендов на рисунке 1 для электродвигателя, поэтому зависимость КПД преобразователя частоты от нагрузки при номинальной частоте целесообразно представить в виде квадратичной функции вида:

$$\eta = t_0 + t_1 \cdot k_{з,д} + t_2 \cdot k_{з,д}^2, \tag{4}$$

где  $t_0, t_1, t_2$  — коэффициенты аппроксимации;  $k_{з,д}$  — коэффициент загрузки.

Для исследуемого преобразователя частоты методом наименьших квадратов были получены значения  $t_0 = 0,9596, t_1 = 0,0526, t_2 = -0,0328$

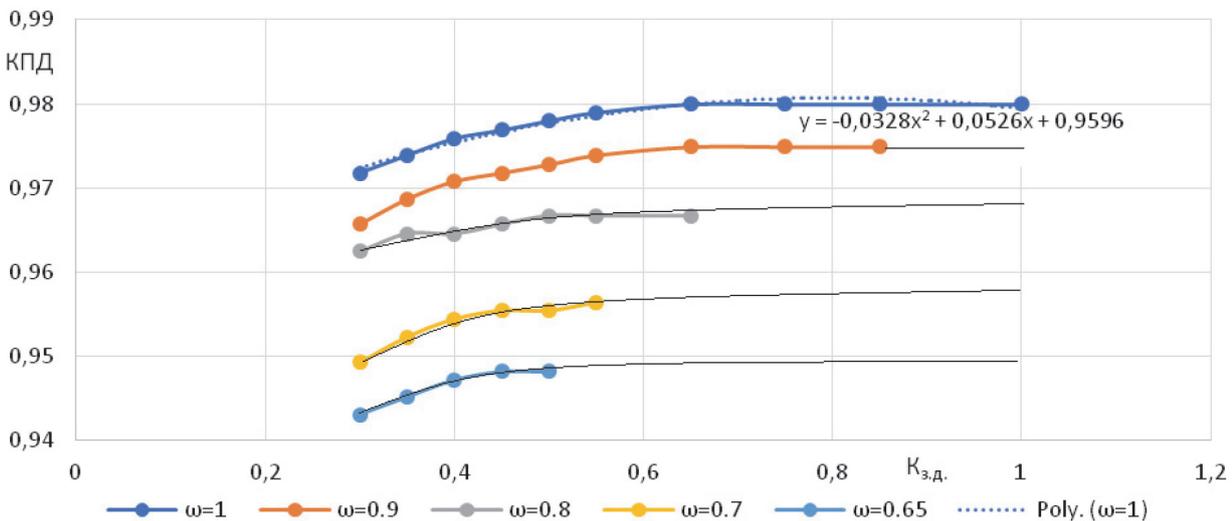
При поиске функциональной зависимости КПД преобразователя частоты от нагрузки на валу  $k_{з,д}$  и частоты вращения были исследованы зависимости, представленные в таблице 2.

В таблице 2 для всех исследуемых функций приведены среднее и максимальное отклонения от данных диаграммы рассеяния. Наименьшую ошибку имеет зависимость под номером «1»:

$$\eta = t_0 + t_1 \cdot k_{з,д} + t_2 \cdot k_{з,д}^2 + t_3 \cdot (1 - \omega), \tag{5}$$

где для данного типа преобразователя частоты  $t_0 = 0,9596, t_1 = 0,0526, t_2 = -0,0328, t_3 = -0,063523810$ .

Оценим изменение потерь мощности в ЧРП при снижении частоты вращения электродвигателя. При снижении частоты потери мощности в электродвигателе снижаются, но при этом появляются потери мощности в



**Рисунок 4.** Диаграммы рассеяния КПД преобразователя частоты

**Таблица 2.** Результаты исследований КПД преобразователя частоты

№	Функциональная зависимость	Коэффициент $t_3$	$\Delta_{\text{макс}}$ , %	$\Delta_{\text{ср}}$ , %
1	$\eta = t_0 + t_1 \cdot k_{з,д} + t_2 \cdot k_{з,д}^2 + t_3 \cdot (1 - \omega)$	-0,063523810	0,75	0,20
2	$\eta = t_0 + t_1 \cdot k_{з,д} + t_2 \cdot k_{з,д}^2 + t_3 \cdot (1 - \omega)^2$	-0,036087510	0,78	0,24
3	$\eta = t_0 + t_1 \cdot k_{з,д} + t_2 \cdot k_{з,д}^2 + t_3 \cdot (1 - \omega^2)$	-0,344829932	1,35	0,42
4	$\eta = t_0 + t_1 \cdot k_{з,д} + t_2 \cdot k_{з,д}^2 + t_3 \cdot \omega$	-0,029343395	1,74	1,74
5	$\eta = t_0 + t_1 \cdot k_{з,д} + t_2 \cdot k_{з,д}^2 + t_3 \cdot \omega^2$	-0,020788639	1,63	1,32

преобразователе частоты, которые увеличиваются при снижении частоты. Снижение потерь мощности в электродвигателе при снижении частоты вращения определяется повышением его КПД и зависит от нагрузки на валу. По уравнениям (3) и (5) для КПД электродвигателя и преобразователя частоты было найдено, что при снижении частоты от номинальной до 0,9 потери мощности в электродвигателе снижаются на величину от 0,09 % при нагрузке 0,75 и до 0,35 % при нагрузке 0,3. При снижении частоты вращения до 0,8 потери мощности в электродвигателе снижаются на величину от 0,31 % при нагрузке на валу  $k_3=0,55$  до 1,14 % при нагрузке 0,3. Потери мощности в преобразователе частоты при снижении частоты от 1,0 до 0,9 увеличиваются от 2,51 % при коэффициенте загрузки 0,85 до 3,43 % при  $k_3=0,3$ . При снижении частоты от 1,0 до 0,8 потери мощности в преобразователе частоты увеличиваются от 3,33 % при коэффициенте

загрузки 0,65; до 3,75 % при  $k_3=0,3$ . Из приведенных расчетов видно, что при всех частотах и при всех нагрузках потери мощности в преобразователе частоты существенно превышают снижение потерь мощности в электродвигателе. Поэтому снижение потерь мощности на перекачку при использовании ЧРП возможно только за счет повышения КПД перекачивающих насосов.

#### Выводы

1. Получены функциональные зависимости, позволяющие оценить КПД преобразователя частоты и электродвигателя при изменении частоты и коэффициента загрузки.
2. Показано, что при всех частотах вращения и при всех нагрузках потери мощности в преобразователе частоты существенно превышают снижение потерь мощности в электродвигателе, поэтому снижение потерь мощности на перекачку при использовании ЧРП возможно только за счет повышения КПД перекачивающих насосов.

#### Список литературы

1. Коршак А.А., Нечваль А.М. Трубопроводный транспорт нефти, нефтепродуктов и газа: учеб. для вузов. Уфа: ООО «Дизайн-ПолиграфСервис», 2001. 571 с.
2. Зайцев Л.А., Ясинский Г.С. Регулирование режимов магистральных нефтепроводов. М.: Недра, 1980. 187 с.
3. Туманский А.П. Оптимизация режимов перекачки по магистральным трубопроводам с перекачивающими станциями, оборудованными частотно-регулируемым приводом // Транспорт и хранение нефтепродуктов. 2005. № 8. С. 11–14.
4. Шабанов В.А., Кабаргина О.В., Павлова З.Х. Оценка эффективности частотного регулирования магистральных насосов по эквивалентному коэффициенту полезного действия // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 6. С. 24–29. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov\\_8.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_8.pdf).
5. Zemenkova M.Y., Gladenko A.A. Operational Monitoring of Oil Transport Regimes for Frequency Regulation of the Pump Unit // Journal of Physics: Conference Series. 2019, 1210(1), 012165.
6. Federico H.H., Bassetto I., Mónica J.E. Performance/Cost Assessment of a Variable Frequency Drive (VFD) Control Applied to a Brazilian Long Pipeline // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE), 2017, November 3–9. Tampa, Florida, USA, 2017. Vol. 12: Transportation Systems.
7. Federico H.H., Bassetto I., Mónica J.E. Variable Frequency Drive (VFD) Applied to Brazilian Long Pipelines-Performance/Cost Analysis // Rio Pipeline Conference and Exposition, Technical Papers. 2017, October.
8. Козярук А.Е. Современные эффективные электроприводы производственных и транспортных механизмов // Электротехника. 2019. № 3. С. 33–37.
9. Крюков О.В. Энергетическая оптимизация транспортных потоков газа с помощью электроприводных агрегатов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. № 4 (115). С. 115–120.
10. Хрусталева В.А., Гариевский М.В. Системные преимущества модернизации главных циркуляционных насосов АЭС с ВВЭР установкой частотно-регулируемых

приводов // Труды Академэнерго. 2019. № 1. С. 36–45.

11. Шабанов В.А., Ахметгареев А.А. К вопросу о выборе оптимального режима работы магистрального насоса при частотно-регулируемом приводе // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2012. Вып. 3 (89). С. 119–126.

12. Шабанов В.А., Хакимов Э.Ф., Пирожник Н.Л. Анализ энергоэффективности частотно-регулируемого электропривода на действующих НПС за счет повышения КПД магистральных насосов // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10. № 2. С. 55–60.

13. Нечваль А.М. Основные задачи при проектировании и эксплуатации магистральных нефтепроводов: учеб. пособие. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2005. 81 с.

### References

1. Korshak A.A., Nechval' A.M. *Truboprovodnyi transport nefii, nefteproduktov i gaza: ucheb. dlya vuzov* [Pipeline Transport of Oil, Oil Products and Gas: Textbook for Universities]. Ufa, ООО «Dizain-PoligrafServis», 2001. 571 p. [in Russian].

2. Zaitsev L.A., Yasinskii G.S. *Regulirovanie rezhimov magistral'nykh nefteprovodov* [Main Oil Pipelines Modes Regulation]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 187 p. [in Russian].

3. Tumanskii A.P. Optimizatsiya rezhimov perekachki po magistral'nym truboprovodam s perekachivayushchimi stantsiyami, oborudovannymi chastotno-reguliruemykh privodom [Optimization of Pumping Modes along Trunk Pipelines with Pumping Stations Equipped with a Frequency-Controlled Drive]. *Transport i khranenie nefteproduktov — Transport and Storage of Petroleum Products*, 2005, No. 8, pp. 11–14. [in Russian].

4. Shabanov V.A., Kabargina O.V., Pavlova Z.Kh. Otsenka effektivnosti chastotnogo regulirovaniya magistral'nykh nasosov po ekvivalentnomu koeffitsientu poleznogo deistviya [Evaluating the Effectiveness of Adjustable-Frequency Electric Drives of Main Pumps]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2011, No. 6, pp. 24–29. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov\\_8.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_8.pdf). [in Russian].

ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov\_8.pdf. [in Russian].

5. Zemenkova M.Y., Gladenko A.A. Operational Monitoring of Oil Transport Regimes for Frequency Regulation of the Pump Unit. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1210(1), 012165.

6. Federico H.H., Bassetto I., Mónica J.E. Performance/Cost Assessment of a Variable Frequency Drive (VFD) Control Applied to a Brazilian Long Pipeline. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 2017, November 3–9. Tampa, Florida, USA, 2017. Vol. 12: Transportation Systems.

7. Federico H.H., Bassetto I., Mónica J.E. Variable Frequency Drive (VFD) Applied to Brazilian Long Pipelines-Performance/Cost Analysis. *Rio Pipeline Conference and Exposition*, Technical Papers. 2017, October.

8. Kozyaruk A.E. Sovremennye effektivnye elektroprivody proizvodstvennykh i transportnykh mekhanizmov [Modern Effective Electric Drives of Production and Transport Mechanisms]. *Elektrotehnika — Electrical Engineering*, 2019, No. 3, p. 33–37. [in Russian].

9. Kryukov O.V. Energeticheskaya optimizatsiya transportnykh potokov gaza s pomoshch'yu elektroprivodnykh agregatov [Energy Optimization of Gas Transport Flows by Electric Drive Units]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva — Transactions of NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2016, No. 4 (115), pp. 115–120. [in Russian].

10. Khrustalev V.A., Garievskii M.V. Sistemnye preimushchestva modernizatsii glavnykh tsirkulyatsionnykh nasosov AES s VVER ustanovkoi chastotno-reguliruemykh privodov [System Advantages of Upgrading the Main Circulating Pump of Nuclear Power Plants with VVER by Installing a Variable Frequency Drive]. *Trudy Akademenergo — Transactions of Akademenergo*, 2019, Vo. 1, pp. 36–45. [in Russian].

11. Shabanov V.A., Akhmetgareev A.A. K voprosu o vybore optimal'nogo rezhima raboty magistral'nogo nasosa pri chastotno-reguliruemykh privode [To the Question of Selection of the Optimal Mode Job Main Pump by Frequency Adjustable Drive]. *Problemy sbora*,

*podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov — Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2012, Issue 3, pp. 7–10. [in Russian].

12. Shabanov V.A., Khakimov E.F., Pirozhnik N.L. Analiz energoeffektivnosti chastotno-reguliruemogo elektroprivoda na deistvuyushchikh NPS za schet povysheniya KPD magistral'nykh nasosov [Analysis of Power Efficiency of Frequency — Adjustable Electric

Drive on Operating NPS at the Expense of Increase of Efficiency Main Pumps]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2012, Vol. 10, No. 2, pp. 55–60. [in Russian].

13. Nechval' A.M. *Osnovnye zadachi pri proektirovanii i ekspluatatsii magistral'nykh nefteprovodov: ucheb. posobie* [The Main Tasks in the Design and Operation of Trunk Pipelines: Tutorial]. Ufa, UGNTU Publ., 2005. 81 p. [in Russian].



**Казанцев В. П.**  
**Kazantsev V. P.**

доктор технических наук,  
доцент,  
профессор кафедры  
микропроцессорных средств  
автоматизации, ФГБОУ ВО  
«Пермский национальный  
исследовательский  
политехнический  
университет»,  
г. Пермь,  
Российская Федерация



**Даденков Д. А.**  
**Dadenkov D. A.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
микропроцессорных  
средств автоматизации,  
ФГБОУ ВО «Пермский  
национальный  
исследовательский  
политехнический  
университет»,  
г. Пермь,  
Российская Федерация



**Поносова Л. В.**  
**Ponosova L. V.**

магистрант кафедры  
микропроцессорных  
средств автоматизации,  
ФГБОУ ВО «Пермский  
национальный  
исследовательский  
политехнический  
университет»,  
г. Пермь,  
Российская Федерация

УДК 621.3.078

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-91-98

## СЛЕДЯЩАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ СЕТОЧНОЙ ЧАСТИ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

Рассмотрены вопросы синтеза системы управления электроприводами двухсеточной бумагоделательной машины. Качественные показатели бумаги и картона напрямую связаны с точностными характеристиками электроприводов обеих сеток в условиях заведомо непредсказуемых изменений нагрузок на их валах. Показано, что для решения задачи стабилизации скоростей сеток и их соотношения целесообразно реализовать принцип следящего управления, причем в качестве ведущей подсистемы предлагается использовать подсистему стабилизации скорости нижней сетки, а в качестве ведомой – следящую подсистему скорости верхней сетки со стабилизацией нулевого отклонения интеграла от разницы скоростей электроприводов сеток. Представлены результаты синтеза и анализа двумерной следящей системы финитного управления электроприводами сеток в концепции современной векторно-матричной теории управления. Получена дискретно-непрерывная математическая модель электромеханической системы. Для обеспечения повышенных показателей качества взаимосвязанного регулирования скоростей сеток применены дискретные финитные регуляторы состояния. В результате синтеза получены выражения для реализации дискретного устройства управления. При имитационном моделировании, с учетом случайного характера изменения нагрузок приводов со стороны различных устройств, обезвоживающих бумажное полотно, получены реакции приводов на одинаковое приращение задания скоростей и на ступенчатые приращения нагрузок на валах ведущего и ведомого приводов. Результаты моделирования показали эффективность предложенных принципов управления электроприводами, как в автономном, так и в следящем режимах. Электромеханическая система демонстрирует свойства астатического управления, сводя отклонения скоростей в установившихся режимах к нулю. Решение задачи снижения взаимного влияния электроприводов на стабилизацию скоростей сеток и поддержание их заданного соотношения, в условиях непредсказуемых изменений нагрузок, позволит свести к минимуму смещения слоев бумаги, формируемых на обеих сетках. Практическое применение предложенной

системы управления электроприводом на производстве способствует повышению качества продукции, выпускаемой с помощью двухсеточной бумагоделательной машины.

**Ключевые слова:** технологический процесс, бумагоделательная машина, сеточная часть, электропривод, следящая система, финитное управление, регулятор состояния, дискретно-непрерывная модель, векторно-матричная форма.

## ELECTRIC SERVO DRIVE SYSTEM OF PAPER MACHINE

Here are presented the synthesis of paper machine electric drives control systems. Quality indicators of paper and cardboard are directly related to the accuracy characteristics of the electric drives of both paper machine wires in conditions of unpredictable changes in loads on their shafts. It is shown that to solve the problem of stabilization of wires velocities and their ratio it is advisable to implement the principle of servo control. It is proposed to use the lower wire speed stabilization subsystem as the leading one, and the upper wire speed servo subsystem with the stabilization of the zero deviation of the integral from difference of electric drives speed. Presents the results of a synthesis and analysis of two-dimensional servo system finite electric drives control in conception of the modern vector-matrix control theory. A discrete-continuous mathematical model of the electromechanical system is obtained. To ensure the quality of speed control, discrete finite state regulators are used. As a result of the synthesis, expressions for the implementation of a discrete control device are obtained. In simulation, the reactions of the drives to the increment of the speed and to the increments of the loads on the drive shafts are obtained. The simulation results showed the effectiveness of the proposed principles of electric drive control. The electromechanical system demonstrates the properties of astatic control and reduces the deviation of velocities in steady-state modes to zero. The solution to the problem of reducing the mutual influence of electric actuators for the stabilization of the velocities of the paper machine wire and maintaining them in the specified ratios will reduce to a minimum the displacement of the paper layers formed on both wire. The practical application of the proposed electric drive control system in production contributes to improving the quality of products manufactured on a paper machine.

**Key words:** manufacturing process, paper machine, wire section, electric drive, servo system, finite control, state feedback controller, discrete-continuous model vector-matrix form, synthesis method.

### *Введение и постановка задачи*

Двухсеточные бумаго- и картоноделательные машины относятся к одному из последних — четвертому поколению и наиболее востребованы потребителями бумаги и картона вследствие возможностей реализации многочисленных потребительских качеств производимой продукции [1, 2]. При этом существенное влияние на физико-механические свойства и характеристики полотна оказывают алгоритмы управления приводами сеток и настройка электромеханической системы управления (ЭМСУ) сеточной части, которые позволяют обеспечить минимальный разброс отклонений скоростей сеток и, тем самым, стабилизацию показателей качества бумажного полотна [1, 3].

Натяжение и приведение в движение нижней сетки осуществляется с помощью ряда валов — гауч-вала, сеткоповоротного вала, подсеточного валика и грудного вала, а

верхней сетки — с помощью сетководящего и комбинированного валов [2, 3]. Первоначальное натяжение бумажного полотна формируется именно в сеточной части бумагоделательной машины (БДМ), что обеспечивает управляемую проводку полотна, и без него движение полотна становится неконтролируемым. Проблема формирования требуемого натяжения [4] бумажного полотна на сетках заключается в том, что бумажное полотно как таковое еще не сформировано. Это приводит к тому, что натяжение мокрого полотна в сеточной части БДМ контролировать с помощью датчиков натяжения весьма проблематично, поскольку сухость полотна даже в конце сеточной части составляет всего 15–23 % [1, 2]. Вместе с тем, уже в сеточной части БДМ натяжение полотна непосредственно влияет на ориентацию волокон в продольном и поперечном сечениях и, как следствие, на механические,

упругопластические, гидрофобные и иные свойства бумаги и картона.

В настоящее время функцию косвенного контроля натяжения полотна реализуют, как правило, на основе контроля токов (электромагнитных моментов) электродвигателей, которые косвенно отражают изменение нагрузок на валах электродвигателей сеток, приводящих к изменениям линейных скоростей сеток и, соответственно, натяжения бумажного полотна [2–4]. В ряде случаев косвенный контроль натяжения мокрого полотна реализуют на основе мониторинга относительного изменения ширины и скорости перемещения полотна, но такой подход может быть применен лишь к приводам прессовой части БДМ.

Информация о токах в обмотках и скоростях электродвигателей используется для решения двух взаимосвязанных задач:

— регулирование натяжения сеточного полотна на каждой из сеток за счет распределения нагрузок между приводами;

— изменение соотношения линейных скоростей двух сеток, сводя его, как правило, к единице в установившихся режимах за счет ручного или автоматизированного воздействия на один из приводов.

Для привода сеток БДМ применяют, как правило, электродвигатели постоянного тока, но в постановке задачи исследования тип привода не имеет существенного значения.

Взаимовлияние подсистем управления сетками приводит к необходимости решения сложной задачи многосвязного управления электроприводами сеток для достижения качества производимой бумаги (картона). При этом качество двухстороннего полотна в существенной степени зависит именно от несоответствия мгновенных скоростей ведущих электроприводов двух сеток, и задача оптимизации двумерного управления ими к настоящему времени не получила своего решения.

