

Подписной индекс: 91824 в каталоге «Пресса России»

Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 4 , т. 16, 2020

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

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

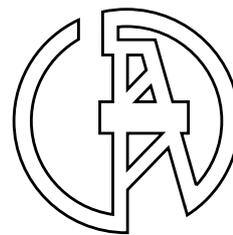


Electrical and data processing facilities and systems

№ 4 , т. 16, 2020



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УГНТУ

№ 4, т. 16, 2020

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

Учредитель

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

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

Международный стандартный сериальный номер ISSN 1999-5458.

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

М.И. Хакимьянов — д-р техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»
(г. Уфа, Российская Федерация)

Члены редакционной коллегии:

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



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



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



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



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



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



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



Зам. главного редактора:

Р.Т. Хазиева — канд. техн. наук ФГБОУ ВО
«Уфимский государственный нефтяной
технический университет»
(г. Уфа, Российская Федерация)

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



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



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



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



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



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



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



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



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



Ответственный секретарь: А. Г. Саенко

Технический редактор: К. А. Сазонова

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Доступ и подписка на электронную версию журнала — на сайте www.ugnet.ru

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

© Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2021.

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

Тел.: (347) 243-16-19, ies.rusoil.net

Цена свободная. 12+

Подписано в печать 26.03.2021 г. Формат 60×84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12.32

Тираж 1 000 экз. Заказ № 64.

Адрес типографии: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

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

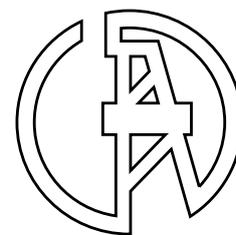
Материалы приводятся в авторской редакции.

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

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE PETROLEUM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY



USPTU

№ 4, v. 16, 2020

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., Associate Professor of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)

Deputy editor-in-chief:

R.T. Khazieva — Cand. Sci. Tech. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)

Members of an editorial board:

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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



Assistant editor: A. G. Saenko

Technical editor: K. A. Sazonova

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

Access and subscription to the electronic version of the journal is available on the website www.ugues.ru.

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

© Ufa State Petroleum Technological University, 2021.

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

Tel. (347) 243–16–19, ies.rusoil.net

Price is free. 12+

Publishing authorized on 26.03.2021 Paper format 60×84/8. Offset printing. 12.32 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 64.

Address of Publishing Office: 450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Китабов А.Н., Абуталипов У.М., Шарипов А.И., Хакимьянов М.И.</i> Оценка погрешности определения потребления электроэнергии при эксплуатации штанговой скважинной насосной установки	5
<i>Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Латыпов Б.Ф.</i> Математическое моделирование режимов работы резонансного инвертора	18
<i>Комиссаров Д.Р., Бордюг А.С.</i> Применение никель-цинковых батарей в аварийной электроэнергетической системе пассажирского судна	28
<i>Роот Д.И., Рогожников А.О., Толстова Л.А.</i> Совершенствование судового энергетического комплекса путем модернизации его элементов	37
<i>Хазиева Р.Т., Мухаметшин А.В., Горшенин А.И.</i> Исследование и разработка схемы измерения переменного тока при испытании изоляции	46

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Куручкин Л.М., Чернышев А.С., Куручкин М.А., Чуватов М.В., Жиленков А.А.</i> Оценка согласованности дискретного и сплошноредного подходов в рамках гибридной модели на примере транспортной сети региона	56
<i>Мартынов О.В., Карпенков А.С.</i> Определение скорости подвижного объекта на основе динамического отслеживания участков дорожного покрытия по данным видеопотока	68
<i>Муравьева Е.А., Григорьева Т.В., Валитов Д.Р.</i> Разработка интеллектуального комплекса для адаптивного управления параметрами микроклимата при хранении муки	79
<i>Бордюг А.С.</i> Применение элементов судовой автоматики при моделировании пожаров в машинном отделении	87
Об авторах	93
Список статей, изданных в 2020 году	100

CONTENT

ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Kitabov A.N., Abutalipov U.M., Sharipov A.I., Khakimyanov M.I.</i> Estimation of error in determining electric power consumption during the operation of rod pumping unit	5
<i>Khazieva R.T., Kirillov R.V., Latypov B.F.</i> Mathematical simulation of operating modes of a resonant inverter	18
<i>Komissarov D.R., Bordyug A.S.</i> Application of nickel-zinc batteries in the emergency power system of passenger ship	28
<i>Root D.I., Rogozhnikov A.O., Tolstova L.A.</i> Modernization of ship power complex by its elements modification	37
<i>Khazieva R.T., Muhametshin A.V., Gorshenin A.I.</i> Research and development of the accurate measurement scheme for insulation tests	46

DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Kurochkin L.M., Chernyshev A.S., Kurochkin M.A., Kuvatov M.V., Zhilenkov A.A.</i> Assessment of the consistency of discrete and continuous-medium approaches in the hybrid model on the example of the regional transport network	56
<i>Martynov O.V., Karpenkov A.S.</i> Calculation of velocity of a vehicle based on dynamic tracking of road pavements using video stream data	68
<i>Muraveva E.A., Grigoreva T.V., Valitov D.R.</i> Development of intellectual complex for adaptive management of microclimate parameters of flour storage processes	79
<i>Bordyug A.S.</i> Application of elements of marine automation in simulation of fire in the engine room	87
About the authors	93
List of articles, published in 2020	100



Китабов А. Н.
Kitabov A. N.

кандидат технических наук,
главный специалист отдела новых
технологий добычи нефти и газа,
ООО «РН-БашНИПИнефть»,
г. Уфа, Российская Федерация



Абуталипов У. М.
Abutalipov U. M.

кандидат технических наук,
начальник отдела новых технологий
добычи нефти и газа,
ООО «РН-БашНИПИнефть»,
г. Уфа, Российская Федерация



Шарипов А. И.
Sharipov A. I.

специалист отдела новых
технологий добычи нефти и газа,
ООО «РН-БашНИПИнефть»,
г. Уфа, Российская Федерация



Хакимьянов М. И.
Khakimyanov M. I.

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

УДК 621.311

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-4-5-17

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ШТАНГОВОЙ СКВАЖИННОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

Практически все крупные нефтедобывающие предприятия разработали свои методики для определения затрат электроэнергии установками для добычи нефти. Однако в большинстве случаев результаты расчетов сильно расходятся с реальным энергопотреблением установок. Большие значения ошибок обусловлены погрешностями измерений параметров, используемых при расчетах. На основе принципа действия штанговой скважинной насосной установки с приводом от станка-качалки представлена структурная схема передачи энергии, в которой отражены все ключевые узлы и элементы, являющиеся потребителями электроэнергии. В статье приводится обзор некоторых обобщенных методик расчета энергопотребления штанговыми скважинными насосными установками, а также основные выражения для поэлементного расчета энергопотребления установкой, который предпочти-

тельное с точки зрения точности при расчете единичных скважин. Также в статье приводится перечень измеряемых параметров, участвующих в оценке энергопотребления и являющихся основными источниками погрешности при расчетах. На основе параметров, влияющих на точность расчета энергопотребления, проведена оценка величины погрешности расчета полезной мощности и общего потребления электроэнергии установкой с учетом частных погрешностей их составляющих. Приведен сравнительный анализ результатов расчета погрешности для группы скважин с различными технологическими и геологическими параметрами. Показано, что минимальная относительная погрешность определения общего энергопотребления штанговой скважинной насосной установкой может достигать 20 %, даже при использовании поэлементного расчета потребления электроэнергии в каждом узле установки.

Ключевые слова: скважинный насос, электропривод, удельное энергопотребление, полезная мощность, потребляемая мощность, дисбаланс, погрешность, класс точности, потребление мощности.

ESTIMATION OF ERROR IN DETERMINING ELECTRIC POWER CONSUMPTION DURING THE OPERATION OF ROD PUMPING UNIT

Almost all large oil producing enterprises have developed their own methods for determining the cost of electricity for oil production installations. However, in most cases, the calculation results strongly differ from the real energy consumption of the installations. Large values of errors are due to the measurement errors used in the calculations, the initial data. Based on the principle of operation of a sucker rod pumping unit driven by a pumping unit, a structural diagram of energy transfer is presented, which reflects all key nodes and elements that are consumers of electricity. The article provides an overview of some generalized methods for calculating the energy consumption of sucker rod pumping units, as well as the basic expressions for the element-wise calculation of the energy consumption of the installation, which is more preferable in terms of accuracy when calculating single wells. Also the article contains a list of measured parameters that participate in the assessment of energy consumption and are the main sources of error in the calculations. On the basis of the parameters affecting the accuracy of calculating energy consumption, an estimate was made of the error in calculating the useful power and the total consumption of electricity by the installation, taking into account the partial errors of their components. A comparative analysis of the results of calculating the error for a group of wells with different technological and geological parameters is presented. It is shown that the minimum relative error in determining the total energy consumption of a sucker rod pumping unit can reach 20 %, even when using the element-wise calculation of electricity consumption in each unit of the unit.