В связи с этим предлагается в качестве приоритетной задачи рассматривать задачу стабилизации соотношения линейных скоростей сеток, что позволяет применить принцип следящего управления [5] к приводу одной из сеток, рассматривая его в качестве ведомого

(следящего), скорость которого подстраивается под изменение скорости ведущего привода. При этом нагрузки на валах вспомогательных приводов обеих сеток, оказывающих влияние на натяжение полотна, целесообразно рассматривать как возмущающие воздействия, действующие на ведущие приводы сеток, точно так же, как и разного рода устройства, обеспечивающие двухстороннее обезвоживание полотна (шаберы, отсасывающие ящики, гидропланки или регистровые валики, камеры отсасывающего гауч-вала и пр.). Изменения нагрузок оказывают наибольшее влияние на скорость электропривода нижней сетки. Следовательно, на него целесообразно возложить функцию стабилизации скорости нижней сетки в автономном режиме и, соответственно, использовать в качестве ведущей подсистемы, а на ведомый электропривод верхней сетки возложить помимо стабилизации скорости функцию парирования разбаланса скоростей нижней и верхней сеток, т.е. использовать его в качестве следящего привода в составе двумерной ЭМСУ сеточной части БДМ.

#### *Основная часть*

Синтез системы управления электроприводами сеток традиционно ведется по принципу каскадного управления [3], когда каждый из контуров ЭМСУ включает одинаковые по структуре системы регулирования скоростей двигателей с подчиненными контурами регулирования электромагнитных моментов (токов якорей). Ниже рассмотрены вопросы синтеза системы управления электроприводами сеточной части БДМ, имеющей следующие основные параметры: ширина сетки 2,6 м, длина нижней сетки 32 м, длина верхней сетки 15,2 м, длина нижнего сеточного стола — 13,75 м, верхнего — 5,75 м, максимальная линейная скорость полотна — 10 м/с. Электропривод сеток выполнен на базе четырех идентичных электродвигателей постоянного тока с индивидуальными тиристорными преобразователями Simoreg DC фирмы Siemens. Значения основных номинальных параметров электродвигателей ЭМСУ: мощность — 105 кВт, напряжение на якоре — 440 В, скорость вращения — 183 рад/с, ток якоря — 263 А.

Скорости сеток регулируются изменением якорного напряжения двигателей при неизменном потоке возбуждения, два из которых могут рассматриваться в качестве основных в отношении проводки бумажного полотна. Таким образом, при синтезе ЭМСУ сеточной части БДМ можно рассмотреть во взаимо-

действии лишь два электропривода: гауч-вала нижней сетки и сетководящего вала верхней сетки.

Упрощенная функционально-структурная схема двумерной следящей ЭМСУ с каскадным регулированием приведена на рисунке 1.

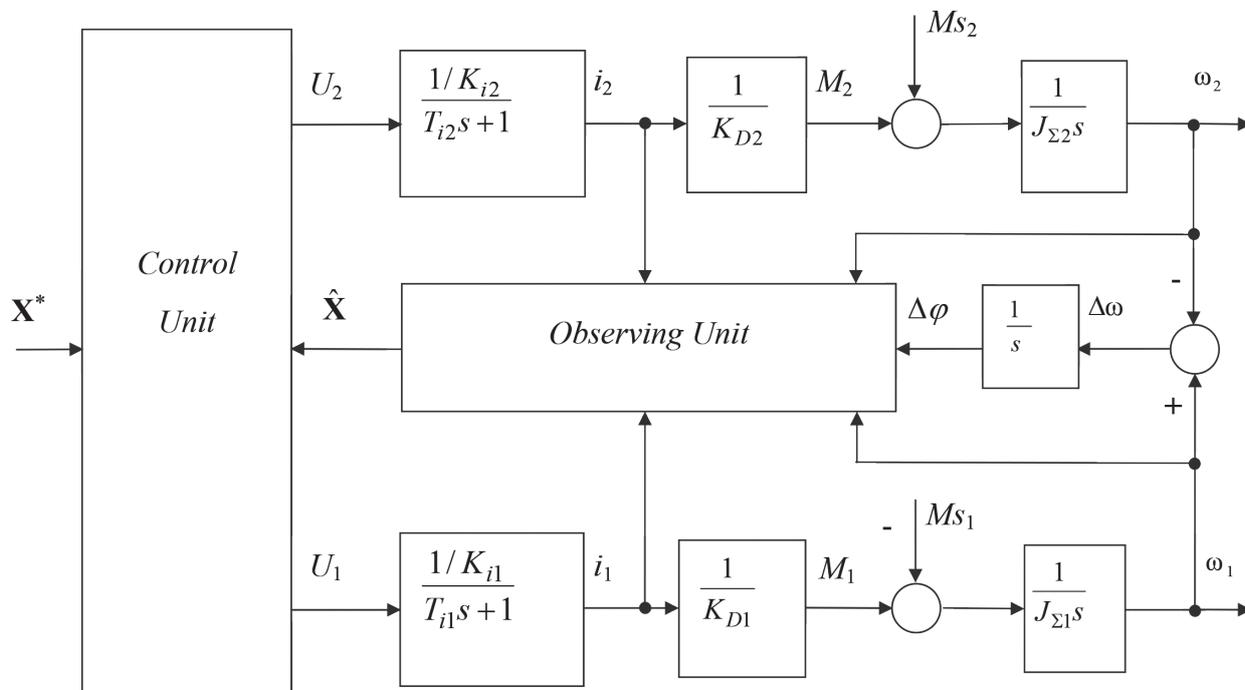


Рисунок 1. Функционально-структурная схема ЭМСУ

На рисунке 1 приняты обозначения: индекс 1 соответствует параметрам и переменным ведущей подсистемы — привод гауч-вала; индекс 2 — ведомой следящей подсистемы ЭМСУ — привод сетководящего вала верхней сетки; Control Unit — устройство управления, формирующее взаимосвязанное управление ведущими приводами сеток; Observing Unit — наблюдающее устройство, формирующее сигналы измеряемых и наблюдаемых переменных ЭМСУ;  $K_{i1}$ ,  $K_{i2}$  — коэффициенты передач обратных связей по токам якорей;  $T_{i1}$ ,  $T_{i2}$  — постоянные времени замкнутых контуров регулирования токов якорей;  $K_{D1}$ ,  $K_{D2}$  — коэффициенты передач электродвигателей;  $J_{Σ1}$ ,  $J_{Σ2}$  — приведенные к валам двигателей моменты инерции ЭМСУ;  $X^*$  — вектор задающих воздействий ЭМСУ;  $\hat{X}$  — вектор сигналов измеряемых или наблюдаемых переменных;  $U_1$ ,  $U_2$  — дискретные управляющие воздействия;  $i_1$ ,  $i_2$  — токи якорей двигателей;  $M_1$ ,  $M_2$  — моменты двигателей;  $M_{S1}$ ,  $M_{S2}$  —

моменты нагрузки на валах двигателей;  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  — скорости вращения валов двигателей;  $\Delta\omega$ ,  $\Delta\phi$  — соответственно рассогласование скоростей двигателей и его интеграл;  $s$  — оператор Лапласа.

В результате несложных расчетов [3, 6] получены параметры структурной схемы:

$$K_{i1}=K_{i2}=0,0152 \text{ Ом};$$

$$T_{i1}=T_{i2}=0,02 \text{ с};$$

$$K_{D1}=K_{D2}=0,434 \text{ (В}\cdot\text{с)}^{-1};$$

$$J_{Σ1}=33,7 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$J_{Σ2}=23 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

При математическом описании ЭМСУ, как это следует из рисунка 1, принят ряд допущений: механическая часть электропривода представлена линеаризованными одномассовыми подсистемами, замкнутые контуры регулирования токов якорей двигателей аппроксимированы апериодическими звеньями первого порядка, датчики переменных состояния и устройства передачи и преобразования информации представлены безынер-

ционными звеньями. Поскольку, как правило, отсутствуют датчики нагрузок на валах приводов, то для их оценки можно применить наблюдающие устройства [7, 8], входящие в блок Observing Unit.

Дискретно-непрерывная математическая модель ЭМСУ с учетом принятых допущений может быть записана в векторно-матричной форме [6–11]:

$$X(t)=AX(t)+BU(kT)+CF(t), \quad (1)$$

где  $X(t)$  — вектор переменных модели;

$X(t)=[\omega_1, i_1, \Delta\varphi, \omega_2, i_2,]T$ ,  $t$  — символ транспонирования;

$U(kT)$  — вектор дискретного управления ЭМСУ;

$$U(kT)=[U_1(kT), U_2(kT)]T;$$

$T$  — период управления;

$F(t)$  — вектор моментов нагрузки на валах электродвигателей;

$$F(t)=[M_{s1}, M_{s2}]T;$$

$A, B, C$  — соответственно матрицы состояния, управления и возмущения.

Для взаимосвязанного регулирования скоростей сеток применены дискретные финитные регуляторы состояния, обеспечивающие повышенные показатели качества регулирования в отношении быстродействия и точности в сравнении с типовыми полиномиальными, в частности ПИ- и ПИД-регуляторами скорости [6, 10]. Кроме того, в подсистему стабилизации скорости верхней сетки включена дополнительная обратная связь по интегралу от разницы скоростей электроприводов сеток, что позволяет организовать режим слежения скорости верхней сетки за изменениями скорости нижней сетки, тем самым сформировать стабилизацию относительного смещения верхнего и нижнего слоев бумаги теоретически на нулевом уровне, т. е. обеспечить  $\Delta\varphi \approx 0$ .

В соответствии с методикой синтеза финитных регуляторов произвольного порядка [10] для приведенных выше параметров ЭМСУ и периода  $T$  дискретного управления, равного 0,02 с, получены следующие выражения для дискретных управлений:

$$U_1(kT) = 17,61(\omega_1^*(kT) - \omega_1(kT)) - 0,0189 i_1(kT) + 0,01483 \hat{M}_{s1}(kT), \quad (2)$$

$$U_2(kT) = 601,4(-\Delta\varphi^*(kT) + \Delta\varphi(kT)) + 23,07(\omega_2^*(kT) - \omega_2(kT)) - 0,02508 i_2(kT) + 0,01748 \hat{M}_{s2}(kT). \quad (3)$$

Как следует из (2), (3) в качестве вектора задающих воздействий рассматривается вектор:

$$X^*(kT) = [\Delta\varphi^*(kT), \omega_1^*(kT), \omega_2^*(kT)]^T, \quad (4)$$

где  $\omega_1^*(kT), \omega_2^*(kT)$  — заданные скорости электроприводов соответственно нижней и верхней сеток, принимаемые одинаковыми для обеспечения одинаковых линейных скоростей сеток (при равных радиусах приведения угловых скоростей приводов к линейным скоростям сеток);

$\Delta\varphi^*(kT)$  — параметр, пропорциональный заданному относительному удлинению бумажного полотна, который необходимо принять нулевым при требовании обеспечения равных скоростей формирования его нижнего и верхнего слоев. Для плавности перевода ЭМСУ БДМ с одной скорости на другую и ограничения токов двигателей эти задающие воздействия формируют с применением задатчиков интенсивности второго рода (S-рампы) [3, 6].

Результаты имитационного моделирования реакций приводов на одинаковое приращение задания скоростей «в малом», равное 0,1 рад/с, приведены на рисунке 2.

Реакция приводов на ступенчатые приращения нагрузок на валах ведущего и ведомого приводов, имитируемые соответственно в моменты времени  $t=0$  с и  $t=0,15$  с, приведена на рисунке 3.

Приращение нагрузок на этих валах приняты равными соответственно 500 и 200 Нм, что соответствует реализации мощности порядка 40–100 % от номинального значения. На рисунке 3 переменным ведущего привода соответствуют сноска на позицию 1, переменным ведомого привода — на позицию 2.

Имитация случайного характера изменения нагрузок приводов со стороны различных обезвоживающих бумажное полотно устройств реализована наложением аддитивной помехи в виде «белого шума» с параметрами, соответствующими фактическим

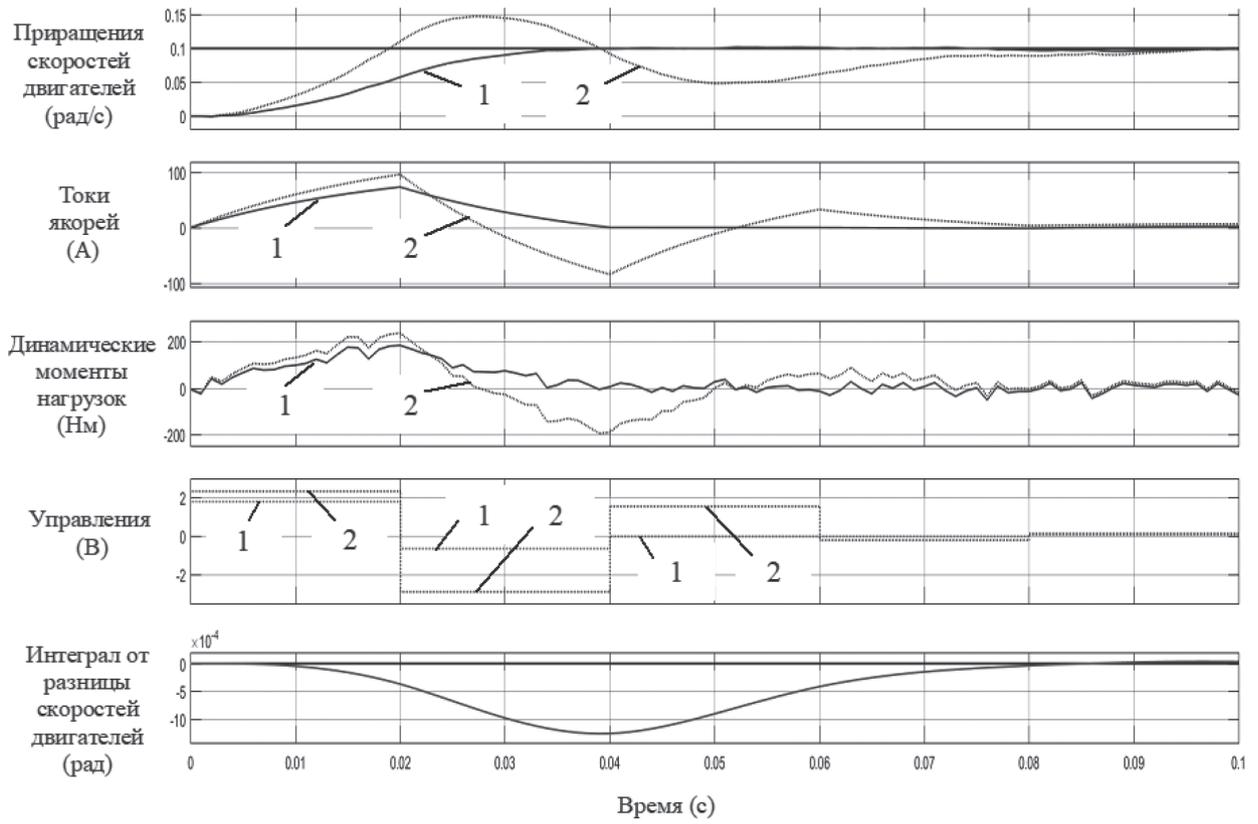


Рисунок 2. Реакция ЭМСУ на изменение задания скоростей

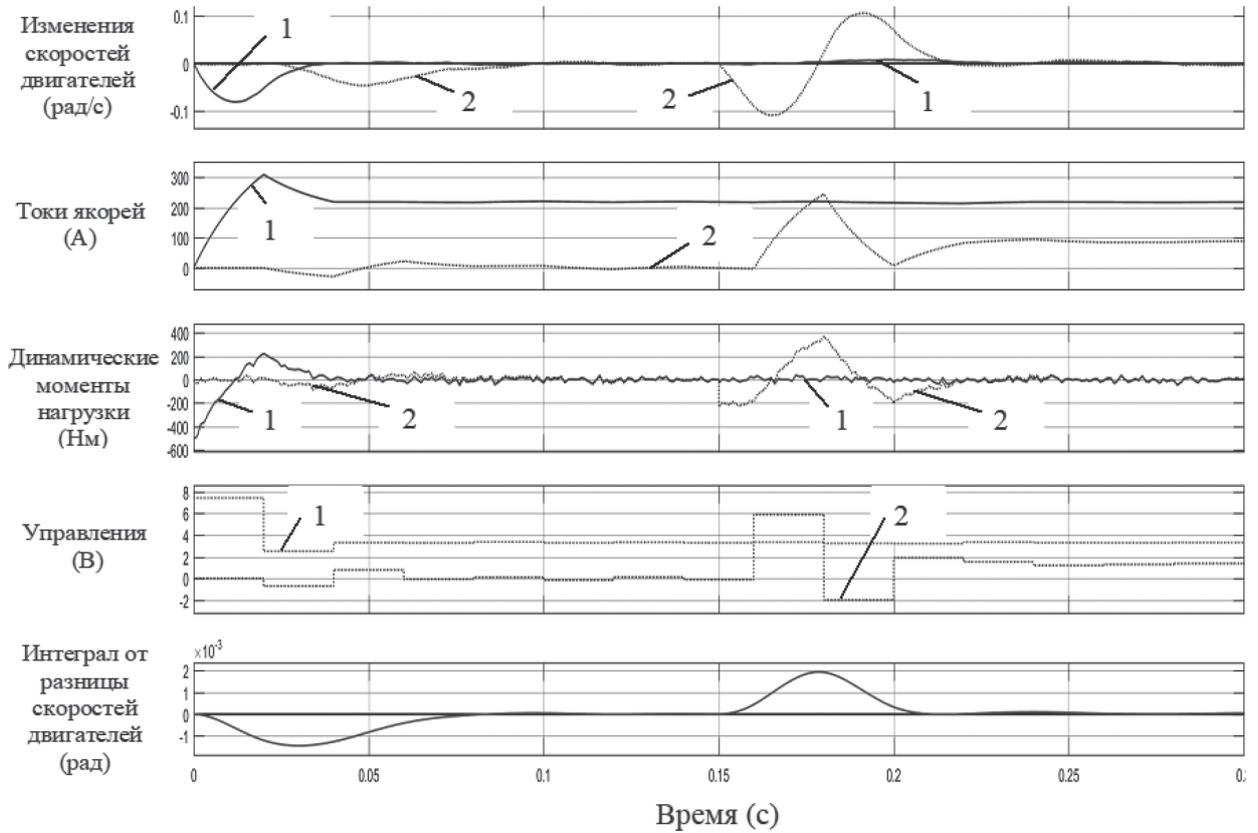


Рисунок 3. Реакция ЭМСУ на изменение нагрузок приводов

данным исследования приводов сеточной части БДМ [2, 3].

Как видим, переходные процессы в ЭМСУ завершаются за 2–5 периодов дискретного управления в зависимости от наличия и места приложения аддитивных задающих и возмущающих воздействий, что свидетельствует об эффективности реализации финитного управления электроприводами как в автономном режиме (для каждой из сеток в отдельности), так и в следящем режиме при обработке ведомой подсистемой интеграла от разности скоростей сеток.

### Выводы

В работе рассмотрен подход к решению задачи снижения взаимного влияния электроприводов на стабилизацию скоростей сеток и поддержания их заданного соотношения в условиях заведомо непредсказуемых изменений нагрузок на их валах, что должно привести к повышению качества производимой на двухсеточной БДМ бумаги (картона).

Предложено при синтезе ЭМСУ сеточной части один из приводов рассматривать в

качестве автономной системы стабилизации скорости, а другой синтезировать по принципу следящего управления с контролем интеграла от разницы скоростей сеток.

Для повышения быстродействия и точности стабилизации скоростей сеток предложено применить финитное управление электроприводами, обеспечивающее теоретически конечное время установления переходных процессов, определяемое, по сути, только порядком модели ЭМСУ и величиной периода управления. Для модели ЭМСУ пятого порядка и принятом периоде управления 0,02 с время финитного управления не превышает 0,1 с, при этом ЭМСУ демонстрирует свойства астатического управления, сводящего отклонения скоростей от заданных значений в установившихся режимах к нулю. Заметим, что установившееся значение интеграла от разницы скоростей сеток также стремится к нулю, что говорит о практически нулевом смещении слоев бумаги, формируемых обеими сетками.

### Список литературы

1. Иванов С.Н. Технология бумаги. 2-е изд. перераб. / С.Н. Шестаков. М.: Лесная промышленность, 2007. 696 с.
2. Бумагоделательные и картоноделательные машины / под ред. В.С. Курова, Н.Н. Кокушина. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 585 с.
3. Шестаков В.М. Системы электропривода бумагоделательного производства / В.М. Шестаков. М.: Лесная промышленность, 1989. 240 с.
4. Диденко Е.Е., Мещеряков В.Н. Управление электроприводом петледержателя при входе полосы в межклетевой промежуток чистой группы стана горячей прокатки // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12. № 3. С. 26–31.
5. Харченко А.П., Слепокуров Ю.С., Каревская Ю.Н. Исследование следящей системы в Matlab при воздействии возмущения в системе управления // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 4. С. 41–45.
6. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. Л.: Энергоатомиздат. 1984. 216 с.
7. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления: пер. с англ. М.: Машиностроение, 1986. 448 с.
8. Гайдук А.Р., Беляев В.Е., Пьявченко Т.А. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB: учебник для вузов. М.: Изд-во «Лань», 2011. 464 с.
9. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп: пер. с англ. Б. И. Копылова. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 832 с.
10. Казанцев В.П., Даденков Д.А. Синтез дискретно-непрерывных систем управления электроприводами с упругими связями // Электротехника. № 11. 2012. С. 24а–28.
11. Александров В.М. Оптимальное по быстродействию позиционно-программное управление линейными динамическими системами // Сибирские электронные математические известия. 2009. Т. 6. С. 385–439.

## References

1. Ivanov S.N., Shestakov C.N. *Tekhnologiya bumagi* [Paper Technology]. 2nd ed. Moscow, Lesnaya promyshlennost', 2007. 696 p. [in Russian].
2. *Bumagodelatel'nye i kartonodelatel'nye mashiny* [Paper and Cardboard Machines] Ed. by V.S. Kurov, N.N. Kokushin. Saint-Petersburg, Politekh. un-t Publ., 2008. 585 p. [in Russian].
3. Shestakov V.M. *Sistemy elektroprivoda bumagodelatel'nogo proizvodstva* [Papermaking Electric Drive Systems]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 240 p. [in Russian].
4. Didenko E.E., Meshcheryakov V.N. Upravlenie elektroprivodom petledezhatelya pri vkhode polosy v mezhkletevoi promezhutok chistovoi gruppy stana goryachei prokatki [Control of the Electric Drive of Looper at the Strip Entrance to the Gap between Two Stand of Finishing Group of the Hot Rolling Mill]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekxy i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2016, Vol. 12, No. 3, pp. 26-31. [in Russian].
5. Kharchenko A.P., Slepokurov Yu.S., Karevskaya Yu.N. Issledovanie sledyashchei sistemy v Matlab pri vozdeistvii vozmushcheniya v sisteme upravleniya [Study of Tracking Systems in Matlab when Exposed to Disturbances in the Control Circuit]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Voronezh State Technical university*, 2018, Vol. 14, No. 4, pp. 41–45. [in Russian].
6. Bortsov Yu.A., Polyakhov N.D., Putov V.V. Elektromekhanicheskie sistemy s adaptivnym i modal'nym upravleniem [Electromechanical Systems with Adaptive and Modal Control]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1984. 216 p. [in Russian].
7. Kuo B. *Teoriya i proektirovanie tsifrovyykh sistem upravleniya: per. s angl.* [Theory and Design of Digital Control Systems: Transl. from Engl.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 448 p. [in Russian].
8. Gaiduk A.R., Belyaev V.E, P'yavchenko T.A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya v primerakh i zadachakh s resheniyami v MATLAB: ucheb. dlya vuzov* [Theory of Automatic Control in the Examples and Problems Solutions in MATLAB: Textbook for High Schools]. Moscow, Lan' Publ., 2011. 464 p. [in Russian].
9. Dorf R., Bishop R. *Sovremennye sistemy upravleniya: per. s angl.* [Modern Control Systems: Transl. from Engl.]. Trans. by B.I. Kopylov. Moscow, Laboratoriya bazovykh znaniy Publ., 2002. 832 p. [in Russian].
10. Kazantsev V.P., Dadenkov D.A. Sintez diskretno-nepreryvnykh sistem upravleniya elektroprivodami s uprugimi svyazyami [On the Synthesis of Discrete Continuous Control Systems with Elastic Dissipative Links for Electric Drives]. *Elektrotehnika — Russian Electric Engineering*, 2012, No. 11, pp. 24–28. [in Russian].
11. Aleksandrov V.M. Optimal'noe po bystrodeistviyu pozitsionno-programmnoe upravlenie lineinymi dinamicheskimi sistemami [Sequential Synthesis of Time Optimal Control by a Linear System with Disturbance]. *Sibirskie elektronnye matematicheskie izvestiya — Siberian Electronic Mathematical Reports*, 2009, Vol. 6, pp. 385–439. [in Russian].



**Дорофеев Р. С.**  
**Dorofeev R. S.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Вычислительная техника»,  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический  
университет»,  
г. Иркутск, Российская Федерация



**Дорофеев А. С.**  
**Dorofeev A. S.**

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой  
«Вычислительная техника»,  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический  
университет»,  
г. Иркутск, Российская Федерация

УДК 004.89

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-99-106

## **ПРИМЕНЕНИЕ АВТОРСКОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ «КВАЛИМЕТРИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТИЗА» ДЛЯ ОЦЕНКИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

В статье рассматривается вопрос применения разработанной авторами системы поддержки принятия решений «Квалиметрическая экспертиза» для оценки биологических объектов на соответствие стандарту. В качестве объекта исследования выступает экстерьер собаки на выставке. Актуальность работы связана с постоянным повышением качества оценки собак в ринге и их породности.

Выставка собак – публичное мероприятие по оценке соответствия собак стандартам породы для определения выразительного представителя породы с целью их разведения. Оценку проводят эксперты, имеющие соответствующую лицензию. Исходя из описания процесса проведения экспертизы в ринге и получения итоговой словесной оценки, авторами статьи предлагается применение квалиметрической экспертизы с целью получения итоговой численной интегральной оценки по оцениваемым экспертом признакам.

Как известно, квалиметрия – это наука о количественной оценке качества объектов исследования, описываемого набором признаков, которые, в свою очередь, образуют иерархию, представляющую собой расчетную модель объекта, подлежащего оцениванию. Квалиметрическая экспертиза является одним из инструментов системы интегрированного менеджмента, и, в отличие от квалиметрии, к ее проведению необходимо привлечь профессионально подготовленных экспертов не только в области оценки качества, но и по тем специальностям (предметной области), которые связаны с разработкой и применением исследуемого объекта.

Понятие онтологии активно применяется в информатике и искусственном интеллекте. В инженерии знаний под онтологией понимается точная спецификация некоторой предметной области, которая включает в себя словарь терминов этой области и множество логических связей между ними. Квалиметрическая экспертиза производится на основе иерархии признаков, при этом разработка онтологии связана с построением системы признаков. В этой связи в статье предлагается применение онтологической системы в качестве исходных данных для квалиметрической экспертизы. Экспертная группа, включающая специалистов предметной области, составляет расчетную модель оценки качества объекта – иерархическое описание его свойств, имеющих определенные оценки их важности для оценки качества объекта. Результатом экспертизы является рассчитанный интегральный показатель качества.

В статье на примере оценки двух собак приводится расчет всех показателей с помощью разработанной системы, выполнен анализ результатов расчета.

Описанная методика может быть применена при проведении различного рода состязаний и испытаний по специализированным дисциплинам. Использование системы «Квалиметрическая экспертиза» позволит упростить работу эксперта, сократит время проведения экспертизы, а также сделает более объективной оценку объектов, подлежащих оценке качества.

**Ключевые слова:** квалиметрия, квалиметрическая экспертиза, онтология, система поддержки принятия решений, OntoStudio, язык OBL, ONT-Converter, признаки, интегральный показатель, количественная оценка.

## APPLICATION OF THE AUTHOR'S DECISION SUPPORT SYSTEM «QUALIMETRIC EXPERTISE» FOR BIOLOGICAL OBJECTS ASSESSMENT

The paper discusses the use of the «Qualimetric Expertise» decision support system developed by the authors for the assessment of biological objects for compliance with the standard. As the object of research is the exterior of the dog at the show. The relevance of the paper is associated with the constant improvement of the quality of assessment of dogs in the ring and their breed.

Dog show – public event on the assessment of compliance of dogs to the standards of a certain breed, with the aim of identifying best of breed and in further breeding. The assessment is carried out by experts who have the appropriate license. Based on the description of the process of expertise in the ring and obtaining the final verbal assessment, the authors propose the use of qualimetric expertise in order to obtain the final numerical integral assessment of the evaluated expert characteristics.

As you know, qualimetry is the science of quantifying the quality of research objects, which is described by a set of features. They, in turn, form a hierarchy, which is a calculated model of the object to be evaluated. Qualimetric expertise is one of the tools of the integrated management system and, unlike qualimetry, it is necessary to involve professionally trained experts not only in the field of quality assessment, but also in those specialties (subject area) that are associated with the development and application of the object under study.

The concept of ontology is actively used in computer science and artificial intelligence. In knowledge engineering, ontology refers to the exact specification of a subject area that includes a dictionary of terms in that subject area and many logical relationships between them. Qualimetric expertise is based on the hierarchy of features. The development of ontology is connected with the construction of a system of signs. In this regard, the paper proposes the use of the ontological system as the initial data for qualimetric expertise. The expert team, which includes specialists of the subject area, makes a calculation model of the quality assessment of the object hierarchical description of its properties, having certain evaluations of their importance for the assessment of the quality of the object. The result of the expertise is a calculated integral quality indicator.

In this paper on an example of an assessment of two dogs calculation of all indicators by means of the developed system is resulted, the analysis of results of calculation is resulted.

The described technique can be applied at carrying out various kinds of competitions and tests on specialized disciplines. The use of the decision support system «Qualimetric expertise » will simplify the work of the expert, reduce the time of expertise, as well as make more objective assessment of objects subject to quality assessment.

**Key words:** qualimetry, qualimetric expertise, ontology, decision support system, OntoStudio, OBL language, ONT-Converter, characteristics, integral indicator, quantitative assessment.

### *Введение*

Экспертиза собак на выставке сводится к последовательному исключению наименее соответствующих стандарту породы и/или выделению (по мнению эксперта) наиболее

ярких представителей породы с присвоением лучшей собаке звания «Лучший представитель породы» [1]. Собак оценивают раздельно по полу и возрасту согласно выставочным классам. Если это всепородная

выставка, процесс исключения продолжается до тех пор, пока не остается одна собака, которой присваивается титул «Лучшая собака выставки». Основным методом экспертизы является глазомерная оценка, которая включает в себя визуальный осмотр каждой собаки в стойке и в движении. Тщательный осмотр позволяет провести объективную оценку строения собаки, выявить отклонения от нормы, особенности развития, типичность, гармоничность и пропорциональность строения собаки и на этой основе произвести оценку экстерьера [2, 3]. Экспертиза должна быть основана на сравнении каждой собаки с мысленным представлением судьи об идеальном фенотипе, указанном в стандарте каждой породы.

В каждом классе эксперт проводит индивидуальный осмотр собак на соответствие стандарту породы, оценку движения, после чего выставляет каждой собаке оценку: «отлично», «очень хорошо», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно» или «дисквалификация».

Далее эксперт сравнивает всех собак между собой в стойках и в движении и расставляет их по местам, исходя из наибольшего соответствия стандарту породы. Собака, занявшая первая место, получает титул «Победитель класса», а также сертификат (согласно рангу выставки). Титул может получить только собака, имеющая оценку «отлично» [3, 4].

*Методика и пример квалиметрической экспертизы с помощью разработанной системы поддержки принятия решений*

Исходя из описания процесса проведения экспертизы в ринге и получения итоговой словесной оценки, авторами статьи предлагается применение квалиметрической экспертизы с целью получения итоговой численной интегральной оценки по оцениваемым экспертом признакам.

Для того чтобы провести квалиметрическую экспертизу специалистам, составляющим экспертную группу, необходимо составить расчетную модель оценки качества объекта, представляющую собой описание свойств объекта, расположенных на разных уровнях иерархии, имеющих определенные

оценки их важности для оценки качества объекта. Результатом экспертизы является рассчитанный интегральный показатель качества (в диапазоне от 0 до 1) [5].

В центре большинства онтологий находятся классы, которые описывают понятия предметной области. Слоты (параметры) описывают свойства классов. В основе онтологического анализа лежит описание системы в терминах сущностей. Онтологический анализ начинается с составления словаря терминов, используемого при обсуждении и исследовании характеристик объектов, составляющих рассматриваемую систему, а также создания системы точных определений этих терминов [4–11].

Так как квалиметрическая экспертиза производится на основе иерархии признаков, а разработка онтологии — построение системы признаков, то предлагается применение онтологической системы в качестве исходных данных для квалиметрической экспертизы [5]. Для примера оцениваемых параметров для квалиметрической экспертизы экспонентов в ринге примем 27 критериев оценки: рост, половой диморфизм, шерсть, окрас, костяк, размер головы, туловище, высоконоготь, углы конечности, темперамент, показ, зубная система, глаза, уши, мочка носа, зубы, шея, холка, спина, поясница, круп, хвост, грудь, живот, конечности, движения, поведение.

В качестве оцениваемых объектов примем двух абстрактных собак одной породы и одного пола с номерами по каталогу выставки 101 и 102, а проводить экспертизу будет, например, Иванов И.И.

Построенная в редакторе OntoStudio онтология признаков представлена на рисунке 1.

Разработанная в OntoStudio онтология представляется на языке разметки Object logic language (OBL) и содержит описание классов онтологии, экземпляров, атрибуты и отношения. Описание на языке OBL дает возможность корректировать онтологию (имена, добавление и удаление информации), придерживаясь общей ее структуры.

Перечисленным параметрам эксперт во время проведения осмотра собаки будет давать оценку от 1 до 5, где 1 соответствует

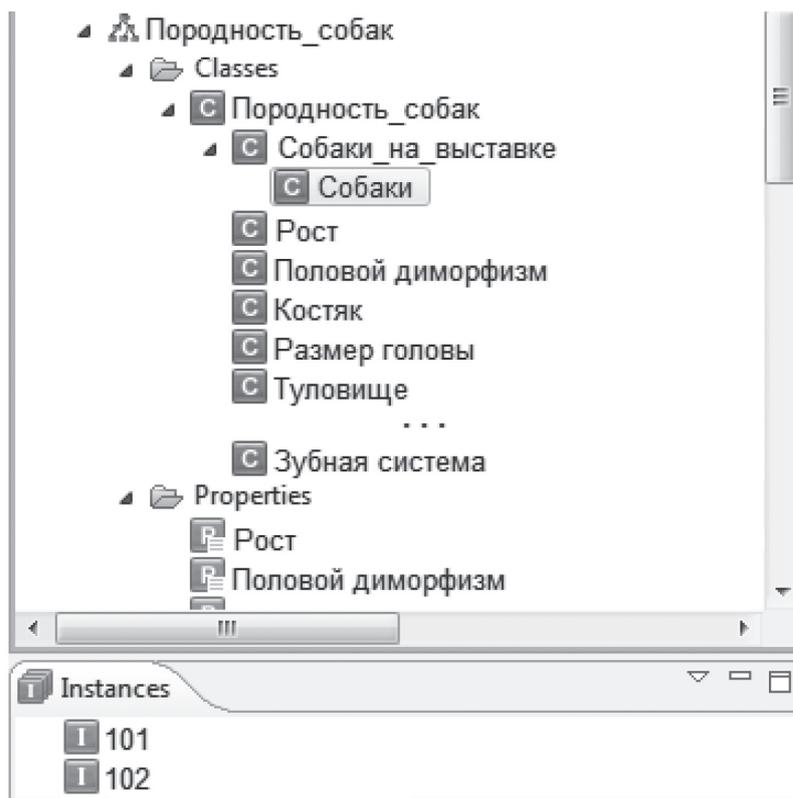


Рисунок 1. Онтология признаков для оценки породности собак в ринге выставки

«плохо», 5 — «отлично». Для расчета итоговой оценки в автоматизированном режиме авторами была разработана система поддержки принятия решений (СППР) «Квалиметрическая экспертиза» (web-приложение, html+php+mysql). Исходными данными для экспертизы является онтологическая система признаков.

Для преобразования онтологии на языке OBL разработано авторское приложение ONT-Converter, выполняющее это преобразование. Далее OBL-онтологию необходимо будет импортировать в СППР «Квалиметрическая экспертиза». Результат импорта характеристик для оценки экспонентов показан на рисунке 2.

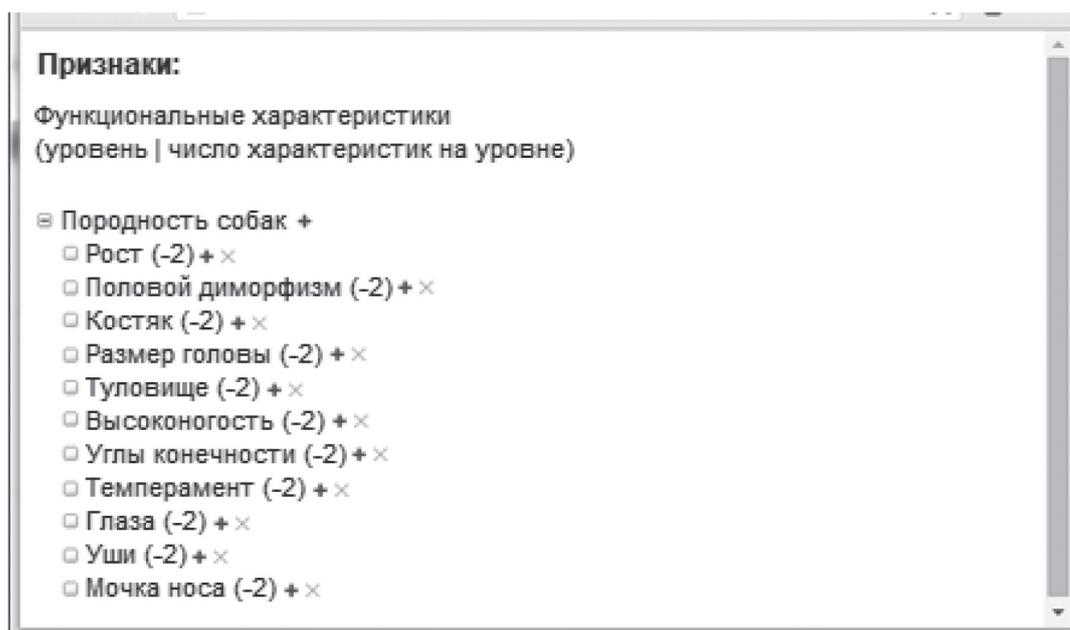


Рисунок 2. Онтология признаков в СППР «Квалиметрическая экспертиза»

Полученные от эксперта оценки по каждой осмотренной собаке сохраняются в качестве усредненных значений показателей признаков и пересчитываются к квалиметрической шкале по следующим формулам, используемым при оценке качества:

$$k_s = \frac{val_s - ng}{vg}, \quad (1)$$

$$ks_s = \frac{k_s - ng}{vg - ng}, \quad (2)$$

где  $val$  — значение показателя, поставленное экспертом;

$vg$  — верхняя граница (в нашем случае — 5);

$ng$  — нижняя граница, принимаемая за 1.

В качестве итога проведения квалиметрической экспертизы будет выяснено, какой из двух экспонентов является более породным.

В результате расчета интегральных характеристик на уровнях иерархии по формулам (3)–(9) и итоговых интегральных оценок по формулам (10)–(13) получены следующие результаты (рисунок 3):

$$znkv_j = \sum_{i=1}^m val_i, \quad (3)$$

где  $znkv$  — сумма значений показателей по всем участникам в одном классе выставки;

$m$  — количество участников в одном классе;

$val$  — значение показателя на уровне;

$$sum = \sum_{j=1}^k znkv_j, \quad (4)$$

где  $sum$  — сумма по всем показателям;

$k$  — количество показателей.

$$znkv'_j = \frac{znkv_j}{sum}, \quad (5)$$

$$QS = \sum_{j=1}^k (znkv'_j * ves_j), \quad (6)$$

$$DQS = 1 - QS, \quad (7)$$

где  $QS$  — количественное значение соответствия качества объекта предъявляемым требованиям, рассчитанное как сумма на одном уровне;

$DQS$  — количественное значение отклонения объекта от требований;

$ves$  — вес признака при оценке, в нашем случае все веса имеют одинаковое значение равно  $1/27=0,037$ .

$$QP = \prod_{j=1}^k znkv'_j^{ves_j}, \quad (8)$$

$$DQP = 1 - QP, \quad (9)$$

где  $QP$  и  $DQP$  — количественное значение, рассчитанное как произведение.

$$SQS = \frac{\sum_{g=1}^f QS}{f-1}, \quad (10)$$

$$SDQS = \frac{\sum_{g=1}^f DQS}{f-1}, \quad (11)$$

$$SQP = \frac{\sum_{g=1}^f QP}{f-1}, \quad (12)$$

$$SDQP = \frac{\sum_{g=1}^f DQP}{f-1}, \quad (13)$$

где  $f$  — максимальное число уровней,  $f \neq 1$ ;

$SQS (Q)$  — суммарное количественное значение соответствия качества объекта предъявляемым требованиям, рассчитанное как сумма;

$SDQS (DeltaQ)$  — количественное значение отклонения объекта от требований, рассчитанное как сумма;

$SQP (Q)$  — суммарное количественное значение соответствия качества объекта предъявляемым требованиям, рассчитанное как произведение;

$SDQP (DeltaQ)$  — количественное значение отклонения объекта от требований, рассчитанное как произведение [4–7]. Здесь  $Q$  — количественное значение соответствия качества объекта предъявляемым требованиям;  $DeltaQ$  — количественное значение отклонения объекта от требуемых значений. Расчет интегральных характеристик возможен как по сумме, так и по произведению.

#### Результаты экспертизы

После получения результатов можно выполнить их анализ с целью выявления отклонений значений признаков от эталонных, для чего в приложении реализована функция «Анализ результатов». Результат работы функции представлен на рисунке 4.

## Подсчет суммарных интегральных характеристик:

Выберите группу:  
Породность собак

Выберите подгруппу:  
Собаки на выставке

Название объекта  
101  
102

функциональные характеристики

Сумма  
Q = 0,9877  
DeltaQ = 0,0123

Произведение  
Q = 0,9769  
DeltaQ = 0,0231

## Подсчет суммарных интегральных характеристик:

Выберите группу:  
Породность собак

Выберите подгруппу:  
Собаки на выставке

Название объекта  
101  
102

функциональные характеристики

Сумма  
Q = 0,8671  
DeltaQ = 0,1329

Произведение  
Q = 0,8439  
DeltaQ = 0,1561

## Анализ результатов

## Анализ результатов

Рисунок 3. Результат подсчета суммарных характеристик для обеих собак

Анализ полученных результатов				
Наименование	Уровень	101	102	Примечание
Рост	2	0,9	0,85	Представитель породы 101 является более породистым
Половой диморфизм	2	0,98	0,89	
Костяк	2	0,93	0,8	
Размер головы	2	0,91	0,76	
Туловище	2	0,9	0,88	
Высоконогость	2	0,89	0,89	
Углы конечности	2	0,97	0,95	
Темперамент	2	0,92	0,92	
Глаза	2	0,91	0,87	
Уши	2	0,86	0,85	
Мочка носа	2	0,92	0,87	
Зубы	2	0,88	0,8	
Шея	2	0,89	0,77	
Холка	2	0,95	0,9	
Спина	2	0,93	0,9	
Поясница	2	0,93	0,89	
Круп	2	0,95	0,88	
Хвост	2	0,96	0,96	
Грудь	2	0,89	0,88	
Живот	2	0,88	0,87	
Конечности	2	0,85	0,85	
Движения	2	0,9	0,9	
Шерсть	2	0,97	0,96	
Окрас	2	0,97	0,97	
Поведение	2	0,86	0,86	
Показ	2	0,75	0,77	
Зубная система.	2	0,86	0,86	

Рисунок 4. Результат анализа полученных данных

Как видно из полученных результатов, собака под номером 101 является более соответствующей стандарту своей породы (показатели ближе к единице) и, соответственно, более породистая. К аналогичному решению приходит СППР, которая, сравнивая результаты, выдает решение из базы знаний касательно оценки экспонентов.