Key words: borehole pump, electric drive, specific energy consumption, useful power, power consumption, imbalance, error, accuracy class, power consumption.

Введение

В связи с постоянно изменяющимися в широких пределах ценами на нефть в настоящее время для нефтедобывающих организаций стали особенно актуальными задачи оптимизации как капитальных, так и операционных затрат на добычу нефти. Существенный вклад в себестоимость процесса добычи углеводородного сырья вносят затраты на энергопотребление нефтедобывающими установками, поэтому вопросы прогнозирования и оптимизации удельного энер-

гопотребления становятся особенно актуальными [1].

Структура запасов России все больше смещается в сторону трудноизвлекаемых, для которых характерно наличие одновременно нескольких осложняющих факторов: образование солеотложений, механические примеси, образование высоковязких эмульсий, образование парафиновых отложений и т.д. Эксплуатация таких скважин связана с повышенными значениями энергопотребления на единицу добытой продукции, поскольку

помимо непосредственно насосной установки для поддержания процесса добычи необходимо и вспомогательное оборудование (системы подогрева скважинной продукции, системы дозирования реагентов и т.д.) [2].

С целью прогнозирования интегрального уровня энергопотребления при добыче нефти, а также для организации планирования различных оптимизационных мероприятий многие нефтяные компании стали разрабатывать методики оценки или расчета энергопотребления нефтедобывающего оборудования по различным способам добычи нефти [3, 4].

Среди массово распространенных методов добычи нефти наибольшую сложность при оценке уровня энергопотребления представляют штанговые скважинные насосные установки (ШСНУ) с приводом от станка-качалки. Указанная сложность в процессе оценки и расчета энергопотребления связана со многими факторами и, в первую очередь, с наличием большего числа элементов оборудования, чем в случае бесштанговых спосо-

бов добычи, что способствует естественному снижению уровня точности и достоверности (увеличивается погрешность расчета) результатов расчета и оценки энергопотребления.

Наличие обоснованных сведений об уровне ошибки при расчетах энергопотребления позволит более адекватно оценивать и прогнозировать уровень энергопотребления как отдельных нефтедобывающих скважин, так и кустов, и месторождений в целом. Это позволит специалистам по энергетике повысить точность прогнозирования потребления электроэнергии, а экономистам — более точно рассчитывать себестоимость добываемой продукции.

Поэтому задача комплексной оценки погрешности результатов расчета энергопотребления является очень важной и актуальной в настоящее время.

Существующие методики определения энергопотребления установки ШСН

Комплекс оборудования скважины, эксплуатируемой ШСНУ с приводом от станка-качалки, представлен на рисунке 1, и состоит

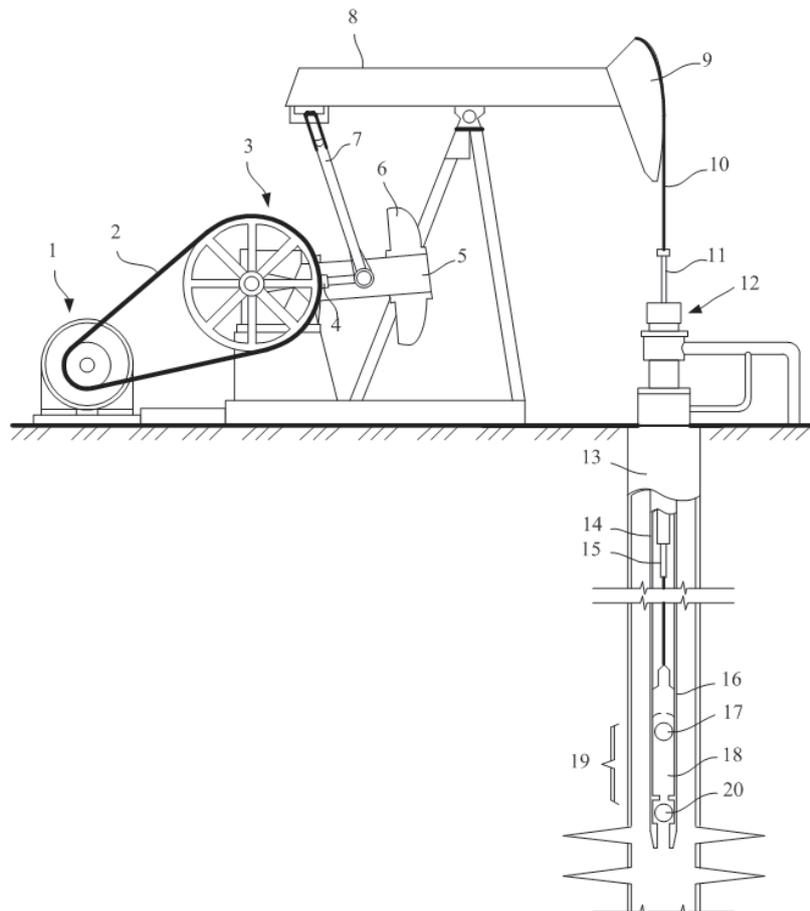


Рисунок 1. Схема наземного и погружного оборудования ШСНУ с приводом от станка-качалки

из наземной и погружной частей. К наземной части относится оборудование для преобразования электрической энергии в возвратно-поступательное движение полированного штока. Электроэнергия подводится к приводному электродвигателю (ЭД) 1, затем механическая энергия передается на ременную передачу 2 и далее редуктору 3. От выходного вала редуктора энергия вращательного движения передается на кривошип 4 и противовес 5 с грузами 6, предназначенными для балансировки ШСНУ. Далее энергия от кривошипа передается на шатун 7 и далее на балансиры 8, к головке которого 9 прикреплены канатная подвеска 10. Возвратно-поступательное движение полированного штока 11, проходящего через сальниковый узел 12, передает энергию подземному оборудованию скважины. Подземное оборудование состоит из эксплуатационной колонны 13, насосно-компрессорных труб 14, по которым поднимается продукция, колонны насосных штанг 15 для передачи движения плунжерному насосу 19. Плунжерный насос состоит из цилиндра 16, приемного 20 и нагнетательного 17 клапанов.

На основе принципа действия и компоновки можно представить процесс потребления электроэнергии в виде схемы, представленной на рисунке 2. На данной схеме представлены основные технологические элементы ШСНУ с приводом от станка-качалки, в которых происходит потребление энергии на подъем скважинной жидкости:

- штанговый глубинный насос;
- плунжерная пара;
- клапаны;
- штанговая колонна;
- станок-качалка;
- редуктор;
- ременная передача;
- электродвигатель;
- станция управления.

Основываясь на схеме, представленной на рисунке 2, можно сделать вывод о том, что любая методика для оценки энергопотребления ШСНУ с приводом от станка-качалки должна включать в себя кроме составляющей полезной работы, необходимой для поднятия продукции скважины, зависящую от геоло-

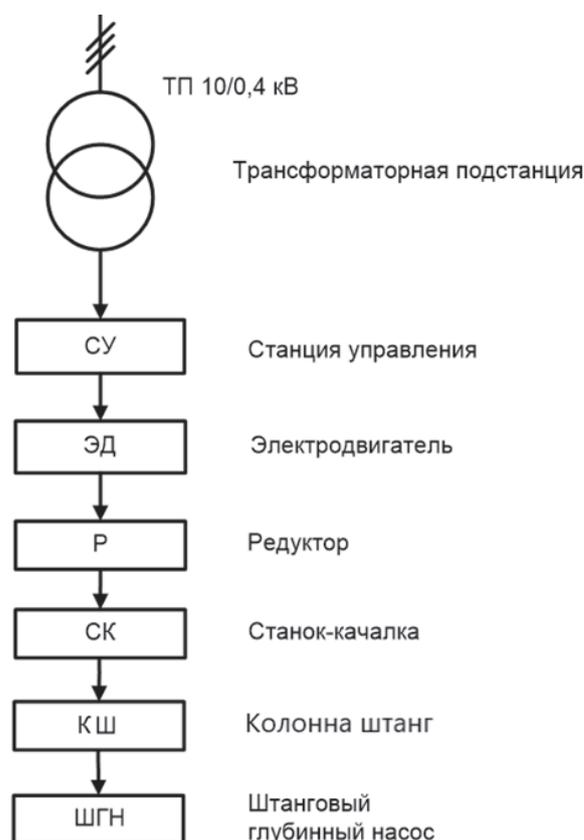


Рисунок 2. Структурная схема передачи энергии в ШСНУ с приводом от станка-качалки

гических и технологических параметров, также и потери во всех элементах насосной установки. При определении энергопотребления первоначально находят значения мощности, при этом используется несколько подходов.

Так, в работе [5] предлагается использовать упрощенные эмпирические формулы Азинмаш, Б.М. Плюща и В.О. Саркисяна. По формуле, предложенной Б.М. Плющом и В.О. Саркисяном [6], эффективная механическая мощность, потребляемая установкой ШСН от ЭД, находится по формуле:

$$P_{\text{э}} = \frac{N}{\eta_n} \left(K_1 + \frac{K_2 F_{\text{ж}} S}{9,8} \right), \quad (1)$$

где N — частота качаний, с^{-1} ;

K_1 — коэффициент, характеризующий тип станка-качалки;

K_2 — коэффициент, характеризующий режим откачки и диаметр насоса;

S — длина хода штока, м;

$F_{\text{ж}}$ — гидростатическая нагрузка (вес жидкости), Н;

η_n — к.п.д., учитывающий потери в редукторе и ременной передаче.

Тогда удельное энергопотребление будет находиться следующим образом:

$$W_{уд.} = \frac{N(K_1 + \frac{K_2 F_{жс}}{9,8})t}{Q}, \quad (2)$$

где t — время работы, ч;

Q — объем добытой за время t продукции, м³.

Согласно формуле «Азинмаш» [7], эффективная мощность ЭД составляет:

$$P_э = 0,25 \cdot K_0 \cdot K_a \cdot \pi \cdot D_{пл}^2 \cdot L_n \cdot s \cdot \rho_{сж} \cdot g \cdot N + P_0, \quad (3)$$

где $P_э$ — эффективная мощность ЭД, Вт;

K_0 — относительный коэффициент кривой вращающего момента на валу ЭД, равный отношению фактического коэффициента формы к коэффициенту формы для синусоиды, равному 1,11;

K_a — поправочный коэффициент, зависящий от отношения истинного пробега плунжера к длине хода устьевого штока (учитывающий влияние деформации штанг и труб);

$D_{пл}$ — диаметр плунжера, м;

L_n — высота подвеса насоса, м;

s — длина хода штока, м;

$\rho_{сж}$ — плотность скважинной жидкости, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, $g = 9,8$ м/с²;

N — частота качаний, с⁻¹;

P_0 — постоянные потери в СК, не зависящие от нагрузки (потери «холостого хода»), Вт.

В этом случае удельное энергопотребление составит:

$$W_{уд.} = \frac{(0,25 \cdot K_0 \cdot K_a \cdot \pi \cdot D_{пл}^2 \cdot L_n \cdot s \cdot \rho_{сж} \cdot g \cdot N + P_0)t}{Q}, \quad (4)$$

Следует отметить, что по формулам (2) и (4) результаты расчетов энергопотребления являются приближенными, и расчеты по ним могут иметь значительную погрешность. Это связано, в первую очередь, с отсутствием в указанных формулах учета уровня потерь в каждом элементе установки в соответствии с его параметрами. Данные формулы позволяют получить приемлемый уровень достоверности результатов расчета только применительно к группе (не менее 50) скважин.

Другой подход заключается в нахождении всех составляющих баланса потребля-

емой мощности (всех элементов установки в отдельности) с использованием точных формул, что позволяет наиболее полно учитывать условия работы установки (например вязкость, плотность и обводненность откачиваемой жидкости, траекторию ствола скважины, трение в подшипниках и зубчатых передачах редуктора и т.д.).

Потребляемая мощность установки в целом складывается из полезной мощности $P_{плз}$ и полных потерь установки ШСН $\Delta P_{шсн}$:

$$P_{потреб} = P_{плз} + \Delta P_{шсн}. \quad (5)$$

Полные потери установки ШСН складываются из потерь во всех узлах:

$$\Delta P_{шсн} = \Delta P_{р.п.} + \Delta P_{ред.} + \Delta P_{чзв} + \Delta P_{сург} + \Delta P_{п.ч.}, \quad (6)$$

где $\Delta P_{р.п.}$ — потери в ременной передаче, Вт;

$\Delta P_{ред.}$ — потери в редукторе, Вт;

$\Delta P_{чзв}$ — потери в четырехзвеннике, Вт;

$\Delta P_{сург}$ — потери в сальнике устьевом, Вт;

$\Delta P_{п.ч.}$ — потери в подземной части, Вт.

Стоит отметить, что потери в подземной части складываются из нескольких составляющих: потери в штанговой колонне (потери на механическое и гидродинамическое трение) и потери в насосе (потери в нагнетательном клапане и потери на трение плунжера о стенки цилиндра).

Оценка погрешности энергопотребления установки ШСН

Результаты вычислений энергопотребления отдельных элементов установки ШСН в значительной степени определяются корректностью и полнотой исходных данных, в частности допустимыми погрешностями их измерения [8].

Можно выделить следующие измеряемые параметры, которые являются исходными данными для выполнения расчетов по представленному алгоритму:

- 1) длина хода штока;
- 2) частота качаний балансира;
- 3) статический и динамический уровни жидкости;
- 4) устьевое и затрубное давления;

- 5) вес столба поднимаемой жидкости (при определении его по динамограмме);
- 6) коэффициент неуравновешенности (определяемый по ваттметрограмме, токограмме, либо получаемое сразу числовое значение с контроллера станции управления);
- 7) плотность водонефтегазовой смеси, динамическая вязкость, объемный коэффи-

циент откачиваемой жидкости, обводненность жидкости.

Измерение всех перечисленных выше параметров производится измерительными приборами с нормируемыми границами погрешностей. В таблице 1 приводятся максимально допустимые погрешности измерения исходных параметров.

Таблица 1. Допустимые погрешности измерения исходных параметров для определения энергопотребления установки ШСН

Параметр	Обозначение погрешности	Допустимая погрешность, %
Длина хода штока	$\Delta S_{плз}$	5,0
Частота качаний балансира	Δn	5,0
Динамический уровень жидкости в скважине	$\Delta H_{д}$	5,0
Устьевое давление	Δp_y	1,5
Затрубное давление	$\Delta p_{зат}$	1,5
Плотность жидкости	$\Delta \rho_{ж}$	0,25

В соответствии с [9], полезная мощность, обеспечивающая фактический дебит, определяется по выражению:

$$P_{плз}^{реал} = F_{пл} \cdot S_{плз} \cdot n \cdot (\rho_{ж} g H_{ж} + p_y - p_{зат}), \quad (7)$$

где $F_{пл}$ — площадь плунжера, м²;

$S_{плз}$ — полезная часть длины хода, м;

n — частота качаний, с⁻¹;

$\rho_{ж}$ — плотность жидкости, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

$H_{ж}$ — динамический уровень, м;

p_y — устьевое давление, Па;

$p_{зат}$ — затрубное давление, Па.

Поскольку значение полезной мощности определяется по известной функциональной зависимости (7), то для определения ее погрешности необходимо использовать правила вычисления погрешностей при косвенных измерениях. Поэтому погрешность полезной мощности (результат косвенного измерения) зависит от погрешностей прямых измерений (динамический уровень, устьевое и затрубное давления), а также от степени соответствия между заданными и фактическими значениями длины хода штока и числа качаний. В данной статье принимается, что насосное оборудование является новым, и поскольку плунжер насоса изготавливается с

высокой точностью, поэтому в дальнейшем погрешность вычисления полезной мощности вследствие несоответствия фактического диаметра плунжера приведенному в паспорте на оборудование учитываться не будет. С учетом указанного допущения общий вид выражения для определения абсолютной погрешности измерения полезной мощности:

$$\Delta P_{плз}^{реал} = \sqrt{\left(\frac{dP_{плз}^{реал}}{dS_{плз}} \Delta S_{плз}\right)^2 + \left(\frac{dP_{плз}^{реал}}{dn} \Delta n\right)^2 + \left(\frac{dP_{плз}^{реал}}{d\rho_{ж}} \Delta \rho_{ж}\right)^2 + \dots} \quad (8)$$

$$\dots + \left(\frac{dP_{плз}^{реал}}{dH_{ж}} \Delta H_{ж}\right)^2 + \left(\frac{dP_{плз}^{реал}}{dp_y} \Delta p_y\right)^2 + \left(\frac{dP_{плз}^{реал}}{dp_z} \Delta p_z\right)^2,$$

где $\Delta S_{плз}$ — абсолютная погрешность полезной части длины хода, м;

Δn — абсолютная погрешность частоты качаний, с⁻¹;

$\Delta \rho_{ж}$ — абсолютная погрешность определения плотности жидкости, кг/м³;

$\Delta H_{ж}$ — абсолютная погрешность измерения динамического уровня, м;

Δp_y — абсолютная погрешность измерения устьевого давления, Па;

$\Delta p_{зат}$ — абсолютная погрешность измерения затрубного давления, Па.