**Выводы**

Разработанная система поддержки принятия решений с использованием онтологий и квалиметрической экспертизы позволяет

количественно оценить качество экспонентов в ринге выставки и выбрать среди них более породистого представителя своей породы путем визуального анализа сравнительных результатов. Данная методика может быть применена при проведении различного рода состязаний и испытаний по специализированным дисциплинам. Использование разработанной системы позволит упростить работу эксперта, а также позволит сделать более объективной оценку объекта и сократить время проведения экспертизы.

## Список литературы

1. Выставка собак // Свободная энциклопедия «Википедия». URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%8B%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%B2%D0%BA%D0%B0\\_%D1%81%D0%BE%D0%B1%D0%B0%D0%BA](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%8B%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%B2%D0%BA%D0%B0_%D1%81%D0%BE%D0%B1%D0%B0%D0%BA) (дата обращения: 05.11.2019).
2. Интернет-ресурс «Хочу собаку». Что включает в себя экспертиза собак и расшифровка оценок, полученных на выставке. URL: [http://www.hochusobaku.ru/dowshow\\_info/ekspertiza](http://www.hochusobaku.ru/dowshow_info/ekspertiza) (дата обращения: 10.11.2019).
3. Официальный сайт Интернет издания «Hot Dog». Американская система выставок. URL: [http://www.chow-chow.cc/proveden/america\\_m.htm](http://www.chow-chow.cc/proveden/america_m.htm) (дата обращения: 12.11.2019).
4. Dogs SA. Dog Show: официальный сайт. URL: [http://www.dogssa.com.au/?page\\_id=884](http://www.dogssa.com.au/?page_id=884) (дата обращения: 12.11.2019).
5. Дорофеев Р.С., Дорофеев А.С. Оценка качества работы преподавателей с применением квалиметрической экспертизы и онтологического подхода // Инновационные технологии в науке и образования: матер. IV междунар. науч.-практ. конф., г. Улан-Удэ, 28–30 августа 2015 г. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского государственного университета, 2015. С. 210–215.
6. Азгальдов Г.Г., Костин А.В., Садовов В.В. Квалиметрия: первоначальные сведения. Справочное пособие с примером для АНО «Агентство стратегических инициатив по продвижению новых проектов»: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 2010. 143 с.
7. Азгальдов Г.Г., Маругин В.М. Квалиметрическая экспертиза. Руководство по организации экспертизы и выполнению квалиметрических расчетов. Кн. 2: Расчетные модели качества. СПб.-М.: Русский Регистр, 2002. 517 с.
8. Дорофеев Р.С. Методология и программная реализация совместного использования онтологии и квалиметрической экспертизы при оценке качества станков // Вестник ИРГТУ. 2013. № 3 (74). С. 16–23.
9. Дорофеев Р.С. Разработка web-приложения для оценки качества объектов // Инновационные подходы к применению информационных технологий профессиональной деятельности: сб. тр. Второй Междунар. науч.-практ. интернет-конф. Белгородского филиала НАЧАУ ВПО СГА. Белгород: ГиК, 2010. С. 321–323.
10. Dorofeev R.S., Dorofeev A.S., Kostovskaya O.A. Evaluation of the Quality of Voice over IP Telephony Using the Decision Support System «Qualimetric Expertise» // Proceedings MIPRO, 2015, 38 International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, Opatija, Croatia. 2015. P. 1408–1411.
11. Дорофеев Р.С. Разработка типовой формы для ввода значений свойств экземпляров онтологии // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 3 (39). С. 178–182.
12. Дорофеев Р.С., Дорофеев А.С., Сосинская С.С. Разработка системы для расчета рейтинга преподавателей на основе квалиметрического подхода и онтологии // Онтология проектирования. 2019. Т. 9, № 2 (32). С. 214–224.

## References

1. *Vystavka sobak* [Dog Show]. Svobodnaya entsiklopediya «Vikipediya» [Free Wikipedia Encyclopedia]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%8B%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%B2%D0%BA%D0%B0\\_%D1%81%D0%BE%D0%B1%D0%B0%D0%BA](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%8B%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%B2%D0%BA%D0%B0_%D1%81%D0%BE%D0%B1%D0%B0%D0%BA) (assessed: 05.11.2019).
2. *Internet-resurs «Khochu sobaku»*. *Chto vkluychaet v sebya ekspertiza sobak i rasshifrovka otsenok poluchennykh na vystavke* [Internet Resource «I Want a Dog». What Includes an Examination of Dogs and a Transcript of the Marks Received at the Exhibition.]. URL: [http://www.hochusobaku.ru/dowshow\\_info/ekspertiza](http://www.hochusobaku.ru/dowshow_info/ekspertiza) (assessed: 10.11.2019).
3. *Ofitsial'nyi sait Internet izdaniya «Hot Dog»*. *Amerikanskaya sistema vystavok* [The Official Website of the Internet Publication «Hot Dog». American Exhibition System]. URL: [http://www.chow-chow.cc/proveden/america\\_m.htm](http://www.chow-chow.cc/proveden/america_m.htm) (assessed: 12.11.2019).
4. *Dogs SA. Dog Show: ofitsial'nyi sait* [Dogs SA. Dog Show: Official Site]. URL: [http://www.dogssa.com.au/?page\\_id=884](http://www.dogssa.com.au/?page_id=884) (assessed: 12.11.2019).
5. Dorofeev R.S., Dorofeev A.S. *Otsenka kachestva raboty prepodavatelei s primeneniem kvalimetricheskoi ekspertizy i ontologicheskogo podkhoda* [Assessment of the Quality of Teachers' Work Using Qualimetric Examination and Ontological Approach]. *Materialy IV*

*mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovaniya», g. Ulan-Ude, 28-30 avgusta 2015 g.* [Materials of the IV International Scientific-Practical Conference «Innovative Technologies in Science and Education», Ulan-Ude, August 28-30, 2015]. Ulan-Ude, Izd-vo Buryatskogo gosuniversiteta, 2015, pp. 210-215. [in Russian].

6. Azgal'dov G.G., Kostin A.V., Sadovov V.V. *Kvalimetriya: pervonachal'nye svedeniya. Spravochnoe posobie s primerom dlya ANO «Agentstvo strategicheskikh initsiativ po prodvizheniyu novykh proektov»: ucheb. posobie* [Qualimetry: Initial Information. Reference Manual with an Example for the Autonomous Non-Commercial Organization «Agency for Strategic Initiatives to Promote New Projects»: Tutorial]. Moscow, Vyssh. shk., 2010. 143 p. [in Russian].

7. Azgal'dov G.G., Marugin V.M. *Kvalimetriceskaya ekspertiza. Rukovodstvo po organizatsii ekspertizy i vpolneniyu kvalimetriceskikh raschetov. Kn. 2: Raschetnye modeli kachestva* [Qualimetric Examination. Guidance for Organization of Examination and Implementation of Qualimetric Calculations. Book 2: Estimated Quality Models]. Saint-Petersburg-Moscow, Russkii Registr Publ., 2002. 517 p. [in Russian].

8. Dorofeev R.S. *Metodologiya i programnaya realizatsiya sovmestnogo ispol'zovaniya ontologii i kvalimetriceskoi ekspertizy pri otsenke kachestva stankov* [Methodology and Software Implementation of Shared Use of Ontologies and Qualimetric Examination When Evaluating Machine Tool Quality]. *Vestnik IrGTU — Proceedings of IrSTU*, 2013, No. 3 (74), pp. 16-23. [in Russian].

9. Dorofeev R.S. *Razrabotka web-prilozheniya dlya otsenki kachestva ob"ektov*

[Development of a Web Application for Assessing the Quality of Objects]. *Sbornik trudov Vtoroi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi Internet-konferentsii Belgorodskogo filiala NACHAU VPO SGA «Innovatsionnye podkhody k primeneniyu informatsionnykh tekhnologii professional'noi deyatel'nosti»* [Collection of Proceedings of the Second International Scientific and Practical Internet Conference of the Belgorod Branch of NACHAU VPO SGA «Innovative Approaches to the Application of Information Technologies of Professional Activity»]. Belgorod, GiK Publ., 2010, pp. 321-323. [in Russian].

10. Dorofeev R.S., Dorofeev A.S., Kostovskaya O.A. *Evaluation of the Quality of Voice over IP Telephony Using the Decision Support System «Qualimetric Expertise»*. *Proceedings MIPRO, 2015, 38 International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics*, Opatija, Croatia. 2015, pp. 1408-1411. [in Russian].

11. Dorofeev R.S. *Razrabotka tipovoi formy dlya vvoda znachenii svoistv ekzemplarov ontologii* [Development of a Standard Form for Entering Property Values of Ontology Instances]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie — Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 2013, No. 3 (39), pp. 178-182. [in Russian].

12. Dorofeev R.S., Dorofeev A.S., Sosinskaya S.S. *Razrabotka sistemy dlya rascheta reitinga prepodavatelei na osnove kvalimetriceskogo podkhoda i ontologii* [Developing a System for Estimation Rating of teachers Based on Qualimetric Approach and Ontology]. *Ontologiya Proektirovaniya — Ontology of Designing*, 2019, Vol. 9, No. 2 (32), pp. 214-224. [in Russian].



**Шулаева Е. А.**  
**Shulaeva E. A.**

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



**Маштанов Н. М.**  
**Mashtanov N. M.**

студент кафедры  
«Автоматизированные  
технологические и  
информационные системы»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный 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: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-107-113

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РТУТНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАУСТИЧЕСКОЙ СОДЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Искусственные нейронные сети (ИНС) являются удобным и естественным базисом для представления информационных моделей и обладают рядом преимуществ. Они не требуют формализации задачи и позволяют адаптировать свойства нейросетевой модели к задачам теоретически неограниченной размерности и сложности.

Единственным требованием является возможность описания моделируемого явления непрерывными функциями. Скорость создания нейросетей существенно выше, чем моделей, создаваемых традиционными методами, а трудоемкость разработки ниже. Кроме того, метод нейронных сетей является новым, перспективным и активно развивающимся, что в условиях усложнения технологических моментов позволяет оставаться конкурентоспособным.

Данная работа посвящена нейросетевому моделированию режима работы ртутного электролизера при получении чистой каустической соды. Взаимосвязи между параметрами электролизера весьма сложны, вследствие чего использование традиционных методов моделирования неэффективно, причем отклонение параметров электролизера от нормальных может привести к катастрофическим последствиям.

В ходе работы разработана нейросетевая модель работы ртутного электролизера. Для создания и обучения нейронных сетей была использована программа Deductor Academic.

Целью данной работы являлось создание точной модели ртутного электролизера при помощи следующих задач: проектирование оптимальных структур нейронных сетей и процесса их обучения, создание модели электролизера путем обучения нейронных сетей, а также обработка результатов моделирования.

В результате данной работы была разработана нейросетевая модель, которая позволяет рассчитывать быстро и точно результат работы электролизера при любых начальных условиях.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, ртутный электролизёр, каустическая сода, моделирование, нейросетевой метод, resilient propagation.

## MODELING OF THE MERCURY ELECTROLYTIC CELL TO OBTAIN CAUSTIC SODA USING A NEURAL NETWORK

Artificial neural networks (ANN) are a convenient and natural basis for the presentation of information models, and have several advantages. They do not require formalization of the problem and allow adapting the properties of the neural network model to problems of theoretically unlimited dimension and complexity.

The only requirement is the ability to describe phenomenon by continuous functions. The speed of creating neural networks is significantly higher than the models created by traditional methods, and the complexity of development is lower. In addition, the method of neural networks is a new, promising and actively developing, which, given the complexity of technological issues, allows to remain competitive.

This work is devoted to neural network modeling of the operation mode of a mercury electrolytic cell when producing pure caustic soda. The interconnections between the parameters of the electrolytic cell are very complex, as a result of which the use of traditional modeling methods is inefficient, and the deviation of the parameters of the electrolytic cell from normal can lead to catastrophic consequences.

In the course of work, a neural network model of the operation of a mercury electrolytic cell was developed. The Deductor Academic program was used to create and train neural networks.

The aim of this work was to create an accurate model of a mercury electrolytic cell using the following tasks: designing optimal structures of neural networks and the process of their training, creating an electrolytic cell model by training neural networks, and also processing modeling results.

As a result of this work, a neural network model was developed, which allows you to quickly and accurately calculate the result of the electrolytic cell operation under any initial conditions.

**Key words:** neural network, mercury electrolytic cell, caustic soda, modeling, neural network method, resilient propagation.

Стремительно развивается направление прикладной математики, специализирующееся на искусственных нейронных сетях. Искусственные нейронные сети используют для распознавания образов таких высоких технологий, как Google, Yandex и др. В передовых нефтяных компаниях иницируются и разрабатываются проекты по принципу интеллектуального месторождения. С учетом мировых и российских инновационных тенденций в нефтяной отрасли происходит модернизация нефтегазовой промышленности в сферах интеллектуализации месторождений и высоких технологий [1], в том числе и производства каустической соды.

Взаимосвязь параметров режима работы ртутного электролизёра является достаточно сложной. Так, напряжение на рамах электролизера зависит от силы тока и от сопротивления раствора (по закону Ома). Однако сопротивление раствора зависит от: температуры раствора, концентрации хлористого натрия в растворе и газонаполнения раствора пузырьками хлора. Последнее зависит от давления хлорогаза и множества других

параметров, в том числе и от напряжения (рисунок 1).

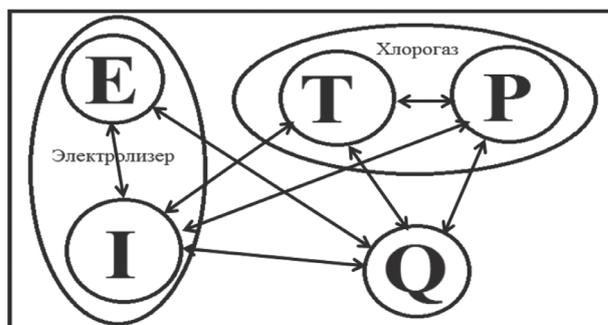


Рисунок 1. Взаимосвязь параметров электролизера

Отклонения таких показателей, как ток и напряжение, при работе ртутного электролизера может привести к следующим последствиям:

- увеличение силы тока приводит к увеличенному образованию хлора, повышению давления в коллекторе хлора, что может вызвать разрыв трубопроводов, поломку компрессоров хлора, а также повреждение самого электролизера вплоть до взрыва;
- рост силы тока и напряжения вызывают увеличение тепловых потерь в ходе

электролиза, за счет чего повышается температура электролита и ртути. Данное обстоятельство может привести к вскипанию электролита и, как следствие, к аварии;

— повышенное напряжение приводит к снижению перенапряжения водорода (т.е. к росту его выделения в ходе электролиза воды). Выделяющийся водород образует взрывоопасную смесь с хлором, что может стать причиной крупной аварии;

— низкий ток приведет к снижению образования хлора, а также натрия в амальгаме, что снизит производительность. Также упадет качество за счет большей доли примесей в технологических потоках;

— низкое напряжение (ниже перенапряжения по хлору) приведет к полному прекращению процесса электролиза хлористого натрия [2].

Нейросетевое моделирование режима работы ртутного электролизера предупреждает возникновение всех этих негативных явлений, тем самым обеспечивая безопасность технологического процесса.

Объектом моделирования в данной работе является ртутный электролизер для производства каустической соды.

Входные параметры для моделирования режима работы ртутного электролизера: водородный показатель pH рассола на электролизере (pH); сила тока на электролизер, кА (I); расход обессоленной воды в передние карманы электролизной ванны, м<sup>3</sup>/ч (Q\_aqua); температура обессоленной воды, °С (T\_aqua); температура рассола на электролизеры, °С (T\_gas); концентрация NaCl в рассоле, г/л (C\_NaCl\_ras); объемный расход рассола на электролизеры, м<sup>3</sup>/ч (Q\_gas); объемный расход ртути в электролизере, м<sup>3</sup>/ч (Q\_Hg).

Выходные параметры для моделирования режима работы ртутного электролизера: температура анолита, °С (T\_anolit); напряжение рамы электролизера № 1, В (E1); напряжение рамы электролизера № 2, В (E2); напряжение рамы электролизера № 3, В (E3); напряжение рамы электролизера № 4, В (E4); объемная доля водорода в хлорогазе, % об. (C\_H2\_in\_Cl2); концентрация хлора в хлорогазе, % об. (C\_Cl2); температура хлорогаза, °С (T\_Cl2); разряжение хлорогаза, мм.вод.ст. (P\_Cl2);

концентрация NaCl в анолите, г/л (C\_NaCl\_anolit).

Для моделирования в качестве данных использованы значения параметров электролизера в разные моменты времени. Эти данные получены опытным путем и загружены в программу Deductor Academic.

Имеющиеся данные использованы для построения и обучения нейронных сетей. Обученные нейронные сети использованы для расчета ими возможных значений параметров электролизера.

В рамках данной статьи была представлена модель для следующих выходных параметров: объемная доля водорода в хлорогазе (C\_H2\_in\_Cl2), концентрация хлора в хлорогазе (C\_Cl2), температура хлорогаза (T\_Cl2), разряжение хлорогаза (P\_Cl2).

Необходимое количество нейронов в скрытых слоях персептрона можно определить по формуле, являющейся следствием теорем Арнольда-Колмогорова-Хехт-Нильсена [3–7]:

$$\frac{N_y Q}{1 + \log_2(Q)} \leq N_w \leq N_y \left( \frac{Q}{N_x} + 1 \right) (N_x + N_y + 1) + N_y,$$

$$\frac{4 \cdot 1676}{1 + \log_2(1676)} \leq N_w \leq 8 \cdot \left( \frac{1676}{8} + 1 \right) \cdot (4 + 8 + 1) + 8,$$

$$573 \leq N_w \leq 10950,$$

где  $N_y$  — размерность выходного сигнала ( $N_y=4$ );

$N_w$  — необходимое число синаптических связей;

$N_x$  — размерность входного сигнала ( $N_x=8$ );

$Q$  — число элементов множества обучающих примеров ( $Q=1676$ ).

Оценив с помощью этой формулы необходимое число синаптических связей  $N_w$ , можно рассчитать необходимое число нейронов в скрытых слоях. Например, число нейронов в скрытых слоях двухслойного персептрона будет равно:  $N = \frac{N_w}{N_x + N_y}$ .

Минимальное число нейронов равно:  $N = \frac{573}{8+4} = 40$ .

Максимальное число нейронов:  $N = \frac{10950}{8+4} = 912$ .

Для обучения первой нейросети выбирается минимальное значение нейронов на единственном скрытом слое — 40.

Далее необходимо определить максимально допустимую ошибку. Выходной параметр непрерывен, лежит в интервале от 0,709 до 1,279. На производстве каустической соды точность измерения объемной доли водорода в хлорогазе составляет 0,01 %.

Именно с такой точностью было дано напряжение в исходных данных. Таким образом, минимальная ошибка должна составлять не

$$\text{более, чем } \varepsilon = 0,01 \cdot \frac{1}{|0,709 + 1,279|} = 0,018.$$

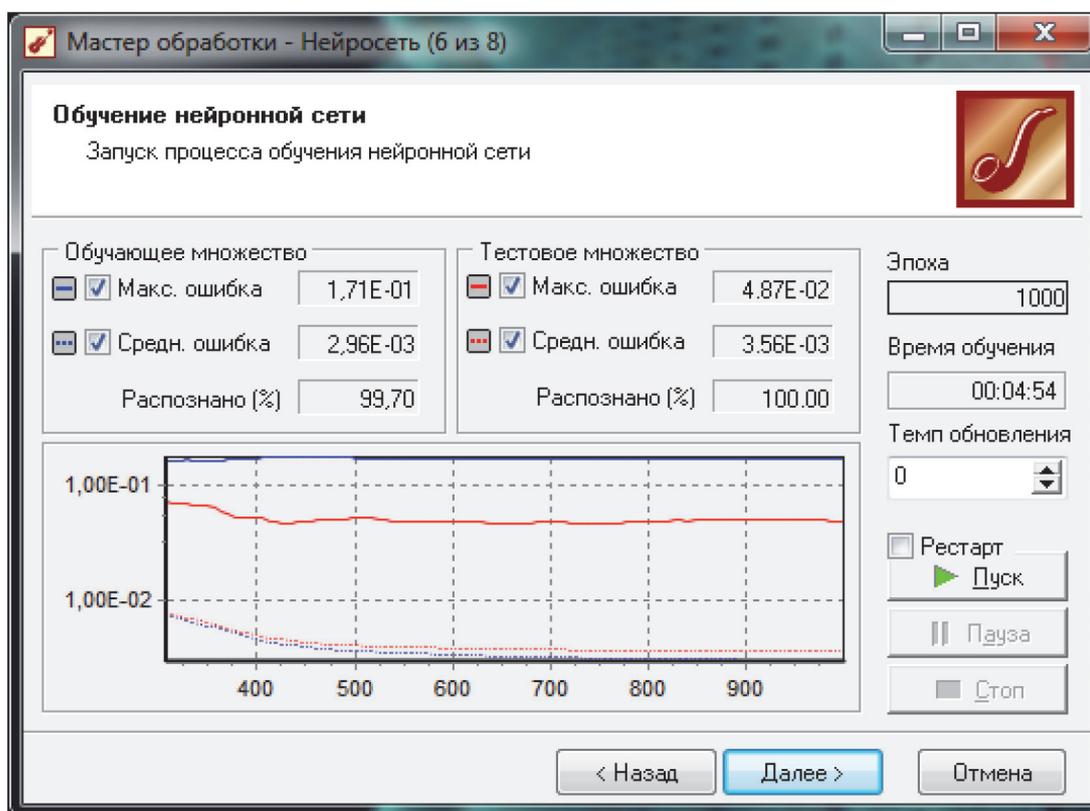
Устанавливается значение ошибки равным 0,005. Количество эпох равно 1000.

В таблице 1 представлены параметры обучения нейронных сетей.

**Таблица 1.** Параметры обучения нейронных сетей

Обучающее множество (строк)	1676 (80 %)
Тестовое множество (строк)	419 (20 %)
Тип функции	Сигмоида
Крутизна	1
Алгоритм	RPROP
Шаг спуска	0,5
Шаг подъема	1,2
Допустимая ошибка	0,05
Количество эпох	1000

На рисунке 2 представлен результат обучения первой нейронной сети  $8 \times 40 \times 4$  после превышения количества эпох обучения.



**Рисунок 2.** Результат обучения сети  $8 \times 40 \times 4$

Аналогично создается вторая нейросеть с одним скрытым слоем. Параметры аналогичны предыдущей сети за исключением числа нейронов на скрытом слое — оно равно максимальному значению и равняется 912 нейронов. Обучение завершилось после превышения количества эпох (рисунок 3).

Третья нейросеть создается с двумя скрытыми слоями. Количество нейронов в обоих скрытых слоях одинаково. Формула количества синаптических связей:

$$N \cdot N_x + N^2 + N \cdot N_y = N_w;$$

$$N \cdot 8 + N^2 + N \cdot 4 = 1676.$$

Решая полученное уравнение, находим его положительный корень:  $N = 89,789 \approx 99$ .

Таким образом, создаем сеть с 2 скрытыми слоями по 99 нейронов в каждом. Обучение завершилось после превышения количества эпох (рисунок 4).

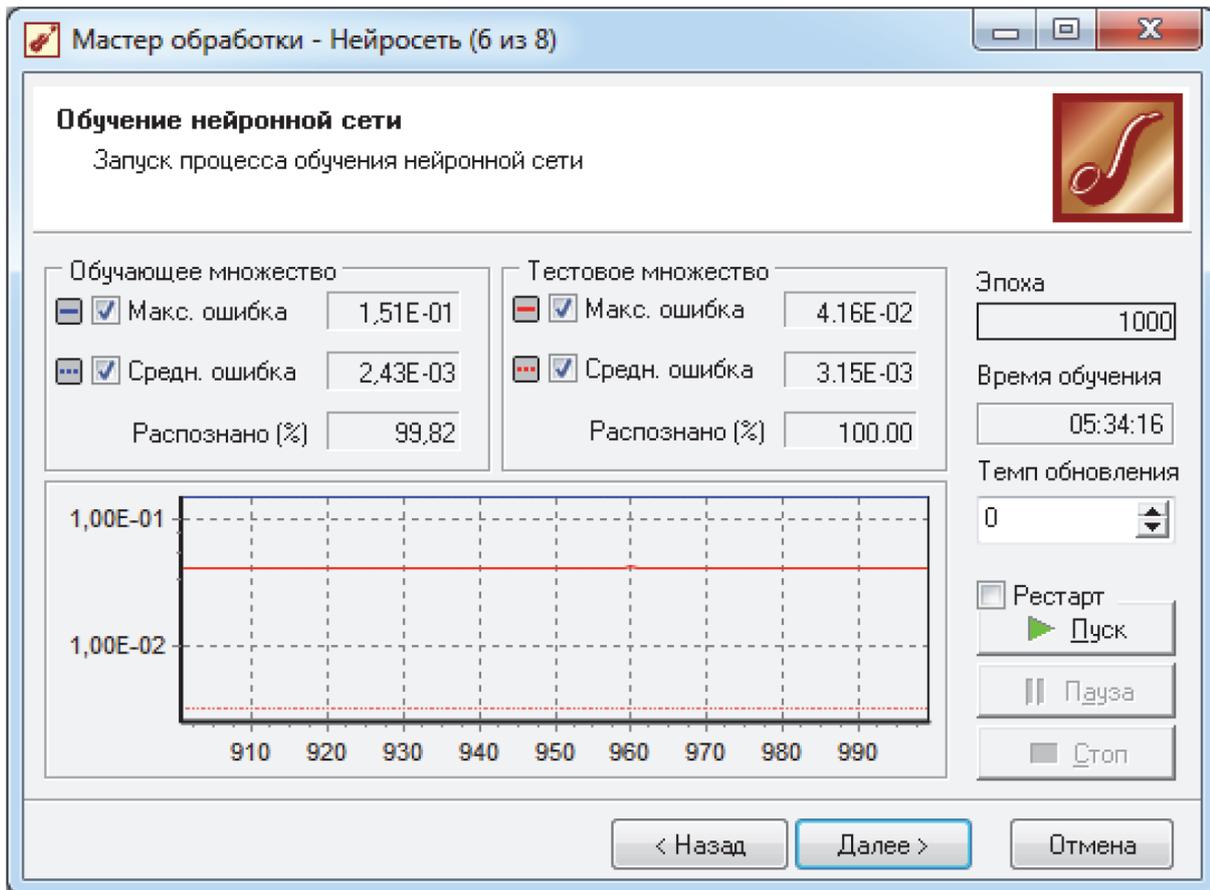


Рисунок 3. Результат обучения сети 8×912×4

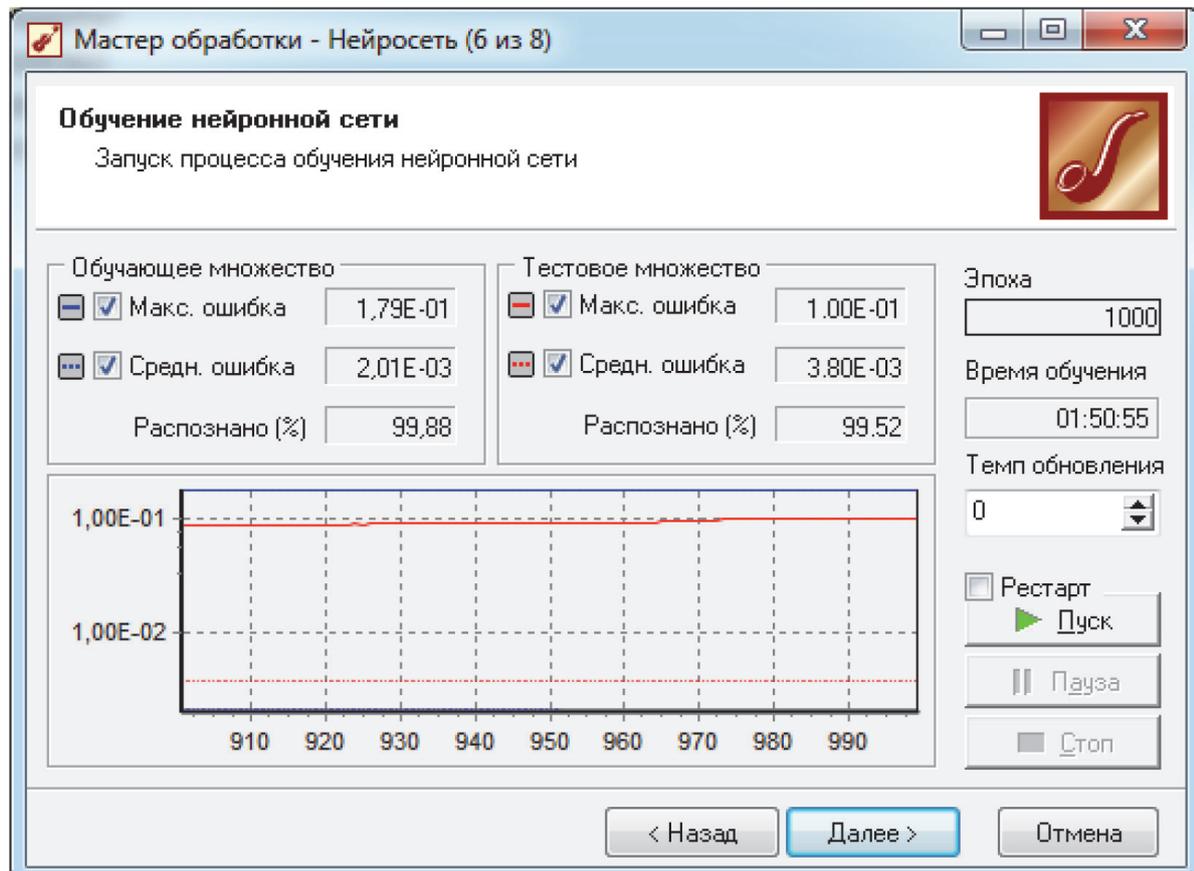


Рисунок 4. Результат обучения сети 8×99×99×4

Наконец проводится выбор наиболее точной нейросети. Критерием для выбора является средняя ошибка тестового множе-

ства. После сравнения представленных в таблице 2 результатов наиболее точной оказалась нейросеть  $8 \times 912 \times 4$ .

**Таблица 2.** Сравнение результатов обучения нейронных сетей

Нейросеть	I	II	III
Число скрытых слоев	1	1	2
Число нейронов	40	912	99 / 99
Время обучения	4 мин 54 с	5 ч 34 мин 16 с	1 ч 50 мин 55 с
Обучающее множество			
Распознано, %	99,70	99,82	99,88
Максимальная ошибка	0,0171	0,0151	0,0179
Средняя ошибка	0,000296	0,000243	0,000201
Тестовое множество			
Распознано, %	100,00	100,00	99,52
Максимальная ошибка	0,00487	0,00416	0,01000
Средняя ошибка	0,000356	0,000315	0,000380

### Выводы

В ходе данной работы были рассчитаны нейросетевые модели получения хлорогаза ртутного электролизера и выбрана наиболее точная. Полученная нейросетевая модель режима работы ртутного электролизера обладает высоким потенциалом к практическому использованию. Так, она может быть внедрена на производство каустической соды

для системы безопасности и предсказания аварийных ситуаций, а также использована для расчёта параметров электролизера при его проектировании и реконструкции. Данный метод моделирования также может быть использован для технологической установки любой сложности при условии наличия экспериментальных данных.

### Список литературы

1. Подольский А.К. Применение методов искусственного интеллекта в нефтегазовой промышленности // Современная наука. 2016. № 3. С. 33–36.
2. Бесчатнов М.В., Соколов В.М., Кац М.И. Аварии в химических производствах и меры их предупреждения. М.: Химия, 1976. 368 с.
3. Арнольд В.И. О функциях трех переменных // Докл. АН СССР. 1957. Т. 114, № 4. С. 679–681.
4. Колмогоров А.Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиций непрерывных функций одного переменного и сложения // Докл. АН СССР. 1957. Т. 114. С. 953–956.
5. Уоссерман Ф. Нейрокомпьютерная техника: Пер. с англ. М.: Мир, 1992. 236 с.
6. Kolmogorov A.N. On the Representation of Continuous Functions of Many Variables by Superposition of Continuous Functions of One Variable and Addition // American Math. Soc. Transl. 1963. No. 28, pp. 55–63.

7. Hecht-Nielsen R. Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem // IEEE First Annual Int. Conf. on Neural Networks, San Diego. 1987. Vol. 3. P. 11–13.

### References

1. Podol'skii A.K. Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta v neftegazovoi promyshlennosti [The Application of Artificial Intelligence Methods in the Oil and Gas Industry]. *Sovremennaya nauka — Modern Science*, 2016, No. 3, pp. 33–36. [in Russian].
2. Beschatnov M.V., Sokolov V.M., Kats M.I. *Avarii v khimicheskikh proizvodstvakh i mery ikh preduprezhdeniya* [Accidents in Chemical Production and Their Prevention]. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 368 p. [in Russian].
3. Arnol'd V.I. O funktsiyakh trekh perezmennykh [About the Functions of Three Variables]. *Doklady AN SSSR — Reports of AS USSR*, 1957, Vol. 114, No. 4, pp. 679–681. [in Russian].
4. Kolmogorov A.N. O predstavlenii nepreryvnykh funktsii neskol'kikh perezmennykh v vide superpozitsii nepreryvnykh funktsii

odnogo peremennogo i slozheniya [On the Representation of Continuous Functions of Several Variables as Superpositions of Continuous Functions of One Variable and Addition]. *Doklady AN SSSR — Reports of AS USSR*, 1957, Vol. 114, pp. 953–956. [in Russian].

5. Wossermen F. *Neirokomp'yuternaya tekhnika: Per. s angl.* [Neurocomputer Technology: Transl. from Engl.]. Moscow, Mir Publ., 1992. 236 p. [in Russian].

6. Kolmogorov A.N. On the Representation of Continuous Functions of Many Variables by Superposition of Continuous Functions of One Variable and Addition. *American Math. Soc. Transl.*, 1963, No. 28, pp. 55–63.

7. Hecht-Nielsen R. Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem. *IEEE First Annual Int. Conf. on Neural Networks*, San Diego, 1987, Vol. 3, pp. 11–13.



**Самаров Е. К.**  
**Samarov E. K.**

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

УДК 004.932

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-114-120

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Статья посвящена сравнительному анализу алгоритмов сжатия цифровых изображений. Особый упор сделан на практические аспекты применения того или иного алгоритма.

Каждый алгоритм сжатия изображений ориентирован на хорошее сжатие изображений из определенного класса, зависящего от глубины цвета, т.е. от числа битов, с помощью которых кодируются пиксели изображения.

В естественных изображениях с большой вероятностью близки цвета выбранных случайным образом соседних пикселей и/или близки их яркости. Большинство алгоритмов сжатия цветных изображений независимо сжимают каждый из цветных каналов изображения.

В алгоритме JPEG для сжатия изображений применяется алгоритм быстрого дискретного преобразования Фурье, и при сжатии изображений практически всегда происходит потеря информации. Степень сжатия изображений и уровень потерь информации являются управляемыми параметрами алгоритма JPEG.

Самым простым и, в то же время, самым неудовлетворительным алгоритмом сжатия изображений является алгоритм прореживания изображений.

Квантование — это одна из групп алгоритмов, сжимающих изображения с потерями информации. Существуют алгоритмы скалярного и векторного квантования.

В стандарте JPEG алгоритм скалярного квантования включается после осуществления быстрого дискретного преобразования Фурье.

При использовании алгоритмов последовательного кодирования/декодирования изображений при декодировании изображение появляется на экране монитора последовательно, строка за строкой, сверху вниз.

При использовании алгоритмов прогрессивного кодирования/декодирования изображений при декодировании изображение появляется на экране быстрее, чем при использовании алгоритмов последовательного кодирования/декодирования, причем появляется на экране не построчно, а целиком, но вначале имеет низкое качество. Затем качество изображения постепенно улучшается.

В алгоритме JPEG используется прогрессивное кодирование/декодирование изображений.

Алгоритмы иерархического кодирования, называемые также алгоритмами пирамидального кодирования, обладают наиболее высокими скоростями кодирования и декодирования среди всех алгоритмов прогрессивного кодирования/декодирования.

Разработка и адаптация новых высокоэффективных алгоритмов сжатия и распаковки изображений при обработке цифровых изображений является важной научно-практической задачей.

**Ключевые слова:** сжатие изображений, алгоритм JPEG, быстрое дискретное преобразование Фурье, прореживание изображений, квантование изображений, скалярное квантование изображений, векторное квантование изображений, последовательное кодирование/декодирование изображений, прогрессивное кодирование/декодирование изображений, алгоритмы иерархического кодирования.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF IMAGE COMPRESSION ALGORITHMS

The article is devoted to the comparative analysis of digital image compression algorithms. Special emphasis is made on the practical aspects for the application of a particular algorithm.

Each image compression algorithm focuses on the best compression of images from a certain class, depending on the color depth, i.e., the number of bits used to encode the image pixels.

In natural images, the colors of randomly selected neighboring pixels are likely to be close and / or close to their brightness. Most color image compression algorithms independently compress each of the image's color channels.

The JPEG algorithm uses the fast-discrete Fourier transform to compress images, and image compression almost always results in loss of information. The compression ratio of images and the level of information loss are the control parameters of the JPEG algorithm.

The simplest and the most unsatisfactory image compression algorithm is the image decimation algorithm.

Quantization is one of the groups of algorithms that compress images with loss of information. There are scalar and vector quantization algorithms.

In the JPEG standard, the scalar quantization algorithm is enabled after performing a fast-discrete Fourier transform.

When using sequential image encoding/decoding algorithms, when decoding, the image appears on the monitor screen sequentially, line by line, from top to bottom.

When using progressive image encoding/decoding algorithms, the decoding image appears on the screen faster than when using sequential encoding/decoding algorithms, and appears on the screen not line by line, but as a whole, but initially has a low quality. The image quality is then gradually improved.

The JPEG algorithm uses progressive image encoding/decoding.

Hierarchical coding algorithms, also called pyramid coding algorithms, have the highest encoding and decoding rates among all progressive coding/decoding algorithms.

The development and adaptation of new high-performance algorithms for image compression and decompression in the processing of digital images is an important scientific and practical task.

**Key words:** image compression, JPEG algorithm, fast-discrete Fourier transform, image decimation, image quantization, image scalar quantization, image vector quantization, sequential image encoding/decoding, progressive image encoding/decoding, hierarchical coding algorithms.

Сжатие (компрессия) и распаковка (декомпрессия) изображений, также, как и фильтрация шума, являются одними из важнейших этапов цифровой обработки изображений [1].

Компрессором (кодером, алгоритмом сжатия) называют компьютерную программу, которая при применении к файлу уменьшает его объём за счет сокращения избыточности (сжимает файл). При сжатии файл, как правило, преобразуется в специальный формат, зависящий от использованной программы сжатия.

Декомпрессором (декодером, алгоритмом распаковки) называют компьютерную программу, которая распаковывает сжатый файл, т.е. преобразует сжатый файл в исходный формат.

Совокупность кодера и декодера называют кодеком [2].

Все алгоритмы сжатия изображений подразделяются на алгоритмы адаптивного сжатия изображений и алгоритмы неадаптивного сжатия изображений. Алгоритмы адаптивного сжатия изображений, в свою очередь, подразделяются на полуадаптивные алгоритмы сжатия изображений и локально адаптивные алгоритмы сжатия изображений.

Алгоритмы адаптивного сжатия сначала проводят анализ сжимаемого изображения, а лишь потом, в зависимости от полученного результата, осуществляют сжатие изображения.

В алгоритмах полуадаптивного сжатия, к которым, в частности, относится алгоритм кодирования Хаффмана, осуществляется двойной обход изображения. Во время первого обхода изображения проводится анализ статистики изображения, а во время второго

обхода на основе собранной статистики осуществляется сама процедура сжатия изображения [3].

В локально адаптивных алгоритмах сжатия, которые являются более сложными, чем полуадаптивные алгоритмы, настройка параметров сжатия осуществляется в зависимости от локальной структуры изображения и меняется от области к области.

Алгоритмы неадаптивного сжатия никак не анализируют структуру изображения и лучше всего сжимают изображения, содержащие однотипные данные.

Другой классификацией алгоритмов сжатия изображений является их подразделение на алгоритмы сжатия с потерями информации (данных) и алгоритмы сжатия без потерь информации (данных). Иногда такие алгоритмы называют алгоритмами сжатия изображений с потерями качества и алгоритмами сжатия изображений без потерь качества.

Алгоритмы сжатия с потерями информации содержат процент допустимой потери информации, содержащейся в изображении, в качестве одного из параметров настройки алгоритма.

Как правило, при допустимом уровне потерь информации распакованное изображение визуально ничем не отличается от исходного. Однако в некоторых практически важных случаях допустимы и такие виды сжатия изображений с потерями информации, при котором человек видит разницу между распакованным и исходным изображением, но различия между ними не считаются существенными. Более того, в этих случаях визуальные отличия между распакованным и исходным изображением и служат критерием качества алгоритма [4].

Алгоритмы сжатия без потерь используются тогда, когда любые потери информации недопустимы. Такая ситуация возникает, например, при сжатии текстовой информации.

Важно отметить, что каждый алгоритм сжатия файлов ориентирован на хорошее сжатие файлов из определенного класса, файлы, не входящие в этот класс, сжимаются гораздо хуже. Так, например, алгоритмы, ориентированные на сжатие текстов, крайне

неэффективны при сжатии изображений. Более того, для каждого алгоритма сжатия всегда найдется файл, который вообще не поддаётся сжатию. Как правило, такие файлы создают искусственно и на практике они не встречаются.

Самым простым и, в то же время, самым неудовлетворительным алгоритмом сжатия изображений является алгоритм прореживания изображений, идея которого заключается в следующем. Предположим, например, что рассматриваемый кодер выбрасывает из изображения, которое представляет собой числовую матрицу, строки и столбцы с четными номерами, а из оставшихся строк и столбцов формирует новую матрицу. Эта новая матрица и будет сжатым изображением, причем коэффициент сжатия не является одним из параметров настройки алгоритма, заранее известен и оказывается равным 0,25. Для распаковывания сжатого изображения декодер, например, удваивает каждую строку и каждый столбец сжатого изображения. В случае хроматического изображения описанное прореживание осуществляется по каждой из трех компонент: красной, зеленой и голубой. Построенный на основе этой схемы алгоритм является алгоритмом сжатия с потерями информации, причем потери информации, как правило, будут очень существенными.