Найдем все частные производные, входящие в выражение (8):

$$\frac{dP_{плз}^{реал}}{dS_{плз}} = F_{пл} \cdot n \cdot (\rho_{ж}gH_{ж} + p_y - p_{зат});$$

$$\frac{dP_{плз}^{реал}}{dn} = F_{пл} \cdot S_{плз} \cdot (\rho_{ж}gH_{ж} + p_y - p_{зат});$$

$$\frac{dP_{плз}^{реал}}{d\rho_{ж}} = F_{пл} \cdot S_{плз} \cdot n \cdot g \cdot H_{ж};$$

$$\frac{dP_{плз}^{реал}}{dH_{ж}} = F_{пл} \cdot S_{плз} \cdot n \cdot \rho_{ж} \cdot g;$$

$$\frac{dP_{плз}^{реал}}{dp_y} = F_{пл} \cdot S_{плз} \cdot n;$$

$$\frac{dP_{плз}^{реал}}{dp_{зат}} = -F_{пл} \cdot S_{плз} \cdot n.$$

(9)

Далее необходимо определить выражения для абсолютных погрешностей, входящих в выражение (8). Для инструментально измеряемых величин абсолютная погрешность может быть найдена исходя из класса точности и предела измерения прибора. Таким образом, абсолютные погрешности измерения динамического уровня, устьевого и затрубного давления могут определены по следующим выражениям:

$$\Delta H_{ж} = \pm H_{ж} \cdot \delta_{нж};$$

$$\Delta p_y = \pm \frac{\gamma_{ру} \cdot P_y^M}{100};$$

$$\Delta p_{зат} = \pm \frac{\gamma_{рзат} \cdot P_{зат}^M}{100}.$$

(10)

Остальные значения абсолютных погрешностей, входящих в выражение (8), не связаны с процессом измерения, поэтому их определение аналогично формулам (10) невозможно.

Рассмотрим каждый параметр в отдельности. Длина хода штока ($S_{плз}$) определяется положением шатуна на противовесе (рисунок 1), причем шатун может быть зафиксирован только в определенных положениях, согласно документации на конкретный станок-качалку. Кроме того, длина хода штока зависит от всей геометрии станка-качалки. Было установлено, что с учетом погрешностей изготовления оборудования, а также его износа в процессе эксплуатации длина

хода штока может изменяться не более чем на 5 % от заданного значения, поэтому выражение для определения абсолютной погрешности длины хода штока можно записать:

$$\Delta S_{плз} = S_{плз} \cdot \delta_{S_{плз}},$$

(11)

где $\delta_{S_{плз}}$ — относительная погрешность длины хода штока, м.

Плотность жидкости ($\rho_{ж}$) определяется в лабораторных условиях. Современные лабораторные комплексы способны определять плотность жидкости с высокой точностью, при этом погрешность в большинстве случаев не превышает 0,25 %. Таким образом, выражение для определения абсолютной погрешности определения плотности жидкости можно записать:

$$\Delta \rho_{ж} = \rho_{ж} \cdot \delta_{\rho_{ж}},$$

(12)

где $\delta_{\rho_{ж}}$ — относительная погрешность плотности жидкости, кг/м³.

Частота или число качаний (n) определяется скоростью вращения электродвигателя, а также параметрами ременной передачи. На соответствие фактического значения числа качаний заданному влияет наличие проскальзывания в ременной передаче. Исходя из имеющегося опыта, изменение числа качаний вследствие проскальзывания ременной передачи не превышает 5 %, поэтому выражение для определения абсолютной погрешности числа качаний можно записать в виде:

$$\Delta n = n \cdot \delta_n,$$

(13)

где δ_n — относительная погрешность частоты качаний, с⁻¹.

Исходя из проведенных вычислений частных производных (9), а также абсолютных погрешностей (10), (11), (12), (13), выражение для определения абсолютной погрешности полезной мощности, затрачиваемой на подъем жидкости, можно записать в виде:

$$\begin{aligned}
\Delta P_{\text{ПЛЗ}}^{\text{реал}} &= \sqrt{(F_{\text{ПЛ}} \cdot n \cdot (\rho_{\text{ж}} g H_{\text{ж}} + p_{\text{у}} - p_{\text{зат}}) \cdot S_{\text{ПЛЗ}} \cdot \delta_{S_{\text{ПЛЗ}}})^2 + \dots} \\
&\quad \dots + \sqrt{(F_{\text{ПЛ}} \cdot S_{\text{ПЛЗ}} \cdot (\rho_{\text{ж}} g H_{\text{ж}} + p_{\text{у}} - p_{\text{зат}}) \cdot n \cdot \delta_n)^2 + \dots} \\
&\quad \dots + \sqrt{(F_{\text{ПЛ}} \cdot S_{\text{ПЛЗ}} \cdot n \cdot g \cdot H_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \delta_{\rho_{\text{ж}}})^2 + \dots} \\
&\quad \dots + \sqrt{(F_{\text{ПЛ}} \cdot S_{\text{ПЛЗ}} \cdot n \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot H_{\text{ж}} \cdot \delta_{H_{\text{ж}}})^2 + \dots} \\
&\quad \dots + \left(F_{\text{ПЛ}} \cdot S_{\text{ПЛЗ}} \cdot n \cdot \frac{\gamma_{\text{пу}} \cdot p_{\text{у}}^{\text{М}}}{100} \right)^2 + \left(F_{\text{ПЛ}} \cdot S_{\text{ПЛЗ}} \cdot n \cdot \frac{\gamma_{\text{пзат}} \cdot p_{\text{зат}}^{\text{М}}}{100} \right)^2 = \quad (14) \\
&= F_{\text{ПЛ}} \cdot n \cdot S_{\text{ПЛЗ}} \cdot \sqrt{\left((\rho_{\text{ж}} g H_{\text{ж}} + p_{\text{у}} - p_{\text{зат}}) \cdot \delta_{S_{\text{ПЛЗ}}} \right)^2 + \dots} \\
&\quad \dots + \sqrt{\left((\rho_{\text{ж}} g H_{\text{ж}} + p_{\text{у}} - p_{\text{зат}}) \cdot \delta_n \right)^2 + \dots} \\
&\quad \dots + \left(g \cdot H_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \delta_{\rho_{\text{ж}}} \right)^2 + \left(\rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot H_{\text{ж}} \cdot \delta_{H_{\text{ж}}} \right)^2 + \dots \\
&\quad \dots + \left(\frac{\gamma_{\text{пу}} \cdot p_{\text{у}}^{\text{М}}}{100} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{\text{пзат}} \cdot p_{\text{зат}}^{\text{М}}}{100} \right)^2.
\end{aligned}$$

Исходя из имеющегося выражения для определения абсолютной погрешности полезной затрачиваемой мощности (14), найдем относительную погрешность этой мощности:

$$\begin{aligned}
\delta_{P_{\text{ПЛЗ}}^{\text{реал}}} &= \frac{\Delta P_{\text{ПЛЗ}}^{\text{реал}}}{P_{\text{ПЛЗ}}^{\text{реал}}} = \frac{\sqrt{\left((\rho_{\text{ж}} g H_{\text{ж}} + p_{\text{у}} - p_{\text{зат}}) \cdot \delta_{S_{\text{ПЛЗ}}} \right)^2 + \dots}}{\rho_{\text{ж}} g H_{\text{ж}} + p_{\text{у}} - p_{\text{зат}}} \dots \\
&\quad \dots \frac{\sqrt{\left((\rho_{\text{ж}} g H_{\text{ж}} + p_{\text{у}} - p_{\text{зат}}) \cdot \delta_n \right)^2 + \dots}}{\dots} \dots \\
&\quad \dots \frac{\sqrt{\left(g \cdot H_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \delta_{\rho_{\text{ж}}} \right)^2 + \left(\rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot H_{\text{ж}} \cdot \delta_{H_{\text{ж}}} \right)^2 + \dots}}{\dots} \dots \\
&\quad \dots \frac{\sqrt{\left(\frac{\gamma_{\text{пу}} \cdot p_{\text{у}}^{\text{М}}}{100} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{\text{пзат}} \cdot p_{\text{зат}}^{\text{М}}}{100} \right)^2}}{\dots}. \quad (15)
\end{aligned}$$

Из формулы (15) видно, что величина относительной погрешности определения полезной затрачиваемой мощности на подъем жидкости не зависит от числа качаний, длины хода штока и площади плунжера, однако зависит от точности этих параметров, поскольку в выражении содержатся относительные погрешности определения этих параметров. Также из этого выражения следует, что точность расчета полезной мощности зависит от:

- относительной погрешности величины числа качаний;
- относительной погрешности длины хода штока;
- плотности жидкости и погрешности ее оценки;

— затрубного давления и класса точности манометра, установленного на затрубное пространство;

— устьевого давления и класса точности манометра, установленного на устье скважины;

— динамического уровня и класса точности прибора, с помощью которого производится его определение.

Для оценки диапазона погрешности расчета потребляемой мощности проведем оценку для 10 произвольных скважин с различными технологическими и геологическими параметрами. В таблице 2 представлены результаты расчетов относительных погрешностей полезной мощности.

Таблица 2. Результаты расчетов относительных погрешностей полезной мощности

Номер скважины	Расчетная полезная мощность, кВт	Относительная погрешность, %
1	2,14	7,96
2	0,80	8,14
3	3,02	7,63
4	1,99	8,00
5	0,97	8,07
6	1,58	7,75
7	1,78	9,83
8	3,48	8,27
9	2,51	8,36
10	1,76	8,01

Из таблицы 2 видно, что погрешность аналитического определения полезной мощности, затрачиваемой на подъем жидкости, лежит в пределах от 7,75 % до 9,83 %.

Погрешность определения общего потребления электроэнергии установки

Полезная мощность, затрачиваемая на подъем жидкости, является базовой величиной для дальнейших расчетов энергопотребления установки.

Для получения суммарных затрат на энергопотребление установки необходимо учесть потери, вносимые оборудованием станка-качалки, штанговой колонной и электродвигателем, а также степень дисбаланса станка-качалки. Таким образом, формулу для общей потребляемой мощности можно записать в виде:

$$P_{\text{полн}} = \frac{P_{\text{плз}}^{\text{реал}}}{\eta_{\text{эд}} \cdot \eta_{\text{ск}} \cdot \eta_{\text{пч}}}, \quad (16)$$

где $\eta_{\text{эд}}$ — к.п.д. электродвигателя;

$\eta_{\text{ск}}$ — к.п.д. станка качалки;

$\eta_{\text{пч}}$ — к.п.д. подземной части.

Стоит отметить, что к.п.д. подземной части включает в себя потери на трение штанговой колонны о НКТ и жидкость, а также в насосном оборудовании, а к.п.д. электродвигателя содержит в себе паспортные потери при номинальной нагрузке, потери вследствие несоответствия нагрузки номинальной, а также потери вследствие цикличности нагрузки на двигатель при работе станка-качалки. Учитывая, что все указанные составляющие к.п.д. являются расчетными, а точность расчетов зависит от

качества исходных данных, то погрешность определения общего значения к.п.д. может изменяться в широком диапазоне.

Рассмотрим аналитически формулу для расчета полной мощности и вычислим относительную погрешность ее определения аналогично тому, как выполнялись расчеты для полезной мощности:

$$\Delta P_{\text{полн}} = \sqrt{\left(\frac{dP_{\text{полн}}}{dP_{\text{плз}}^{\text{реал}}} \cdot \Delta P_{\text{плз}}^{\text{реал}}\right)^2 + \left(\frac{dP_{\text{полн}}}{d\eta_{\text{эд}}} \cdot \Delta\eta_{\text{эд}}\right)^2 + \dots} \\ \dots + \left(\frac{dP_{\text{полн}}}{d\eta_{\text{ск}}} \cdot \Delta\eta_{\text{ск}}\right)^2 + \left(\frac{dP_{\text{полн}}}{d\eta_{\text{пч}}} \cdot \Delta\eta_{\text{пч}}\right)^2. \quad (17)$$

Подставив полученные частные производные в выражение (17), получим после преобразований:

$$\Delta P_{\text{полн}} = \frac{1}{\eta_{\text{эд}} \cdot \eta_{\text{ск}} \cdot \eta_{\text{пч}}} \cdot \sqrt{(\Delta P_{\text{плз}}^{\text{реал}})^2 + \left(\frac{P_{\text{плз}}^{\text{реал}}}{\eta_{\text{эд}}} \cdot \Delta\eta_{\text{эд}}\right)^2 + \left(\frac{P_{\text{плз}}^{\text{реал}}}{\eta_{\text{ск}}} \cdot \Delta\eta_{\text{ск}}\right)^2 + \left(\frac{P_{\text{плз}}^{\text{реал}}}{\eta_{\text{пч}}} \cdot \Delta\eta_{\text{пч}}\right)^2}. \quad (19)$$

Учитывая, что отношение абсолютной погрешности к истинному значению является относительной погрешностью, то есть:

$$\delta_{\eta_{\text{эд}}} = \frac{\Delta\eta_{\text{эд}}}{\eta_{\text{эд}}}; \\ \delta_{\eta_{\text{ск}}} = \frac{\Delta\eta_{\text{ск}}}{\eta_{\text{ск}}}; \\ \delta_{\eta_{\text{пч}}} = \frac{\Delta\eta_{\text{пч}}}{\eta_{\text{пч}}}. \quad (20)$$

С учетом выражений (20) формула для определения абсолютной погрешности определения полной мощности примет вид (21):

$$\Delta P_{\text{полн}} = \frac{1}{\eta_{\text{эд}} \cdot \eta_{\text{ск}} \cdot \eta_{\text{пч}}} \cdot \sqrt{(\Delta P_{\text{плз}}^{\text{реал}})^2 + (P_{\text{плз}}^{\text{реал}} \cdot \delta_{\eta_{\text{эд}}})^2 + (P_{\text{плз}}^{\text{реал}} \cdot \delta_{\eta_{\text{ск}}})^2 + (P_{\text{плз}}^{\text{реал}} \cdot \delta_{\eta_{\text{пч}}})^2}. \quad (21)$$

Выражение для определения относительной погрешности полной мощности можно представить в виде:

$$\delta_{P_{\text{полн}}} = \frac{\Delta P_{\text{полн}}}{P_{\text{полн}}}. \quad (22)$$

Найдем все частные производные, входящие в выражение (17):

$$\frac{dP_{\text{полн}}}{dP_{\text{плз}}^{\text{реал}}} = \frac{1}{\eta_{\text{эд}} \cdot \eta_{\text{ск}} \cdot \eta_{\text{пч}}}; \\ \frac{dP_{\text{полн}}}{d\eta_{\text{эд}}} = -\frac{P_{\text{плз}}^{\text{реал}}}{\eta_{\text{эд}}^2 \cdot \eta_{\text{ск}} \cdot \eta_{\text{пч}}}; \\ \frac{dP_{\text{полн}}}{d\eta_{\text{ск}}} = -\frac{P_{\text{плз}}^{\text{реал}}}{\eta_{\text{ск}}^2 \cdot \eta_{\text{эд}} \cdot \eta_{\text{пч}}}; \\ \frac{dP_{\text{полн}}}{d\eta_{\text{пч}}} = -\frac{P_{\text{плз}}^{\text{реал}}}{\eta_{\text{пч}}^2 \cdot \eta_{\text{эд}} \cdot \eta_{\text{ск}}}. \quad (18)$$

Подставим выражения (21) и (16) в выражение (22):

$$\delta_{P_{\text{полн}}} = \frac{1}{\eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{СК}} \cdot \eta_{\text{ПЧ}}} \cdot \sqrt{(\Delta P_{\text{ПЛЗ}}^{\text{реал}})^2 + (P_{\text{ПЛЗ}}^{\text{реал}} \cdot \delta_{\eta_{\text{ЭД}}})^2 + (P_{\text{ПЛЗ}}^{\text{реал}} \cdot \delta_{\eta_{\text{СК}}})^2 + (P_{\text{ПЛЗ}}^{\text{реал}} \cdot \delta_{\eta_{\text{ПЧ}}})^2} = \frac{P_{\text{ПЛЗ}}^{\text{реал}}}{\eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{СК}} \cdot \eta_{\text{ПЧ}}} \quad (23)$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\Delta P_{\text{ПЛЗ}}^{\text{реал}}}{P_{\text{ПЛЗ}}^{\text{реал}}}\right)^2 + (\delta_{\eta_{\text{ЭД}}})^2 + (\delta_{\eta_{\text{СК}}})^2 + (\delta_{\eta_{\text{ПЧ}}})^2} = \sqrt{(\delta_{P_{\text{ПЛЗ}}^{\text{реал}}})^2 + (\delta_{\eta_{\text{ЭД}}})^2 + (\delta_{\eta_{\text{СК}}})^2 + (\delta_{\eta_{\text{ПЧ}}})^2}.$$

Как видно из выражения (23), для получения общей относительной погрешности вычисления потребляемой мощности необходимо геометрически сложить относительные погрешности определения полезной мощности и всех составляющих к.п.д.

Для оценки общей относительной погрешности определения потребляемой мощности проведен расчет для перечня скважин при различных значениях погрешностей определения к.п.д. (таблица 3). Также в таблице 3 представлены значения измеренной потре-

Таблица 3. Результаты расчетов относительных погрешностей потребляемой мощности

Номер скважины	Расчетная потребляемая мощность, кВт	Измеренная потребляемая мощность, кВт	Погрешность расчетной потребляемой мощности относительно измеренной, %	Расчетная относительная погрешность мощности при различных погрешностях к.п.д., %		
				1 %	5 %	10 %
1	5,89	5,58	5,61	8,14	11,76	19,06
2	3,27	2,10	55,80	8,32	11,88	19,14
3	11,28	9,90	13,96	7,82	11,54	18,93
4	5,79	5,60	3,44	8,18	11,79	19,08
5	4,07	3,69	10,31	8,25	11,83	19,11
6	4,95	4,90	1,13	7,94	11,62	18,98
7	5,56	5,49	1,38	9,98	13,10	19,92
8	6,71	7,20	6,67	8,45	11,98	19,20
9	8,91	9,06	1,63	8,54	12,04	19,23
10	4,75	5,05	5,91	8,19	11,79	19,08

бляемой мощности, которые получены на основе энергопотребления (с помощью индивидуальных приборов учета) и режима работы скважины, а также значения расчетной потребляемой мощности, которая получена на основе комплексного учета всех конструктивных параметров установленного оборудования и технологических параметров скважин.