Более эффективной является модификация приведенного алгоритма прореживания, если прореживание осуществляется не в цветовом пространстве RGB, а в цветовом пространстве YCrCb, где переменная Y является яркостью пикселя, а переменные Cr и Cb отвечают за его цвет. Рассматриваемый кодер осуществляет прореживание в обеих переменных цветности, а переменную яркости оставляет без изменения. В случае, когда все три переменные Y, Cr и Cb кодируются одним и тем же количеством битов, объём, занимаемый переменными Cr и Cb, составляет 2/3 объёма всего изображения. В результате прореживания объём, занимаемый переменными Cr и Cb, уменьшится в 4 раза, следовательно, объём сжатого изображения составит

$$\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{4} + \frac{1}{3} = \frac{1}{2}$$

часть исходного изображения. Таким образом, коэффициент сжатия описанной модификации алгоритма прореживания равен 0,5.

Квантованием называют одну из групп алгоритмов, сжимающих изображения с потерями информации, причем существуют две разновидности квантования изображений: скалярное квантование и векторное квантование.

Скалярное квантование изображений осуществляется либо в пространственной области, либо в частотной области.

При скалярном квантовании изображений в пространственной области проводятся сечение диапазона яркостей изображения на поддиапазоны с помощью равноотстоящих или не равноотстоящих уровней и пересчет каждого значения яркости изображения на значение одной из двух ближайших к нему границ поддиапазона. Тем самым, скалярное квантование чем-то напоминает процедуру округления дробных чисел до ближайших к ним целых чисел, а также процедуру группировки выборочных данных в математической статистике [5].

При скалярном квантовании в частотной области описанная операция округления осуществляется над спектральными коэффициентами в пространстве частот, полученном в результате дискретного преобразования Фурье [6], дискретного косинусного преобразования Фурье или вейвлет-преобразования. После проведения операции округления в пространстве частот совершается переход в пространственную область с помощью соответствующего обратного преобразования [7].

В стандарте JPEG алгоритм скалярного квантования включается после осуществления дискретного косинусного преобразования Фурье.

В алгоритмах векторного квантования сначала проводится разбиение изображения на одинаковые прямоугольные области пикселей – блоки (домены), называемые в тематике квантования изображений векторами. Кодер по определенному правилу ставит в соответствие каждому вектору кодовое слово, причем количество битов, необходимых для записи кодовых слов, как правило,

оказывается меньшим, чем количество битов, необходимых для кодирования векторов. Множество кодовых слов, построенных по конкретному изображению, и является сжатым изображением, а набор всех векторов и соответствующих им кодовых слов формируют кодовую книгу. При распаковке сжатого изображения декодер по определенному правилу сопоставляет каждому встреченному им кодовому слову «наиболее близкий» вектор из пространственной области.

Алгоритмы векторного квантования сжимают изображения лучше, чем алгоритмы скалярного квантования, однако у алгоритмов векторного квантования потери информации оказываются большими, чем у алгоритмов скалярного квантования.

При использовании алгоритмов последовательного кодирования/декодирования изображений при декодировании изображение появляется на экране монитора последовательно, строка за строкой, сверху вниз.

При использовании алгоритмов прогрессивного кодирования/декодирования изображений, которые встречаются наиболее часто, изображение при декодировании появляется на экране быстрее, чем при использовании алгоритмов последовательного кодирования/декодирования, причем появляется на экране не построчно, а целиком, но вначале имеет низкое качество. Затем качество изображения постепенно улучшается. Это свойство алгоритмов прогрессивного кодирования/декодирования изображений оказалось очень востребованным для кодирования изображений с целью их передачи по каналам связи, в частности, при передаче изображений по сети Интернет, поскольку конечный пользователь может начинать проведение анализа получаемого изображения в реальном времени ещё до момента прихода изображения в наилучшем качестве.

Ещё одним полезным и удобным свойством алгоритмов прогрессивного кодирования/декодирования изображений служит возможность осуществления остановки процесса кодирования в задаваемый заранее момент. В большинстве алгоритмов прогрессивного кодирования/декодирования изображений длительность процесса кодирования

изображений является одним из управляющих параметров алгоритма. При увеличении времени кодирования степень сжатия изображения увеличивается, а качество распакованного изображения ухудшается, т.к. увеличивается количество потерянной информации. При уменьшении времени кодирования изображения степень сжатия уменьшается, а качество распакованного изображения улучшается. Дополнительные преимущества предоставляет возможность распаковки одного и того же сжатого изображения с разной степенью в зависимости от потребностей пользователей.

В варианте алгоритма JPEG, использующем прогрессивное кодирование/декодирование и основанном на быстром дискретном косинусном преобразовании Фурье, сжатие, а также и распаковка начинаются с обратного преобразования Фурье низкочастотных гармоник, что позволяет сразу же получить изображение в низком качестве. Обратное преобразование Фурье, применяемое к высокочастотным гармоникам, добавляет отсутствующие в начале декодирования подробности изображения.

Алгоритмы иерархического кодирования обладают наиболее высокими скоростями кодирования и декодирования среди всех алгоритмов прогрессивного кодирования/декодирования, и по этой причине применяются чаще других алгоритмов прогрессивного кодирования/декодирования. Изображение в алгоритмах иерархического кодирования сжимается и распаковывается по уровням пирамиды изображения, в связи с чем такие алгоритмы часто называют алгоритмами пирамидального кодирования.

Приведем расчет степени сжатия исходного изображения в простейшем варианте алгоритма прогрессивного кодирования, носящем название алгоритма пирамидального кодирования.

С этой целью рассмотрим некоторое изображение  $A$  с размерами  $2^n \times 2^n$  пикселей.

Пирамидой, построенной по изображению  $A$  (пирамидой изображения  $A$ ), называют правильную усеченную четырехугольную пирамиду, у которой нижним основанием

является исходное изображение (квадрат со стороной  $2^n$ ), верхнее основание – квадрат со стороной 1, а высота пирамиды имеет длину  $n$  (рисунок 1). Если представить высоту пирамиды как отрезок  $[0, n]$ , и через точки этого отрезка, заданные целочисленными координатами

$$0, 1, \dots, n,$$

провести плоскости, перпендикулярные высоте пирамиды, то мы получим сечения пирамиды, называемые уровнями.

Уровни принято нумеровать последовательными целыми числами сверху вниз, начиная с номера 0, который присваивается верхнему основанию пирамиды. Уровень с номером  $k$ , где

$$k = 0, 1, \dots, n,$$

является квадратом со стороной  $2^k$ . Нижнее основание пирамиды (исходное изображение  $A$ ) является уровнем с наибольшим номером  $n$ .

Идея сжатия изображения, лежащая в основе прогрессивных алгоритмов иерархического кодирования, заключается в последовательном заполнении пикселями уровней пирамиды изображения в порядке уменьшения их номеров, начиная с уровня с номером  $n-1$  в соответствии со следующей схемой.

Уровень с номером  $k-1$  для

$$k = 1, 2, \dots, n$$

заполняется после заполнения уровня с номером  $k$ , причем яркость каждого пикселя  $k-1$  уровня определяется при помощи вычисления среднего арифметического яркостей некоторой группы пикселей уровня с номером  $k$ . Уровень с номером  $n$ , представляющий собой исходное изображение, является заполненным с самого начала.

Если бы в результате применения описанной схемы все уровни пирамиды изображения оказались полностью заполненными, то с 0-го по  $n-1$  уровень в сумме было бы

$$1 + 4 + 4^2 + \dots + 4^{n-1} = \frac{4^n - 1}{3}$$

пикселей. Разделив полученное число на количество пикселей в исходном изображении, найдем степень сжатия:

$$\frac{4^n - 1}{3 \cdot 4^n} = \frac{1 - 4^{-n}}{3} \cong \frac{1}{3}.$$

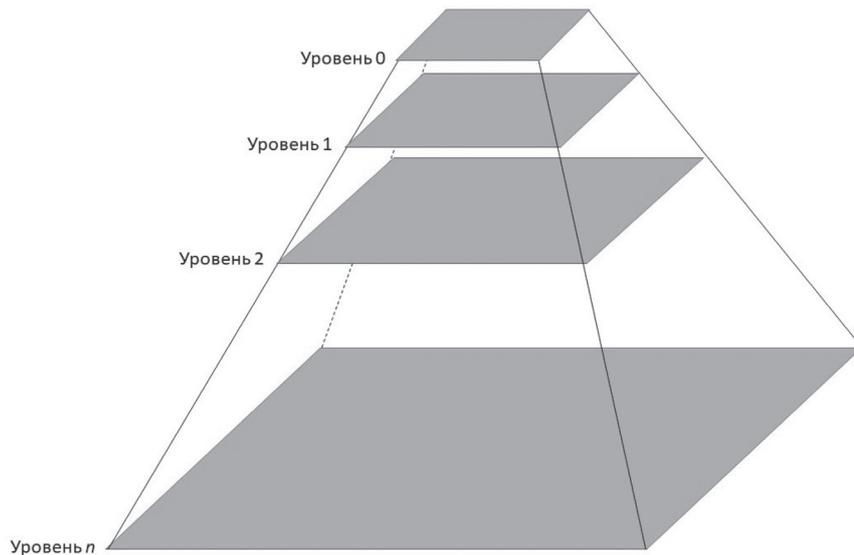


Рисунок 1. Пирамида изображения

Таким образом, объем сжатого изображения, составленного из пикселей с 0-го по  $n-1$  уровень, равен одной трети исходного изображения.

Конечно же, приведенный расчет степени сжатия в простейшем алгоритме пирамидального сжатия является приближенным. В нем, в частности, не учтен эффект, вызываемый квантованием, которое является составной частью практически любого алгоритма пирамидального кодирования/декодирования изображений. За счет квантования степень сжатия будет значительно большей, однако возрастут и потери информации.

### Список литературы

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
2. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. 792 с.
3. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 608 с.
4. Хуанг Т.С. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. М.: Радио и связь, 2012. 222 с.
5. Самаров Е.К. Синтез алгоритма оптимальной линейной модуляции шума в цифровой обработке изображений // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. Т. 15, № 2. С. 77–84.

### Выводы

Алгоритмы иерархического кодирования, называемые также алгоритмами пирамидального кодирования, обладают наиболее высокими скоростями кодирования и декодирования среди всех алгоритмов прогрессивного кодирования/декодирования.

Разработка и адаптация новых высокоэффективных алгоритмов сжатия и распаковки изображений при обработке цифровых изображений является важной научно-практической задачей.

6. Привалов И.И. Ряды Фурье. М.: Едиториал УРСС, 2018. 168 с.
7. 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. Gonzalez R., Woods R. *Digital Image Processing*. Moscow, Tekhnosfera, 2012. 1104 p.
2. Pratt W. *Digital Image Processing*. Moscow, Mir Publ., 1982. 792 p. [in Russian].
3. Krasil'nikov N.N. *Tsifrovaya obrabotka 2D- i 3D-izobrazhenii: ucheb. posobie* [Digital Processing for 2D and 3D Images]. Saint-

Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2011, 608 p. [in Russian].

4. Huang T.S. *Bystrye algoritmy v tsifrovoi obrabotke izobrazhenii* [Fast Algorithms in Digital Image Processing]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2012. 222 p. [in Russian].

5. Samarov E.K. Sintez algoritma optimal'noi lineinoi modulyatsii shuma v tsifrovoi obrabotke izobrazhenii [Synthesis of the Algorithm for Linear Noise Modulation in Digital Image Processing]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2019, Vol. 15, No. 2, pp. 77–84. [in Russian].

6. Privalov I.I. *Ryady Fur'e* [Fourier Series]. Moscow, Editorial URSS, 2018. 168 p. [in Russian].

7. Artyushenko V.M., Samarov E.K. Primenenie algoritma fil'tratsii Kalmana-B'yusi v zadachakh analiza kachestva elektroenergii [Application of Kalman-Bucy Filtration Algorithm in Problems of Power Quality Analysis]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2006, Vol. 2, No. 1, pp. 17–23. [in Russian].



**Доломатов М. Ю.**  
**Dolomatov M. Yu.**

доктор химических наук,  
профессор,  
профессор кафедры  
технологии нефти и газа,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет»,  
профессор кафедры  
физической электроники и  
нанопластики,  
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  
нанопластики,  
ФГБОУ ВО «Башкирский  
государственный  
университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Шарипов Т. И.**  
**Sharipov T. I.**

кандидат физико-  
математических наук,  
доцент кафедры  
физической электроники  
и нанопластики,  
ФГБОУ ВО «Башкирский  
государственный  
университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Рыжиков О. Л.**  
**Ryzhikov O. L.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
физической электроники  
и нанопластики,  
ФГБОУ ВО «Башкирский  
государственный  
университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Гильманшина К. А.**  
**Gilmanshina K. A.**

аспирант кафедры  
технологии нефти и газа,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет»  
г. Уфа,  
Российская Федерация

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНЫХ СВОЙСТВ АМОΡФНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ НАНОКЛАСТЕРОВ НЕФТЯНЫХ АСФАЛЬТЕНОВ

Проведено исследование донорно-акцепторных свойств аморфных полупроводников на основе нанокластеров нефтяных асфальтенов. Определена молекулярная и электронная структура нанокластеров, состоящих из молекулярных фрагментов нефтяных асфальтенов «континентального» типа. Объектами исследования являются асфальтены гудрона 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 установлено, что асфальтеновая фракция является сильным донором и акцептором электронов. Значения эффективного потенциала ионизации находятся в пределах от 5,29 до 5,59 эВ, значения эффективного сродства к электрону – от 1,80 до 1,85 эВ, значения ширины запрещенной зоны — от 3,49 до 3,74 эВ.

Исследование электронной структуры молекулярных фрагментов наночастиц асфальтенов проведено методом DFT/B3LYP с базисным набором 6-31+G\* с использованием программного пакета GAUSSIAN. Расчет нанокластеров асфальтенов, образованных молекулярными фрагментами, был проведен методом молекулярной механики MM+. Квантово-химические расчеты показали, что первый вертикальный потенциал ионизации равен 6,07 эВ, сродства к электрону — 1,22 эВ, энергия активации проводимости принимает значения в интервале от 0,99 до 1,96 эВ, что в целом отражает результаты эксперимента. Данная закономерность подтверждается при исследовании электропроводности асфальтенов и концентратов на их основе. Показано, что наиболее устойчивыми являются наноагрегаты, состоящие из 6–10 нафтенно-ароматических пластин.

**Ключевые слова:** аморфные полупроводники, донорно-акцепторные свойства, ширина запрещенной зоны, электропроводность, нефтяные асфальтены, нанокластеры, димеры, потенциал ионизации, сродство к электрону, оптическая спектроскопия, квантово-химические расчеты.

## RESEARCH OF AMORPHOUS SEMICONDUCTORS DONOR AND ACCEPTOR PROPERTIES ON OIL ASPHALTENES NANOCCLUSERS BASIS

The study of amorphous semiconductors donor and acceptor properties on the basis of oil asphaltene nanoclusters is conducted. The molecular and electronic structure of the nanoclusters consisting of molecular fragments of «continental» type oil asphaltene is defined. Research objects are asphaltene of West Siberian oil tar and asphaltene of the West Siberian Oil. Selection and division of asphaltene was carried out on the device Soxlet by I.R. Hayrudinov's technique. Registration of absorption spectrum of solutions in the range of 280-780 nanometers was carried out on spectrophotometer SP-2000. In the course of studying of absorption spectrum of asphaltene and the hydrocarbon systems of different origin by method of optical spectroscopy it is established that the asphaltene fraction is a strong donor and an acceptor of electrons. The values of the effective ionization potential are in the range from 5.29 to 5.59 eV, the values of the effective electron affinity are from 1.80 to 1.85 eV, and the band gap is from 3.49 to 3.74 eV.

The electronic structure of the molecular fragments of asphaltene nanoparticles was studied using the DFT/B3LYP method with a basic set of 6-31 + G \* using the GAUSSIAN software package. The calculation of asphaltene nanoclusters formed by molecular fragments was carried out using the molecular mechanics MM+ method. Quantum chemical calculations showed that the first vertical ionization potential is 6.07 eV, electron affinity (SE) is 1.22 eV, and the conductivity activation energy takes values in the range from 0.99 to 1.96 eV, which generally reflects the results of the experiment. This pattern is confirmed in the study of the electrical conductivity of asphaltene and concentrates based on them. It is shown that the most stable are nanoaggregates consisting of 6–10 naphthenic-aromatic plates.

**Key words:** amorphous semiconductors, donor-acceptor properties, width of a forbidden band, conductivity, oil asphaltenes, nanoclusters, dimers, ionization potential, electron affinity, optical spectroscopy, quantum-chemical calculations.

Высокомолекулярные соединения нефти — асфальтены имеют определенную перспективу применения в качестве органических материалов для электроники и электротехники [1, 2]. В асфальтосмолистых веществах нефти, в частности асфальтенах, методами спектроскопии установлено присутствие структур, состоящих из конденсированных бензольных и нафтеновых шестичленных колец. Количество асфальтенов в сырых нефтях варьируется от 0,1 % масс. до 50,0 % масс. [3, 4]. Кроме того, в асфальтенах содержатся структуры, представляющие собой стабильные свободные радикалы, то есть частицы, имеющие неспаренные электроны. По данным многочисленных исследований методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) концентрация свободных радикалов достигает  $10^{20}$  спин/г [5]. Многочисленные эксперименты показывают, что при высоких концентрациях свыше 100 мг/л образуются стопкообразные частицы и ассоциаты. Молекулярные массы асфальтенов по данным осмометрии, криоскопии, хромато-масс-спектрометрии варьируются от 700 до 8000 а.е.м. [6, 7]. 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) [8]. Основными компонентами нефтяных асфальтенов являются алкилароматические, циклоалкановые, парафиновые углеводороды [8, 9]. В молекулах асфальтенов содержатся структуры, содержащие гетероатомы и металлы. Так, в молекулах асфальтенов обнаружены фрагменты пиридина, пиррола, порфириновые комплексы, а также кислотные гидроксильные, тиоловые, сложноэфирные и другие группы [9, 10]. Результаты исследования методом  $^{13}\text{C}$  ЯМР-спектроскопии показали, что молекулы нефтяных асфальтенов имеют структуру преимущественно «континентального» типа [11].

Молекулы асфальтенов взаимодействуют с электрическим полем, так как имеют

дипольный момент до 4 D. Показано, что асфальтены являются хорошими донорами и акцепторами электронов, что подтверждается зависимостью растворимости от энергии ионизации соответствующего сольвента [12]. Проведенные исследования указывают на возможность использования асфальтенов в качестве органических электропроводящих материалов [13–15]. Целью данной работы является исследование донорно-акцепторных свойств аморфных полупроводников на основе нанокластеров димеров нефтяных асфальтенов.

#### *Объекты исследования*

Объектами исследования являются асфальтены гудрона Западно-Сибирской нефти (ЗСН).

#### *Экспериментальные методы*

Для выделения и разделения асфальтенов использована методика И.Р. Хайрудинова [16]. Электронные абсорбционные спектры растворов асфальтенов в толуоле в видимой и УФ-области (280–780 нм) регистрировались на спектрофотометре СФ-2000. Определение эффективных потенциалов ионизации (ЭПИ), сродства к электрону (ЭСЭ) и физико-химических свойств проводили по методикам [17, 18].

#### *Расчетные методы*

Исследования электронной и химической структур молекулярных фрагментов наночастиц асфальтенов проведено методом DFT/B3LYP 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.

Известно, что в аморфных материалах, построенных из органических молекул, происходит локализация носителей заряда, обусловленная затуханием волновых функций между молекулами. При этом предполагается, что энергия активации проводимости нанокластера зависит от энергетической щели молекулы в газовой фазе  $E_g^0$  и энергии

поляризации  $P$ . Значения энергетической щели в газовой фазе  $E_g^0$  определяются как разность  $IP$  потенциала ионизации и  $EA$  сродства к электрону молекулы

$$E_g^0 = IP - EA. \quad (1)$$

Химическое взаимодействие молекул может быть обусловлено образованием водородных связей внутримолекулярного типа и образованием комплексов с переносом заряда. Энергия поляризации возникает при взаимодействии электрона с полярными молекулами и дыркой, поэтому очевидно равенство

$$P = E_p. \quad (2)$$

Энергия электростатических электрон-дырочных взаимодействий  $E_p$  определяется по формуле

$$E_p = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0\epsilon\bar{r}}, \quad (3)$$

где  $e$  — элементарный заряд электрона;

$\epsilon_0$  — электрическая постоянная;

$\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды ( $\epsilon=2$ );

$\bar{r}$  — среднее расстояние между молекулярными фрагментами в нанокластере ( $\bar{r}=3.6 \text{ \AA}$ ).

В нашем случае для фрагментов асфальтенов характерно сильное межмолекулярное взаимодействие за счет образования водородных связей и переноса заряда, поэтому вносится поправка  $\Delta E_M$ , которая учитывает межмолекулярное взаимодействие за счет образования водородных связей и дальнедействующих сил Ван-дер-Ваальса. Эти поправки учитываются эмпирическими парными потенциалами в методе молекулярной механики. Энергию межмолекулярного взаимодействия  $\Delta E_M$  молекулярных фрагментов в структурах нанокластеров определяли по зависимости:

$$\Delta E_M = \left| \frac{E - N \cdot E_{M_i}}{N} \right|, \quad (4)$$

где  $E$  — энергия взаимодействия частиц, составляющих нанокластеры;

$E_{M_i}$  — потенциальная энергия структурной единицы, входящей в состав нанокластера;

$N$  — количество структурных единиц в нанокластере.

Энергию активации проводимости вычисляем по известной зависимости:

$$E_A = E_g^0 - 2P - \Delta E_M. \quad (5)$$

В структуры молекулярных фрагментов нанокластеров включены ароматические, нафтеновые и пиррольные кольца, карбонильные группы, а также цепочки  $C_2H_5$ -заместителей. Молекулярные нафтеноароматические фрагменты в димерах соединены алкановыми мостиками, состоящими из четырех атомов углерода. Структура молекулярного димера содержит 24 ароматических, 2 нафтеновых и 2 пиррольных кольца. Молекулярная масса нафтеноароматического фрагмента равна 1234 а.е.м. Отношение (С/Н)мол димера равно 17,27. Изучены нанокластеры, содержащие от 2 до 10 молекулярных фрагментов.

#### *Результаты и обсуждение*

Методом электронной феноменологической спектроскопии определены эффективные потенциалы ионизации (5,29–5,59 эВ), сродства к электрону (1,80–1,85 эВ) и ширины запрещенной зоны в газовой фазе (3,49–3,74 эВ) асфальтенов гудрона ЗСН. Среднечисловая молекулярная масса асфальтенов находится в диапазоне от 3798 до 3884 а.е.м.

Исследование электронной структуры молекулярных фрагментов наночастиц нефтяных асфальтенов, проведенное методом DFT/B3LYP, показало, что адиабатический первый потенциал ионизации равен 6,07 эВ, сродство к электрону — 1,22 эВ. Результаты расчета согласуются с данными, полученными термодинамическим методом [19].

Рассчитаны значения дипольных моментов нанокластеров (от 2,80 до 3,44 D).

Рассчитаны значения энергии активации проводимости нефтяных асфальтенов. Показано, что при увеличении количества молекулярных фрагментов в кластере от 2 до 10 значения энергии активации проводимости находятся в пределах от 0,99 до 1,96 эВ. Результаты расчета энергии активации проводимости совпадают с данными, полученными путем измерения электрической проводимости [20].

Исследования показывают, что, начиная с определенного значения количества молекулярных фрагментов в нанокластере (около 6),

значения энергии активации проводимости принимают определенное значение (1,86 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 нафтоароматических пластин.

### Выводы

Экспериментально установлено, что величина эффективного потенциала ионизации находится в пределах от 5,29 до 5,59 эВ, а величина эффективного сродства к электрону — от 1,80 до 1,85 эВ.

Расчеты показывают, что величина запрещенной зоны проводимости варьируется от

3,49 до 3,74 эВ. Квантово-химические расчеты показали, что первый вертикальный потенциал ионизации равен 6,07 эВ, сродство к электрону — 1,22 эВ. Кроме того, по результатам экспериментального исследования установлено, что энергия активации проводимости достигает 1,35 эВ [20]. Это подтверждают расчеты, согласно которым эта энергия активации проводимости нанокластеров нефтяных асфальтенов принимает значения в интервале от 0,99 до 1,96 эВ. Показано, что наиболее устойчивыми являются наноагрегаты, состоящие из 6–10 нафтоароматических пластин.

*Работа выполнена по гранту РФФИ № 17-42-020616.*

### Список литературы

1. 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 Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2005. No. 102. P. 8815.
2. Bracciale M., Sennato S., Marrocchi A. On Evaluating Organic Electronic Materials of Asphaltene Components // *Sixth International Meeting on Molecular Electronics*. 03–07 December 2012, Grenoble, France. P. 285.
3. Speight J.G. *Handbook of Petroleum Analysis*. JohnWiley & Sons, 2001. 480 p.
4. Sharma C.D., Bhagat S.D., Erhan S.Z. Maltenes and Asphaltenes of Petroleum Vacuum Residues: Physico-Chemical Characterization // *Petroleum Science and Technology*. 2007. No. 25. P. 93-104.
5. Унгер Ф.Г., Андреева Л.Н. *Фундаментальные аспекты химии нефти. Природа смол и асфальтенов*. Новосибирск: Наука, 1995. 192 с.
6. 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.
7. Groenzin H., Mullins O.C. Molecular Size and Structure of Asphaltenes from Various Sources // *Energy Fuels*. 2000. Vol. 14, No 3. P. 677.

8. Andrews A.B., Edwards J.C., Pomerantz A.E., Mullins O.C., Dennis Nordlund D.K. Comparison of Coal-Derived and Petroleum Asphaltenes by <sup>13</sup>C Nuclear Magnetic Resonance // *DEPT, and XRS Energy Fuels*. 2011. Vol. 25. No. 7. P. 3068.
9. Mullins O.C., Sheu E.Y. *Structures and Dynamics of Asphaltenes*. Springer Science+Business Media, LLC, 1998. 293 p.
10. Mitra-Kirtley S., Mullins O.C., Van Elp J., George S.J., Chen J., Cramer S.P. Determination of the Nitrogen Chemical Structures in Petroleum Asphaltenes Using XANES Spectroscopy. *J. Am. Chem. Soc.* 1993. Vol. 115. No. 1. P. 252–258.
11. 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.
12. Варфоломеев Д.Ф., Доломатов М.Ю., Хайрутдинов И.Р., Унгер Ф.Г. К вопросу о донорно-акцепторных взаимодействиях при растворении асфальтенов // *Достижения в исследовании высокомолекулярных соединений нефти*. Томск, 1985. С. 11.
13. Дезорцев С.В., Доломатов М.Ю., Шуткова С.А. Технология получения полупроводниковых материалов на основе нефтяных асфальтенов // *Химическая технология*. 2012. Т. 13. № 2. С. 88–92.
14. Доломатов М.Ю., Дезорцев С.В., Шуткова С.А., Шуляковская Д.О. Асфальто-

смолистые вещества и продукты на их основе как возможные материалы для нанoeлектроники // *Наукоемкие технологии*. 2012. Т. 13. № 6. С. 18-22.

15. 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. P. 151–157.

16. Хайрудинов И.Р., Султанов Ф.М., Теляшев Э.Г. Современные процессы сольвентной деасфальтизации нефтяных остатков. Уфа: Изд-во ГУП ИНХП РБ. Серия «Библиотека нефтепереработчика», 2011. 208 с.

17. Долوماتов 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.

18. Dolomatov M.Yu., Shulyakovskaya D.O., Mukaeva G.R., Yarmukhametova G.U., Latypov K.F. Simple Characteristics Estimation Methods of Material and Molecule Electronic Structure // *Journal of Materials Science and Engineering*. 2012. Т. 2. No. 4. P. 261–268.

19. Долوماتов М.Ю., Марушкин А.Б., Гимаев Р.Н., Селивестров М.М. Термодинамика формирования надмолекулярной структуры асфальтенов // *Химия твердого топлива*. 1989. № 6. С. 83–86.

20. Petrov A.M., Dolomatov M.Yu., Bakhizin R.Z., Ryzhikov O.L., Khayrudinov I.R. Features of Temperature Dependence of Electrical Conductivity in Multicomponent Organic Spin Glasses // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2016. Vol.7. Issue 4. P. 453–457.

## References

1. 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 Natl. Acad. Sci. USA*, 2005, No. 102, pp. 8815.

2. Bracciale M., Sennato S., Marrocchi A. On Evaluating Organic Electronic Materials of Asphaltene Components. *Sixth International*

*Meeting on Molecular Electronics*, 03-07 December 2012, Grenoble, France, pp. 285.

3. Speight J.G. *Handbook of Petroleum Analysis*. JohnWiley & Sons, 2001. 480 p.

4. Sharma C.D., Bhagat S.D., Erhan S.Z. *Maltenes and Asphaltenes of Petroleum Vacuum Residues: Physico-Chemical Characterization*. *Petroleum Science and Technology*, 2007, No. 25, pp. 93-104.

5. Unger F.G., Andreeva L.N. *Fundamental'nye aspekty khimii nefti. Priroda smol i asfal'tenov* [Fundamental Aspects of Petroleum Chemistry. The Nature of Resins and Asphaltenes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995. 192 p. [in Russian].

6. 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.

7. Groenzin H., Mullins O.C. Molecular Size and Structure of Asphaltenes from Various Sources. *Energy Fuels*, 2000, Vol. 14, No 3, pp. 677.

8. Andrews A.B., Edwards J.C., Pomerantz A.E., Mullins O.C., Dennis Nordlund D.K. Comparison of Coal-Derived and Petroleum Asphaltenes by <sup>13</sup>C Nuclear Magnetic Resonance. DEPT, and XRS *Energy Fuels*, 2011, Vol. 25, No. 7, pp. 3068.

9. Mullins O.C., Sheu E.Y. *Structures and Dynamics of Asphaltenes*. Springer Science+Business Media, LLC, 1998. 293 p.

10. Mitra-Kirtley S., Mullins O.C., Van Elp J., George S.J., Chen J., Cramer S.P. Determination of the Nitrogen Chemical Structures in Petroleum Asphaltenes Using XANES Spectroscopy. *J. Am. Chem. Soc.*, 1993, Vol. 115, No. 1, pp. 252-258.

11. 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.

12. Varfolomeev D.F., Dolomatov M.Yu., Khairutdinov I.R., Unger F.G. K voprosu o donorno-aktseptornykh vzaimodeistviyakh pri rastvorenii asfal'tenov [To the Issue of Donor-acceptor Interactions in the Dissolution of Asphaltenes]. *Dostizheniya v issledovanii*

*vyssokomolekulyarnykh soedinenii nefiti* [Achievements in the Study of High Molecular Weight Oil Compounds]. Tomsk, 1985. pp. 11.

13. Dezortsev S.V., Dolomatov M.Yu., Shutkova S.A. Tekhnologiya polucheniya poluprovodnikovykh materialov na osnove neftyanykh asfal'tenov [The Technology of Obtaining Semiconductor Materials Based on Petroleum Asphaltenes]. *Khimicheskaya tekhnologiya — Chemical Technology*, 2012, Vol. 13, No. 2, pp. 88–92. [in Russian].

14. Dolomatov M.Yu., Dezortsev S.V., Shutkova S.A., Shulyakovskaya D.O. Asfal'tosmolistye veshchestva i produkty na ikh osnove kak vozmozhnye materialy dlya nanoelektroniki [Asphaltene-Pitch Substances and Wares on Their Base as Possible Materials for Nano-Electronics]. *Naukoemkie Tekhnologii — Science Intensive Technologies*, 2012, Vol. 13, No. 6, pp. 18–22. [in Russian].

15. 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.

16. Khairudinov I.R., Sultanov F.M., Telyashev E.G. *Sovremennye protsessy sol'ventnoi deasfal'tizatsii neftyanykh ostatkov* [Modern Processes of Solvent Deasphalting of Oil Residues]. Ufa, Izd-vo GUP INKhP RB. Seriya «Biblioteka neftepererabotchika», 2011. 208 p. [in Russian].

17. Dolomatov M.Yu., Shulyakovskaya D.O. Otsenka fiziko-khimicheskikh svoystv mnogokomponentnykh uglevodородnykh sistem po integral'nykh kharakteristikam elektronnykh spektrov pogloshcheniya [Determination of Physicochemical Properties of Multicomponent Hydrocarbon Systems Based on Integral Characteristics of Electronic Absorption Spectra]. *Khimiya i Tekhnologiya Topliv i Masel — Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2013, No. 2, pp. 49–52. [in Russian].

18. Dolomatov M.Yu., Shulyakovskaya D.O., Mukaeva G.R., Yarmukhametova G.U., Latypov K.F. Simple Characteristics Estimation Methods of Material and Molecule Electronic Structure. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2012, Vol. 2, No. 4, pp. 261–268.

19. Dolomatov M.Yu., Marushkin A.B., Gimaev R.N., Selivestrov M.M. Termodinamika formirovaniya nadmolekulyarnoi struktury asfal'tenov [Asphaltene Supramolecular Structure Formation Thermodynamics]. *Khimiya tverdogo topliva — Chemistry of Solid Fuel*, 1989, No. 6, pp. 83–86. [in Russian].

20. Petrov A.M., Dolomatov M.Yu., Bakh-tizin R.Z., Ryzhikov O.L., Khayrudinov I.R. Features of Temperature Dependence of Electrical Conductivity in Multicomponent Organic Spin Glasses. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2016, Vol. 7, Issue 4, pp. 453–457.

---

## ОБ АВТОРАХ

### **Аухадеев Авер Эрикович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехнические комплексы и системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Российская Федерация, e-mail: auhadeevkgma@rambler.ru

### **Ахметшин Роберт Султанович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника», Набережночелнинский институт (филиал) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Набережные Челны, 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

### **Галимова Акиля Анверовна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара, Российская Федерация, e-mail: akilya@mail.ru

### **Герасименко Алексей Алексеевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

### **Герасимов Вячеслав Евгеньевич**

ассистент кафедры «Электроэнергетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Российская Федерация, e-mail: gerasimov\_v\_e@mail.ru

### **Гильманшина Карина Айдаровна**

аспирант кафедры технологии нефти и газа, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

### **Грязнова Екатерина Дмитриевна**

магистрант, Костанайский государственный университет имени А. Байтурсынова, г. Костанай, Республика Казахстан

### **Даденков Дмитрий Александрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры микропроцессорных средств автоматизации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: dadenkov@mail.ru

### **Дмитриев Алексей Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт, строительные и дорожные машины», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Российская Федерация

---

**Доломатов Михаил Юрьевич**

доктор химических наук, профессор, профессор кафедры технологии нефти и газа, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», профессор кафедры физической электроники и нанофизики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», г. Уфа, Российская Федерация

**Дорофеев Андрей Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Вычислительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: dorbaik@istu.edu

**Дорофеев Роман Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Российская Федерация

**Иванов Александр Николаевич**

аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», г. Уфа, Российская Федерация

**Иванов Максим Дмитриевич**

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

**Казанцев Владимир Петрович**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Российская Федерация

**Калимгулов Айрат Ринатович**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: airatkr@gmail.com

**Кирпичникова Ирина Михайловна**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет», г. Челябинск, Российская Федерация

**Киснеева Ляйля Нургалиевна**

старший преподаватель кафедры «Электротехнические комплексы и системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Российская Федерация

**Кошкин Игорь Владимирович**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики и физики, Костанайский государственный университет имени А. Байтурсынова, г. Костанай, Республика Казахстан

---

**Кушнир Валентина Геннадьевна**

доктор технических наук, профессор, проректор Костанайского государственного университета имени А. Байтурсынова, г. Костанай, Республика Казахстан, e-mail: valkush@mail.ru

**Литвиненко Руслан Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехнические комплексы и системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Российская Федерация

**Малышева Надежда Николаевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижевартовский государственный университет», г. Нижневартовск, Российская Федерация

**Махсумов Илхом Бурхонович**

аспирант кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет», г. Челябинск, Российская Федерация, e-mail: messi.ilhom@gmail.com

**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

**Пичугин Павел Игоревич**

магистрант кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: PavelPichugin999@yandex.ru

**Поносова Людмила Викторовна**

магистрант кафедры микропроцессорных средств автоматизации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Российская Федерация

**Пузырев Евгений Владимирович**

кандидат технических наук, инженер II категории службы релейной защиты, автоматики и метрологии Саяно-Шушенской ГЭС, г. Саяногорск, Российская Федерация, e-mail: puzurev\_ev@mail.ru

**Решетняк Мария Юрьевна**

ассистент кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: reshetniak@inbox.ru

**Рыжиков Олег Леонидович**

кандидат технических наук, доцент кафедры физической электроники и нанофизики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», г. Уфа, 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, Российская Федерация, e-mail: samarov.ek@ut-mo.ru

**Сергеенкова Елизавета Васильевна**

старший научный сотрудник, ООО «НИИ Транснефть», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: esergeenkova@gmail.com

**Труднев Сергей Юрьевич**

кандидат технических наук, декан мореходного факультета, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Камчатский государственный технический университет», г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация, e-mail: trudnev@mail.ru

**Тухбатуллина Диана Ильшатовна**

студент кафедры «Электротехнические комплексы и системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Российская Федерация

**Хазиева Регина Тагировна**

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: khazievart@mail.ru

**Хакимов Эмиль Фаритович**

аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: hair99@inbox.ru

**Шабанов Виталий Алексеевич**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: ShabanovVA@yandex.ru

**Шарипов Талгат Ишмухамедович**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники и нанофизики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», г. Уфа, Российская Федерация

**Шуваева Алена Олеговна**

аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Камчатский государственный технический университет», г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация, e-mail: alena.kozyrkova@gmail.com

**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, e-mail: eshulaeva@mail.ru

**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

---

## ABOUT THE AUTHORS

### **Ahmetshin Robert S.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electricity and Electrical Engineering Department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Kazan Federal University», Naberezhnye Chelny Institute, Branch, Naberezhnye Chelny, Russian Federation

### **Auhadeev Aver E.**

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Electrotechnical Complexes and Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power Engineering University», Kazan, Russian Federation, e-mail: auhadeevkgma@rambler.ru

### **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

### **Dadenkov Dmitry A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Microprocessor Automation Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Perm National Research Polytechnic University», Perm, Russian Federation, e-mail: dadenkov@mail.ru

### **Dmitriev Alexey A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Road Transport, Construction and Road Machines Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tyumen Industrial University», Tyumen, Russian Federation

### **Dolomatov Mikhail Yu.**

Dr. Sci. Chem., Professor, Professor of Oil and Gas Technology 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

### **Dorofeev Andrey S.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor, Head of Computer Engineering Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Irkutsk National Research Technical University», Irkutsk, Russian Federation, e-mail: dorbaik@istu.edu

### **Dorofeev Roman S.**

Cand. Sci. Tech., Associate Professor of Computer Engineering Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Irkutsk National Research Technical University», Irkutsk, Russian Federation

### **Galimova Akilya A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Theoretical and General Electrical Engineering Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Samara State Technical University», Samara, Russian Federation, e-mail: akilya@mail.ru

### **Gerasimenko Alexey A.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Professor of Electric Power Generation Stations and Power Systems Department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Siberian Federal University», Krasnoyarsk, Russian Federation

### **Gerasimov Vyacheslav E.**

Assistant of Electricity Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tyumen Industrial University», Tyumen, Russian Federation, e-mail: gerasimov\_v\_e@mail.ru

---

**Gilmanshina Karina A.**

Postgraduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

**Gryaznova Ekaterina D.**

Undergraduate Student, Kostanay State University Named after A. Baitursynov, Kostanay, Republic of Kazakhstan

**Khazieva Regina T.**

Cand. Sci. Tech., Senior Lecturer 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, e-mail: khazievart@mail.ru

**Ivanov Aleksandr N.**

Postgraduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», Ufa, Russian Federation

**Ivanov Maxim D.**

Student 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

**Kalimgulov Ayrat R.**

Cand. Sci. Phys.-Math., Assistant 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, e-mail: airatkr@gmail.com

**Kazantsev Vladimir P.**

Dr. Sci. Tech., Associate Professor, Professor of Microprocessor Automation Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Perm National Research Polytechnic University», Perm, Russian Federation

**Khakimov Emil F.**

Postgraduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», Ufa, Russian Federation, e-mail: hair99@inbox.ru

**Kirpichnikova Irina M.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Electric Power Generation Stations, Networks and Supply Systems Department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «South Ural State University», Chelyabinsk, Russian Federation

**Kisneeva Lyaila N.**

Senior Lecturer of Electrotechnical Complexes and Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power Engineering University», Kazan, Russian Federation

**Koshkin Igor V.**

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Head of Electric Power and Physics Department, Kostanay State University named after A. Baitursynov, Kostanay, Republic of Kazakhstan

**Kushnir Valentina G.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Vice-Rector, Kostanay State University Named after A. Baitursynov, Kostanay, Republic of Kazakhstan, e-mail: valkush@mail.ru

**Litvinenko Ruslan S.**

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Electrotechnical Complexes and Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power Engineering University», Kazan, Russian Federation

---

**Makhsumov Ilhom B.**

Postgraduate Student of Electric Power Generation Stations, Networks and Supply Systems Department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «South Ural State University», Chelyabinsk, Russian Federation, e-mail: messi.ilhom@gmail.com

**Malysheva Nadezhda N.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Power Engineering Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Nizhnevartovsk State University», Nizhnevartovsk, Russian Federation

**Mashtanov Nikolay M.**

Student of Automated Process and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

**Pichugin Pavel I.**

Undergraduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation, e-mail: PavelPichugin999@yandex.ru

**Ponosova Lyudmila V.**

Undergraduate Student of Microprocessor Automation Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Perm National Research Polytechnic University», Perm, Russian Federation

**Puzyrev Evgeny V.**

Cand. Sci. Tech., Engineer, Relay Protection Service, Automation and Metrology Sayano-Shushenskaya Hydroelectric Power Station, Sayanogorsk, Russian Federation, e-mail: puzyrev\_ev@mail.ru

**Reshetnyak Maria Yu.**

Assistant, Energy and Energy Efficiency of Mining Industry Department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National Research Technological University «MISIS», Moscow, Russian Federation, e-mail: reshetniak@inbox.ru

**Ryzhikov Oleg L.**

Cand. Sci. Phys.-Math., Assistant Professor of Physical Electronics and Nanophysics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», Ufa, Russian Federation

**Samarov Evgeny K.**

Cand. Sci. Tech., Dean of Information and Communication Systems and Technologies Faculty, State Budgetary Educational Institution of Higher Education of Moscow Region «University of Technology», Korolev, Russian Federation, e-mail: samarov.ek@ut-mo.ru

**Sergeenkova Elizaveta V.**

Senior Researcher, LLC «Research Institute Transneft», Moscow, Russian Federation, e-mail: esergeenkova@gmail.com

**Shabanov Vitaliy A.**

Cand. Sci. Tech., Associated Professor, Head 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, e-mail: ShabanovVA@yandex.ru

---

**Sharipov Talgat I.**

Cand. Sci. Phys.-Math., Associate Professor of Physical Electronics and Nanophysics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», Ufa, Russian Federation

**Shulaeva Ekaterina A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Automated Process and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation, e-mail: eshulaeva@mail.ru

**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.**

Postgraduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kamchatka State Technical University», Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation, e-mail: alena.kozyrkova@gmail.com

**Trudnev Sergey Yu.**

Cand. Sci. Tech., Dean of the Marine Faculty, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kamchatka State Technical University», Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation, e-mail: trudnev@mail.ru