По значениям расчетной относительной погрешности потребляемой мощности можно сделать вывод, что наибольший вклад в общее значение погрешности вносит погрешность определения полезной мощности (до 9,83 %). Увеличение суммарной погрешности при различных точностях опре-

деления к.п.д. узлов установки варьируется от 3 % до 10 %. Поэтому большую роль в точности определения энергетических затрат занимает именно корректное и достоверное определение к.п.д. составляющих установки.

Сравнение полученных расчетных погрешностей потребляемой мощности и погрешностей относительно замера позволяет сделать вывод, что практически во всех случаях погрешность расчета энергопотребления связана с точностью измерения или определения технологических параметров работы установки.

Таким образом, погрешность определения энергопотребления установки ШСН может

достигать значения 20 %. Более высокие значения ошибки при верификации могут наблюдаться при некорректных либо неполных исходных данных, а также в случаях, если погрешности средств измерения превышают допустимые значения.

Выводы

1. Расчетное определение затрат электроэнергии на скважинную механизированную добычу нефти сейчас является достаточно актуальной задачей, так как позволяет нефтедобывающим предприятиям оценить энергетическую эффективность эксплуатации фонда скважин, определить скважины с повышенным потреблением электроэнергии и произвести оптимизацию их режимов эксплуатации.

2. Определение энергопотребления электроприводов скважинных ШСН может производиться как по упрощенным моделям,

таким как формулы «Азинмаш», Б.М. Плюща и В.О. Саркисяна, так и по точным моделям с расчетом потерь во всех элементах насосной установки. Выбор того или иного подхода определяется объемом имеющихся исходных данных и решаемой задачи, и сильно различается количеством проводимых вычислений.

3. Расчетное значение энергопотребления установки зависит от нескольких десятков параметров и, соответственно, от погрешностей их измерения. Этим объясняется достаточно высокое значение максимального значения суммарной погрешности — до 20 %.

4. Практически во всех случаях погрешность расчета энергопотребления связана с точностью измерения или определения технологических параметров работы установки.

Список литературы

1. Хакимьянов М.И. Управление электроприводами скважинных насосных установок. М.: Инфра-Инженерия, 2017. 138 с.

2. Конесев С.Г., Хакимьянов М.И., Хлюпни П.А., Кондратьев Э.Ю. Современные технологии добычи высоковязких нефтей // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 301–307.

3. Ивановский В.Н., Сабиров А.А., Дарищев В.И., Камалетдинов Р.С. К вопросу об энергетических показателях в добыче нефти // Территория Нефтегаз. 2011. № 12. С. 26–29.

4. Хакимьянов М.И. Удельный расход электроэнергии при механизированной добыче нефти штанговыми глубиннонасосными установками // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18, № 1(62). С. 124–130.

5. Тимашев Э.О., Халфин Р.С., Волков М.Г. Статистический анализ наработок на отказ и коэффициентов подачи скважинного насосного оборудования в диапазонах параметров эксплуатации скважины // Нефтяное хозяйство. 2020. № 2. С. 46–49.

6. Блантер С.Г., Суд И.И. Электрооборудование нефтяной и газовой промышленности. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1980. 478 с.

7. Андриасов Р.С., Мищенко И.Т., Петров А.И. и др. Справочное руководство по проектированию и эксплуатации нефтяных месторождений. Добыча нефти / Под общ. ред. Ш.К. Гиматудинова. М.: Недра, 1983, 455 с.

8. Хакимьянов М.И., Хусаинов Ф.Ф., Шафиков И.Н. Зависимость энергопотребления штанговых глубинных насосов от технологических параметров скважин // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. № 1. С. 533–563. URL: http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p533-563_KhakimyanovMI_ru_en.pdf.

9. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. 816 с.

References

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

2. Konesev S.G., Khakim'yanov M.I., Khlyupni P.A., Kondrat'ev E.Yu. *Sovremennye tekhnologii dobychi vysokovyazkikh neftei* [Modern Technologies for the Extraction of

High-Viscosity Oils]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electrotechnical Systems and Complexes*, 2013, No. 21, pp. 301-307. [in Russian].

3. Ivanovskii V.N., Sabirov A.A., Darishchev V.I., Kamaletdinov R.S. K voprosu ob energeticheskikh pokazatelyakh v dobyche nefti [To the Question of Energy Indicators in Oil Production]. *Territoriya Neftegaz — Neftegaz Territory*, 2011, No. 12, pp. 26-29. [in Russian].

4. Khakim'yanov M.I. Udel'nyi raskhod elektroenergii pri mekhanizirovannoi dobyche nefti shtangovymi glubinnonasosnymi ustanovkami [Specific Power Consumption during Mechanized Oil Production with Sucker Rod Pumping Units]. *Vestnik UGATU — Vestnik USATU*, 2014, Vol. 18, No. 1(62), pp. 124-130. [in Russian].

5. Timashev E.O., Khalfin R.S., Volkov M.G. Statisticheskii analiz narabotok na otkaz i koeffitsientov podachi skvazhinnogo nasosnogo oborudovaniya v diapazonakh parametrov ekspluatatsii skvazhiny [Statistical Analysis of MTBFs and Flow Rates of Downhole Pumping Equipment in the Ranges of Well Operation Parameters]. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry*, 2020, No. 2, pp. 46-49. [in Russian].

6. Blanter S.G., Sud I.I. *Elektro-oborudovanie neftyanoi i gazovoi promyshlennosti* [Electrical Equipment for the Oil and Gas Industry]. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow, Nedra Publ., 1980. 478 p. [in Russian].

7. Andriasov R.S., Mishchenko I.T., Petrov A.I. e.a. *Spravochnoe rukovodstvo po proektirovaniyu i ekspluatatsii neftnykh mestorozhdenii. Dobycha nefti* [Reference Manual for the Design and Operation of Oil Fields. Oil Production]. Ed. by Sh.K. Gimatudinov. Moscow, Nedra Publ., 1983. 455 p. [in Russian].

8. Khakim'yanov M.I., Khusainov F.F., Shafikov I.N. Zavisimost' energopotrebleniya shtangovykh glubinnykh nasosov ot tekhnologicheskikh parametrov skvazhin [Dependence of Energy Consumption of Sucker Rod Pumps on Technological Parameters of Wells]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2015, No. 1, pp. 533-563. URL: http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p533-563_KhakimyanovMI_ru_en.pdf. [in Russian].

9. Mishchenko I.T. *Skvazhinnaya dobycha nefti: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Downhole Oil Production: Textbook for Universities]. Moscow, Neft' i gaz Publ., RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 2003. 816 p. [in Russian].



Хазиева Р. Т.
Khazieva R. T.

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



Кириллов Р. В.
Kirillov R. V.

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



Латыпов Б. Ф.
Latypov B. F.

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

УДК 621.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-4-18-27

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕЗОНАНСНОГО ИНВЕРТОРА

Основной целью исследования являются анализ режимов работы гибридного электромагнитного элемента (ЭМЭ) в двухтактных схемах автономного инвертора на базе индуктивно-емкостного преобразователя (ИЕП) при заряде емкостного накопителя (ЕН) и поиск параметров гибридного ЭМЭ, позволяющих создать эффективный режим работы системы заряда ЕН с наивысшим КПД за одно и то же время до одного и того же напряжения. Кроме того, необходимо определить, как изменяются напряжения и токи при изменении параметров ИЕП и исследовать, как формируется траектория срабатывания полупроводниковых ключей инвертора. При решении поставленной задачи применялся программный пакет MathCad. Авторами разработана математическая модель системы заряда ЕН с ИЕП, включенным в диагональ инвертора. Авторами разработаны и запатентованы электротехнические устройства на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК), работающего в составе двухтактного преобразователя, на активную и емкостную нагрузку. Результаты исследований, проведенные на основе математической модели, показывают, что при резонансном режиме работы гибридного ЭМЭ при совпадении частоты свободных колебаний гибридного ЭМЭ с частотой коммутации полупроводниковых ключей инвертора достигается наиболее энергетически эффективный режим заряда ЕН. Применение ИЕП обеспечивает постоянство значения тока в цепи нагрузки, что позволяет экономично использовать установленную мощность повышающего трансформатора, исключить броски тока при включении ЕН на заряд, обеспечить линейное нарастание напряжения на заряжаемом ЕН.

Ключевые слова: система заряда, емкостный накопитель, двухтактный преобразователь, инвертор, режимы работы, индуктивно-емкостный преобразователь.

MATHEMATICAL SIMULATION OF OPERATING MODES OF A RESONANT INVERTER

The main purpose of the study is to analyze the operating modes of a hybrid electromagnetic element (EME) in push-pull circuits of an autonomous inverter based on an inductive-capacitive

converter (ICC) when charging a capacitive storage (CS) and to search for parameters of a hybrid EME that allow creating an effective mode of operation of the CS charging system with the highest Efficiency for the same time, up to the same voltage. In addition, it is necessary to determine how the voltages and currents change when changing the parameters of the EME and to investigate how the trajectory of the operation of the semiconductor switches of the inverter is formed. When solving the problem, the MathCad software package was used. The authors have developed a mathematical model of the CS charging system with an ICC included in the diagonal of the inverter. The authors have developed and patented electrical devices based on a multifunctional integrated electromagnetic component (MIEC) operating as part of a push-pull converter for active and capacitive loads. The results of studies carried out based on a mathematical model show that in the resonant mode of operation of the hybrid EME, when the frequency of free oscillations of the hybrid EME coincides with the switching frequency of the semiconductor switches of the inverter, the most energetically efficient mode of charging CS is achieved. The use of ICC ensures the constancy of the current value in the load circuit, which makes it possible to economically use the installed power of the step-up transformer, to exclude current surges when the CS is switched on to the charge, and to ensure a linear increase in the voltage on the charged CS.

Key words: charge system, capacitive storage, push-pull converter, inverter, operating modes, inductive-capacitive converter.

Одной из известных топологий импульсных преобразователей напряжения считается двухтактный преобразователь. В отличие от однотактного обратного преобразователя энергия в сердечнике двухтактного преобразователя никак не запасается благодаря тому, что в данном случае это сердечник трансформатора, но никак не сердечник дросселя, он предназначается здесь в роли проводника для переменного магнитного потока, который создается по очереди двумя половинами первичной обмотки [1].

Двухтактные преобразователи успешно применяются в источниках вторичного электропитания, зарядных устройствах аккумуляторных батарей и импульсной технике. Авторами разработан автономный инвертор на базе индуктивно-емкостного преобразователя (ИЕП), выполненного на основе гибридного электромагнитного элемента (ЭМЭ). В свою очередь, индуктивно-емкостные преобразователи — устройства, которые используют резонансные свойства реактивных составляющих при их питании от источников переменного напряжения промышленной частоты. Применение гибридных ЭМЭ позволяет улучшить технико-экономические показатели, повысить надежность, снизить массу, габариты и себестоимость устройств на их основе [2].

В данной статье ставится задача исследования режимов работы гибридного ЭМЭ в составе ИЕП в двухтактных схемах автономного инвертора при заряде емкостного накопителя (ЕН). Для обеспечения высокой энергетической эффективности процесса заряда требуется заряд ЕН током неизменной формы [3].

Авторами разработана математическая модель системы заряда ЕН с ИЕП, включенным в диагональ инвертора. Особенность разработанной математической модели заключается в описании электромагнитных процессов в гибридных ЭМЭ системой линейных уравнений с помощью интегральных параметров [4].

Энергетически эффективный режим заряда ЕН обеспечивает увеличение амплитуды напряжения на обкладках гибридного ЭМЭ и уменьшение амплитуды тока при той же выходной мощности системы заряда ЕН. Снижаются потери мощности, что приводит к повышению КПД на 12–15 % [5].

Результаты исследований, проведенные на основе математической модели, показывают, что наиболее эффективный с энергетической точки зрения режим заряда ЕН достигается при наиболее благоприятном режиме работы гибридного ЭМЭ. Данный режим является резонансным [6].

В нефтяной индустрии существует проблема образования отложений (соли, минералы, парафины) на различных участках насосно-компрессорных труб [7]. Использование электрогидроимпульсной очистительной системы позволяет решить данную проблему за счет обработки внутренней поверхности труб импульсным разрядом высокого напряжения. Подобные системы содержат двухтактную схему преобразования – автономный инвертор. Преобразователи, собранные по двухтактной схеме, успешно применяются для питания радиотехнических устройств, в источниках вторичного электропитания, используются в зарядных устройствах аккумуляторных батарей и импульсной технике. Высокий КПД двухтактных преобразователей обусловлен тем, что используются обе части цикла преобразования (зарядная и разрядная) [8].

Авторами разработан автономный инвертор на базе ИЕП, выполненного на основе гибридного ЭМЭ. Применение гибридного ЭМЭ позволяет улучшить технико-экономические показатели, ускорить процесс разработки, повысить технологичность и надежность, снизить себестоимость устройств на их основе. Оценка надежности структур гибридных ЭМЭ и устройств на их основе произведена авторами в работе [9].

При разработке инженерных методик расчета гибридных ЭМЭ и их уточнении, а также при определении алгоритмов проектирования устройств на основе гибридных ЭМЭ необходимо учитывать режимы работы компонента, электродинамические процессы, происходящие в нём. Некоторый анализ режимов работы двухтактного инвертора с гибридным резонансным контуром произведен в статье [10]. Важной задачей при выборе режима работы устройств данного типа является определение параметров гибридного ЭМЭ для обеспечения наиболее высокого КПД преобразователя.

Длительная работа оборудования на импульсном напряжении приводит к ускоренному износу и отказу техники. Использование напряжения искаженной формы для питания дорогостоящего оборудования нежелательно. Определенные кате-

гории оборудования не способны работать на напряжении, отличающемся от синусоидальной формы. Возникает необходимость в инверторах с синусоидальной формой напряжения, способных выдержать значительную нагрузку. Производители предлагают преобразователи с квазисинусоидальной формой напряжения. Такая форма представляет собой синусоиду, состоящую из множества небольших ступенек [11].

Получить идеальную синусоиду при использовании радиоэлектронных компонентов достаточно сложно. Проблема решается установкой фильтра, что, в свою очередь, значительно повышает массу и габариты преобразователя, усложняет схему, увеличивает стоимость, снижает надежность. Получить синусоидальную форму тока в цепи питания инверторных систем, а также обеспечить высокий коэффициент мощности (до 98 %), близкий к идеальному за счет минимального сдвига фаз между напряжением и током (вследствие активного характера нагрузки) можно в устройствах, содержащих колебательные контуры. Выбор параметров гибридного ЭМЭ для работы в составе двухтактного инвертора произведен, исходя из условия, когда процессы носят колебательный характер [12].

Чтобы понять, каким образом будет работать реальное устройство в тех или иных условиях, необходимо исследовать процессы циклического перезаряда. Пакеты прикладных программ позволяют исследовать эти процессы виртуально, при этом важно, чтобы моделирование соответствовало реальности, чтобы разработанные математические модели для исследования режимов работы электротехнических систем и устройств были адекватными.

В данной статье исследуются режимы работы системы заряда ЕН. С помощью математической модели можно определить наиболее оптимальный режим работы системы заряда ЕН с энергетической точки зрения. Для обеспечения высокой энергетической эффективности процесса заряда требуется заряжать ЕН током неизменной формы [13].

Основными задачами исследования являются анализ режимов работы гибридного

ЭМЭ в двухтактных схемах автономного инвертора на базе ИЕП при заряде ЕН и поиск параметров гибридного ЭМЭ, позволяющих создать эффективный режим работы системы заряда ЕН с наивысшим КПД за одно и то же время, до одного и того же напряжения. Кроме того, необходимо определить, как изменяются напряжения и токи при изменении параметров ИЕП и исследовать, как формируется траектория срабатывания полупроводниковых ключей инвертора.

Система заряда ЕН может быть реализована на основе автономного инвертора, обеспечивающего необходимый уровень напряжения и частоты [14].

Блок-схема исследуемой системы заряда ЕН с ИЕП включает в себя следующие основные блоки:

- питающая сеть (ПС);
- трехфазный мостовой двухполупериодный выпрямитель (В);
- емкостный фильтр (Ф);
- автономный инвертор с полностью управляемыми транзисторами (АИ);
- индуктивно-емкостный преобразователь, подключенный к первичной обмотке согласующего трансформатора (Т);
- высоковольтный выпрямительный столб (ВС);
- разрядная цепь (РЦ).

На рисунке 1 представлена принципиальная схема системы заряда ЕН с ИЕП. Использование ИЕП в системах заряда ЕН позволяет стабилизировать ток заряда и тем самым достичь наилучших значений энергетических показателей процесса заряда ЕН.