**Tukhbatullina Diana I.**

Student of Electrotechnical Complexes and Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power Engineering University», Kazan, Russian Federation

## СПИСОК СТАТЕЙ, ИЗДАННЫХ В 2019 ГОДУ

- Абдрахманов В.Х., Важдаев К.В., Салихов Р.Б.* Исследование возможности реализации технологии точного позиционирования, № 3, с. 118.
- Андреева Е.Г., Семина И.А.* 3D-моделирование электротехнических устройств с гибридной магнитной системой, № 1, с. 5.
- Артюшенко В.М., Воловач В.И.* Оценка точности измерения векторного информационного параметра сигнала при воздействии мультипликативных негауссовских помех, № 2, с. 122.
- Аухадеев А.Э., Литвиненко Р.С., Киснеева Л.Н., Тухбатуллина Д.И.* К вопросу о развитии теории тягового электрооборудования городского электрического транспорта, № 4, с. 12.
- Ахмеджанов Ф.М., Крымский В.Г.* Алгоритм оценки надежности человека-оператора на основе модифицированной методики HEART, № 1, с. 60.
- Ахметшин Р.С., Пичугин П.И.* Влияние взаимоиндукции в некоторых вопросах работы и эксплуатации электрооборудования и электрических сетей, № 4, с. 48.
- Ахунова Д.А., Султанов А.Х., Мешков И.К., Грахова Е.П.* Повышения эффективности функционирования сверхширокополосных систем связи на основе технологии ортогонального частотного мультиплексирования, № 2, с. 84.
- Варганова А.В., Панова Е.А., Кушмилёв О.Е., Хатюшина Т.В., Анисимова Н.А.* Алгоритм автоматизированного выбора и расстановки контрольно-измерительных приборов в цепях оборудования распределительных устройств высокого напряжения в САПР «ОРУ САД», № 3, с. 111.
- Васильев Б.Ю., Ле Ван Тунг.* Косвенные системы модуляции матричных преобразователей частоты, № 2, с. 26.
- Галимова А.А.* Методика расчета относительного срока службы трансформатора в распределительных сетях на этапе проектирования, № 4, с. 56.
- Герасименко А.А., Пузырев Е.В.* Программная реализация детерминированной и статистической методики расчёта потерь электроэнергии и учёта множества режимов электрической сети, № 4, с. 68.
- Герасимов В.Е., Дмитриев А.А., Малышева Н.Н.* Разработка концепции энергоэффективного управления системами промышленного электрообогрева нефтегазовых промыслов, № 4, с. 39.
- Грахов П.А., Федин А.В.* Устройства угловых перемещений на основе магнитострикционных пластин, № 1, с. 112.
- Дашевский В.П., Будков В.Ю.* Спектроскопия задержек в системах реального времени, № 3, с. 92.
- Дмитриев А.А., Герасимов В.Е.* Анализ возможностей и перспектив применения системы технологического видеонаблюдения на объектах электросетевого комплекса, № 3, с. 70.
- Дмитриев А.А., Герасимов В.Е., Плосков А.Н.* Применение современных программных возможностей в процессе проектирования систем электроснабжения, № 1, с. 20.
- Доланчи С.М., Денисова О.А.* Автоматизированный информационно-измерительный комплекс для получения силоксановой поверхности полусферических резонаторов, № 2, с. 113.
- Доломатов М.Ю., Шуткова С.А., Бахтизин Р.З., Шарипов Т.И., Рыжиков О.Л., Гильманшина К.А.* Исследование донорно-акцепторных свойств аморфных полупроводников на основе нанокластеров нефтяных асфальтенов, № 4, с. 121.
- Дорофеев Р.С., Дорофеев А.С.* Применение авторской системы поддержки принятия решений «квалиметрическая экспертиза» для оценки биологических объектов, № 4, с. 99.
- Еникеева А.Р., Шарипов Б.А., Федосеева Е.А.* Применение нетрадиционных источников энергии для покрытия нагрузки на подогрев резервуаров, № 3, с. 30.
- Ершов М.С., Липин Д.И.* Исследование системы повышенной надежности электропитания на базе четырехобмоточного трансформатора, № 3, с. 15.
- Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Уразбахтин Р.Р., Веселов А.М., Минияров А.Х.* Синхронный сферический электродвигатель, № 1, с. 13.

- Казанцев В.П., Даденков Д.А., Поносова Л.В. Следящая система управления электроприводами сеточной части бумагоделательной машины, № 4, с. 91.
- Карагодин В.В., Горин В.А., Рыжый Н.В. Повышение эффективности управления возбуждением бесщеточного синхронного генератора в автономных системах электроснабжения, № 3, с. 5.
- Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б. Исследование температуры поверхности солнечных модулей с использованием голографической защиты от перегрева, № 4, с. 19.
- Коледин С.Н., Коледина К.Ф., Губайдуллин И.М., Муллаянова А.Ф., Габитов С.А. Информационная система последовательного анализа каталитических реакций математическими методами, № 1, с. 79.
- Копытов С.М., Ульянов А.В. Контроллер для управления светодиодными осветительными сетями по линии электроснабжения, № 1, с. 52.
- Кротенко Д.С., Тимошук В.Н., Белов О.А. Моделирование оптимальных режимов работы электростанции с различными генераторами, № 3, с. 36.
- Крымский В.Г. Модели роста надежности программного обеспечения: новые подходы к построению и пути совершенствования, № 3, с. 61.
- Кубрин С.С., Решетняк С.Н., Бондаренко А.М. Математическое моделирование параметров удельных норм электропотребления выемочных участков угольных шахт, № 2, с. 50.
- Кушнир В.Г., Кошкин И.В., Грязнова Е.Д. Моделирование режимов электрической сети с учетом влияния переходного сопротивления на точность определения места повреждения в сетях напряжением 6-35 кВ, № 4, с. 5.
- Латыпов И.С. Моделирование и исследование неизолированных проводов для электротехнических комплексов потребителей нефтегазовой отрасли в программной системе конечно-элементного анализа, № 3, с. 45.
- Линенко А.В., Сираев Ш.Ф., Азнагулов А.И., Лукьянов В.В. Мехатронная система для автоматического управления машинно-тракторным агрегатом с бесколлекторным электродвигателем, № 1, с. 33.
- Лихачев Е.А., Зайцева А.А. Математическая модель САУ частоты вращения несущего винта вертолета, № 1, с. 100.
- Лихачев Е.А., Зайцева А.А., Клименко О.В. Методика моделирования отказов САУ вертолета Ка-226, № 2, с. 70.
- Мисбахов Р.Ш., Васёв А.Н., Сахабутдинов А.Ж., Нуреев И.И., Морозов О.Г., Липатников К.А. Адресный волоконно-оптический датчик акустического обнаружения частичного разряда в комплектных распределительных устройствах, № 3, с. 101.
- Мурлин А.Г., Мурлина В.А., Янаева М.В., Кривоногов С.В. Многокритериальная оптимизация логистических маршрутов сбора и вывоза твёрдых бытовых отходов, № 2, с. 92.
- Муфтахов Т.И., Гиниятуллин В.М. Симуляция входных данных нейронной сети на примере заболеваемости вирусным гепатитом, № 1, с. 70.
- Мухамадиев А.А., Шайхутдинов И.И., Ясовеев В.Х. Анализ приборной базы для проведения исследований флюидов, № 1, с. 122.
- Осипов В.П., Посадский А.И., Сивакова Т.В., Судаков В.А. Комбинированная методика нечеткого ранжирования альтернатив на основе функций предпочтений, № 1, с. 87.
- Пентегов И.В., Рымар С.В., Губатюк Р.С. Применение модернизированного метода тепловых источников Фурье в случае поперечного полосового поверхностного нагрева и охлаждения трубы, № 2, с. 5.
- Попов А.А., Овсянкин А.К., Юринский Ю.А. Проектирование экспертной системы в виде мобильного приложения для диагностирования неисправностей в работе вычислительной техники, № 2, с. 57.
- Поспелов А.С., Дмитриев А.А. Повышение энергоэффективности системы электроснабжения загородного дома или коттеджа, № 2, с. 34.
- Решетняк М.Ю. Исследование гармонического состава в электрических сетях поверхностного комплекса высокопроизводительных угольных шахт, № 4, с. 61.

- Самаров Е.К.* Синтез алгоритма оптимальной линейной модуляции шума в цифровой обработке изображений, № 2, с. 77.
- Самаров Е.К.* Сравнительный анализ алгоритмов сжатия изображений, № 4, с. 144.
- Саттаров Р.Р., Зиганшин Т.Р.* Анализ режима холостого хода в экранированном торцевом синхронном генераторе с высококоэрцитивными постоянными магнитами, № 1, с. 41.
- Саттаров Р.Р., Стыскин А.В., Уразбахтина Н.Г.* Исследование электромагнитных процессов рекуперации энергии в устройствах для форсировки переходных процессов в индуктивных многофазных нагрузках, № 3, с. 23.
- Сироткин С.Л., Коньков А.Н.* Автоматическое переключение диапазонов при измерении средней частоты импульсов, № 2, с. 131.
- Спиридонов О.Б., Кумова Д.М., Луночкина И.М., Сироткин С.Л.* Пульт управления со средствами визуализации и навигационным приемником, № 3, с. 85.
- Табет Наиф Кайед Абдулла, Фетисов В.С.* Термодинамический способ определения толщины отложений парафина на внутренней поверхности нефтепровода, № 2, с. 105.
- Татевосян А.А.* Исследование влияния конструктивных параметров тихоходных синхронных генераторов с постоянными магнитами в составе электротехнических комплексов на их энергетические характеристики, № 2, с. 15.
- Тимофеев А.О., Ясовеев В.Х.* Беспроводной бесконтактный датчик положения штока скважинной штанговой глубиннонасосной установки, № 1, с. 94.
- Хазиева Р.Т., Иванов М.Д.* Математическая модель колебательной механической системы, № 4, с. 74.
- Хазиева Р.Т., Купцов Д.В.* Анализ динамики патентования устройств заряда емкостных накопителей, № 3, с. 41.
- Шабанов В.А., Пашкин В.В., Ивашкин О.Н.* Способ подхвата электропривода вентиляционных и насосных установок при обратном вращении рабочего колеса, № 1, с. 26
- Шабанов В.А., Путинцева А.А., Резник Е.С., Васильев П.И.* Согласование токовой отсечки электродвигателей с защитой минимального напряжения и максимальной токовой защитой вводного выключателя, № 2, с. 41.
- Шабанов В.А., Хакимов Э.Ф., Калимгулов А.Р., Сергеенкова Е.В.* Исследование зависимости КПД электродвигателя и преобразователя частоты от коэффициента загрузки и частоты вращения, № 4, с. 83.
- Шабанов Э.В., Гиниятуллин В.М.* Дифференциальная гиперболическая трилатерация, № 2, с. 63.
- Шаринов М.И.* Система управления для повышения показателей добычи нефти на нефтяном месторождении с помощью использования искусственного интеллекта, № 3, с. 77.
- Шафигов И.Н.* Регулируемый привод скважинного электроцентробежного насоса на основе высоковольтного многоуровневого преобразователя частоты, № 3, с. 53.
- Шуваева А.О., Труднев С.Ю.* Моделирование источника автономной катодной защиты, № 4, с. 30.
- Шулаева Е.А., Маштанов Н.М., Иванов А.Н.* Моделирование ртутного электролизера для получения каустической соды с применением нейронной сети, № 4, с. 107.
- Ярославкина Е.Е., Мельникова Д.А., Муратова В.В.* Автоматизированный стенд приемо-сдаточных испытаний погружных электродвигателей, № 1, с. 106.

## LIST OF ARTICLES PUBLISHED IN 2019

- Abdrakhmanov V.K., Vazhdaev K.V., Salikhov R.B.* Research of possibility of precision positioning technology implementation, № 3, p. 118.
- Ahmetshin R.S., Pichugin P.I.* Mutual induction influence on specific terms of electrical equipment and electrical circuits use and operation, № 4, p. 48.
- Akhmedzhanov F.M., Krymsky V.G.* Algorithm for assessment of human operator reliability based on modified HEART methodology, № 1, p. 60.
- Akhunova D.A., Sultanov A.Kh., Meshkov I.K., Grakhova E.P.* Improving the efficiency of functioning of ultra-wide-band communication systems based on technology of orthogonal frequency multiplexing, № 2, p. 84.
- Andreeva E.G., Semina I.A.* 3D-modeling of electrotechnical devices with a hybrid magnetic system, № 1, p. 5.
- Artyushenko V.M., Volovach V.I.* Estimation of measurement accuracy of the vector information signal parameter under influence multiplicative non-gaussian noise, № 2, p. 122.
- Auhadeev A.E., Litvinenko R.S., Kisneeva L.N., Tukhbatullina D.I.* About theory of traction electric equipment of urban electric transport, № 4, p. 12.
- Dashevsky V.P., Budkov V.Yu.* Delay spectroscopy in real-time systems, № 3, p. 92.
- Dmitriev A.A., Gerasimov V.E.* Analysis of opportunities and prospects for application of the system of technological video surveillance at the objects of the power grid complex № 3, p. 70.
- Dmitriev A.A., Gerasimov V.E., Ploskov A.N.* Application of modern software capabilities in the design of power supply systems, № 1, p. 20.
- Dolapchi S.M., Denisova O.A.* Automated information-measuring complex for obtaining a siloxane surface of a semispherical resonators, № 2, p. 113.
- Dolomatov M.Yu., Shutkova S.A., Bakhtizin R.Z., Sharipov T.I., Ryzhikov O.L., Gilmanshina K.A.* Research of amorphous semiconductors donor and acceptor properties on oil asphaltene nanoclusters basis, № 4, p. 121.
- Dorofeev R.S., Dorofeev A.S.* Application of the author's decision support system «qualimetric expertise» for the assessment of biological objects, № 4, p. 99.
- Enikeeva A.R., Sharipov B.A., Fedoseeva E.A.* Non-traditional renewable energy sources use for tank heating, № 3, p. 30.
- Ershov M.S., Lapin D.I.* Research of power system of higher reliability based on the four-winding transformer, № 3, p. 15.
- Galimova A.A.* Calculation method of transformer relative service life in distribution networks at the design stage, № 4, p. 56.
- Gerasimenko A.A., Puzyrev E.V.* Software implementation of deterministic and statistical methods for calculating power losses and accounting for multiple modes of electric network, № 4, p. 68.
- Gerasimov V.E., Dmitriev A.A., Malysheva N.N.* Concept development of energy-efficient management of industrial electric heating systems for oil and gas fields, № 4, p. 39.
- Grakhov P.A., Fedin A.V.* The devices of angular displacements based on magnetostrictive plates, № 1, p. 112.
- Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Urazbaktin R.R., Veselov A.M., Miniyarov A.Kh.* Synchronous spherical electric motor, № 1, p. 13.
- Karagodin V.V., Gorin V.A., Ryzhiy N.V.* Increasing efficiency of control of excitation of brushless synchronous generator in autonomous power supply systems, № 3, p. 5.
- Kazantsev V.P., Dadenkov D.A., Ponosova L.V.* Electric servo drive system of paper machine, № 4, p. 91.
- Khazieva R.T., Kupcov D.V.* Analysis of patenting of inductive-capacitive transducers for current stabilization systems, № 3, p. 41.
- Khazieva R.T., Ivanov M.D.* Simplified mathematical model of the oscillating mechanical system, № 4, p. 74.

- Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B.* Investigation of surface temperature of solar modules using holographic overheating protection, № 4, p. 19.
- Koledin S.N., Koledina K.F., Gubaidullin I.M., Mullayanova A.F., Gabitov S.A.* Information system of consistent analysis of catalytic reactions by mathematical methods, № 1, p. 79.
- Kopytov S.M., Ulyanov A.V.* Controller for control of led lighting networks on electric power supply line, № 1, p. 52.
- Krotenko D.S., Tymoschuk V.N., Belov O.A.* Modeling optimal operation modes of the electric power station with different generators, № 3, p. 36.
- Krymsky V.G.* Software reliability growth models: new approaches to creation and ways of enhancement, № 3, p. 61.
- Kubrin S.S., Reshetnyak S.N., Bondarenko A.M.* Mathematical modeling of specific energy consumption norms of coal extraction sections of coalmines, № 2, p. 50.
- Kushnir V.G., Koshkin I.V., Gryaznova E.D.* Modeling of electric network modes taking into account the influence of transient resistance on the accuracy of determining the fault location in 6-35 kV networks, № 4, p. 5.
- Latypov I.S.* Modeling and research of uninsulated wire for electrical complexes of consumers in the oil and gas industry in a finite element analysis software system, № 3, p. 45.
- Likhachev E.A., Zaitseva A.A.* A mathematical model of the acs frequency of rotation of the rotor of the helicopter, № 1, p. 100.
- Likhachev E.A., Zaytseva A.A., Klimenko O.V.* Ka-226 helicopter self-propelled gun failure modeling technique, № 2, p. 70.
- Linenko A.V., Siraev Sh.F., Aznagulov A.I., Lukyanov V.V.* Mechatronic system for automatic control of a machine-tractor unit with a screw-free electric motor, № 1, p. 33.
- Misbakhov R.Sh., Vasev A.N., Sakhabutdinov A.Zh., Nureev I.I., Morozov O.G., Lipatnikov K.A.* Address fiber optical sensor for acoustic detection of a partial discharge in a switchgear, № 3, p. 101.
- Muftakhov T.I., Giniyatullin V.M.* Simulation input data of neural network on the example of the incidence of viral hepatitis, № 1, p. 70.
- Mukhamadiev A.A., Shaikhutdinov I.I., Yasoveev V.Kh.* Analysis of the instrumentation base for the study of fluids, № 1, p. 122.
- Murlin A.G., Murlina V.A., Yanayeva M.V., Krivonogov S.V.* Multicriteria optimization of logistic routes of collecting and export of municipal solid waste, № 2, p. 92.
- Osipov V.P., Posadsky A.I., Sivakova T.V., Sudakov V.A.* Combined method of fuzzy range alternatives based on preference functions, № 1, p. 87.
- Pentegov I.V., Rymar S.V., Gubatyuk R.S.* Application of the modernized method of Fourier heat sources in the case of transverse strip surface heating and pipe cooling, № 2, p. 5.
- Popov A.A., Ovsyankin A.K., Yurinski Yu.A.* Designing the experts system as a mobile application for diagnostic troubleshooting in computing technology, № 2, p. 57.
- Pospelov A.S., Dmitriev A.A.* Improving the energy efficiency of the power supply system of a country house or cottage, № 2, p. 34.
- Reshetnyak M.Yu.* Harmonic composition study in electrical networks of surface complex of high-performance coal mine, № 4, p. 61.
- Samarov E.K.* Comparative analysis of image compression algorithms, № 4, p. 114.
- Samarov E.K.* Synthesis of the algorithm for optimal linear noise modulation in digital image processing, № 2, p. 77.
- Sattarov R.R., Styskin A.V., Urazbakhtina N.G.* Study of electromagnetic processes of energy recovery in devices for forming transient processes in inducted multi-phase loads, № 3, p. 23.
- Sattarov R.R., Ziganshin T.R.* Analysis of the no-loadsteady mode in a shielded face synchronous generator with high-coercive permanent magnets, № 1, p. 41.
- Shabanov E.V., Giniyatullin V.M.* Differential hyperbolic trilateral, № 2, p. 63.

- 
- Shabanov V.A., Pashkin V.V., Ivashkin O.N.* Method of pick up of electric drives fans and pumps units with backspin impeller, № 1, p. 26.
- Shabanov V.A., Khakimov E.F., Kalimgulov A.R., Sergeenkova E.V.* Research of dependence of electric motor efficiency and frequency converter on loading rate and rotation frequency, № 4, p. 83.
- Shabanov V.A., Putintseva A.A., Reznik E.S., Vasilyev P.I.* Coordination of electric motor cutoff with under-voltage protection and main circuit breaker's over current protection, № 2, p. 41.
- Shafikov I.N.* Electric submersible pump adjustable drive based on high-voltage multilevel frequency converter, № 3, p. 53.
- Sharipov M.I.* Control system for increasing oil production rate at an oil field with the use of artificial intelligence, № 3, p. 77.
- Shulaeva E.A., Mashtanov N.M., Ivanov A.N.* Modeling of the mercury electrolytic cell to obtain caustic soda using a neural network, № 4, p. 107.
- Shuvaeva A.O., Trudnev S.Yu.* Simulation of a source of autonomous cathodic protection, № 4, p. 30.
- Sirotkin S.L., Konkov A.N.* Automatic rang switching when measuring the average frequency of the pulses, № 2, p. 131.
- Spiridonov O.B., Kumova D.M., Lunochkina I.M., Sirotkin S.L.* Control panel with visualization devices and navigation receiver, № 3, p. 85.
- Tatevosyan A.A.* Investigation of the effect of constructive parameters of synchronous generators with permanent magnets as a part of electrical complexes on their energy characteristics, № 2, p. 15.
- Thabet Nayef Kayed Abdulla, Fetisov V.S.* Thermodynamic method of determination of thickness of paraffin sediments on oil pipeline inner surface, № 2, p. 105.
- Timofeev A.O., Yasoveev V.Kh.* Wireless contactless sensor stock palaces well rod deep-pump installation, № 1, p. 94.
- Varganova A.V., Panova E.A., Kushmil O.E., Hatyushina T.V., Anisimova N.A.* Algorithm for automated selection and installation of control and measuring instruments in chains of high voltage distribution devices in ORU CAD, № 3, p. 111.
- Vasiliev B.Yu., Le Van Tung.* Indirect modulation systems of matrix frequency converters, № 2, p. 26.
- Yaroslavkina E.E., Melnikova D.A., Muratova V.V.* Stand of receiving-continuous tests of submersible electric motors, № 1, p. 106.

## 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.**