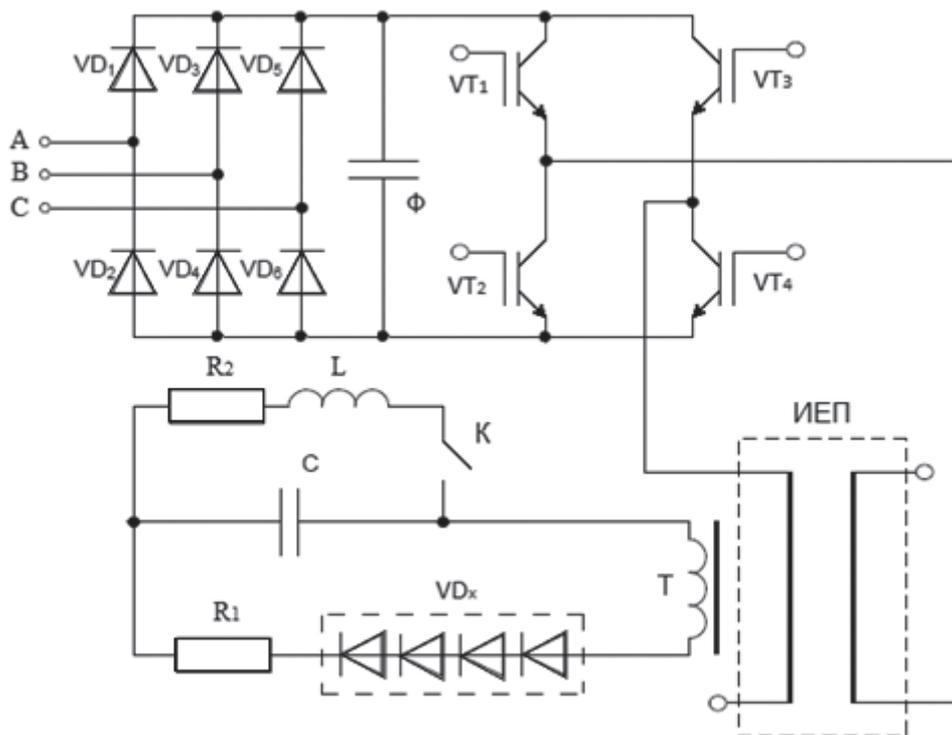


Рисунок 1. Схема системы заряда емкостного накопителя с ИЕП

Представленная схема (рисунок 1) является стандартной. Особенность схемы заключается в использовании гибридного ЭМЭ — многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК), включенного в диагональ ИЕП, поэтому важно исследовать работу МИЭК в двухтактных схемах [15].

Схематические исполнения двухсекционных МИЭК имеют несколько вариаций. Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент может сочетать в себе свойства катушки индуктивности и конденсатора и выполнять функции колебательного контура и первичной обмотки трансформатора, что позволяет снизить рас-

ход электропроводящих, изоляционных и конструкционных материалов. Авторами запатентованы устройства, использующие данное свойство МИЭК [16].

В статье [17] произведена оценка процессов заряда ЕН, что позволило сделать выбор в пользу наиболее эффективного схемотехнического решения ИЕП. Актуальной задачей является исследование процессов циклического перезаряда емкости МИЭК, так как характер процесса и форма импульса зависят от вида и величины нагрузки. Исходными данными для расчета являются параметры питающей сети (напряжение и частота), частота коммутации полупроводниковых ключей, требуемый уровень напряжения на ЕН и время заряда ЕН.

В работе [18] определен наиболее оптимальный режим заряда ЕН, исследованы базовые структуры МИЭК, определена емкость МИЭК для получения формы тока, близкой к синусоидальной, и максимального

коэффициента мощности. Определено, что максимальный коэффициент усиления по напряжению достигается при колебательном процессе заряда емкости гибридного ЭМЭ и коммутации ключа в момент достижения максимального напряжения.

Для расчета сложных структур МИЭК целесообразно использовать метод, основанный на описании электромагнитных процессов в МИЭК интегральными параметрами как наиболее удобный и простой [19].

Для определения наиболее эффективного с энергетической точки зрения режима работы авторами разработана математическая модель заряда ЕН, с помощью которой проведены исследования электромагнитных процессов, получены осциллограммы напряжений и токов на всех компонентах схемы, в том числе полупроводниковых ключах.

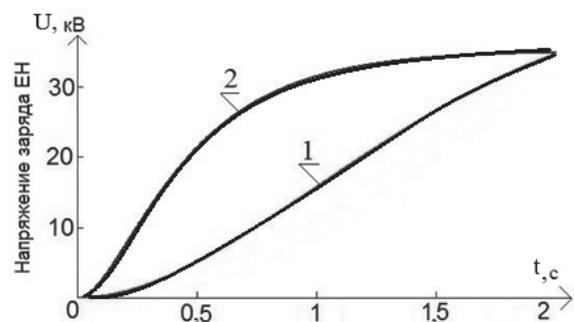
Разработанная авторами математическая модель представляет собой следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{ВХ} = U_{пл} + U \\ U = \frac{I_{ВХ} - I_L}{j \cdot \omega \cdot C} \\ U_{пл} = (R + j \cdot \omega \cdot L) \cdot (I_{ВХ} + I_L) \\ U_L + U_{пл} = U \\ i_{ЕН1(t)} = A \cdot \exp(-\alpha \cdot t) \cdot \sin(\omega_{св} \cdot t) \\ i_{ЕН1(t)} = \frac{U_{ЕН} - A \cdot \exp(-\alpha \cdot t) \cdot (\omega_{св} \cdot \cos(\omega_{св} \cdot t) + \alpha \cdot \sin(\omega_{св} \cdot t))}{C_{ИЕП} \cdot (\alpha^2 + \omega_{св}^2)} \end{array} \right.$$

В данной системе первые четыре уравнения описывают электромагнитные процессы в ИЕП на основе МИЭК, а остальные уравнения описывают процесс заряда ЕН.

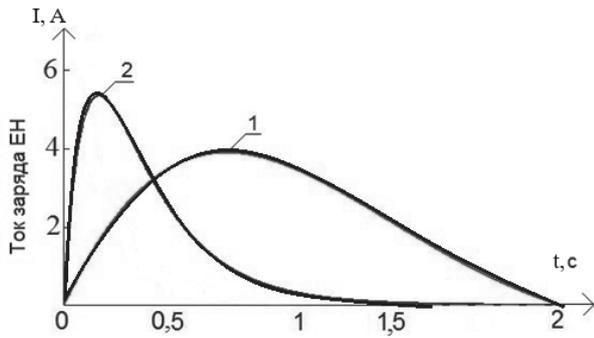
Изменяя параметры (значения емкости и индуктивности) МИЭК при выбранной частоте коммутации, построим графики зависимостей напряжения и тока на ЕН от времени для наиболее оптимального режима заряда ЕН.

На основе созданных математических моделей в программной среде MathCad построена временная диаграмма напряжения и тока заряда ЕН (рисунки 2 и 3).



1 — режим заряда ЕН при неизменной форме тока;
2 — режим заряда ЕН при изменяющейся форме тока

Рисунок 2. Временная диаграмма напряжения заряда ЕН
(заряд до $U = 35$ кВ за $t = 2$ с, $f_{рез.} = 2$ кГц)



1 — режим заряда ЕН при неизменной форме тока;
2 — режим заряда ЕН при изменяющейся форме тока

Рисунок 3. Временная диаграмма тока заряда ЕН

Оценить энергетическую эффективность процесса заряда можно, определив КПД системы заряда ЕН.

Среднециклический КПД системы заряда:

$$\eta_{\text{ср.}} = \frac{W_{\text{H}}}{W_{\text{H}} + \Delta W},$$

где W_{H} — предразрядная энергия ЕН;

ΔW — энергия потерь;

$$W_{\text{H}} = \frac{C_{\text{H}} * U_{\text{Hmax}}^2}{2},$$

$$\Delta W = \sum_{k=1}^{k=n} \int_1^{t_c} i_k^2(t) * R_k dt,$$

где t_c — время зарядно-разрядного цикла.

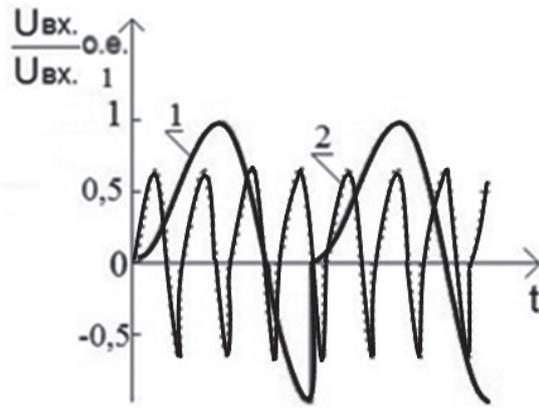
Расчеты показывают, что при режиме заряда ЕН, описываемом графиками 1, по сравнению с режимом, описываемом графиком 2, КПД выше на 12–15 %, потери мощности меньше в 2,2 раза (рисунки 2 и 3).

Авторами также произведено исследование работы МИЭК.

Математическая модель позволяет определить значения токов и напряжений на обкладках и емкости МИЭК и в диагонали инвертора, графики которых представлены на рисунках 4–7.

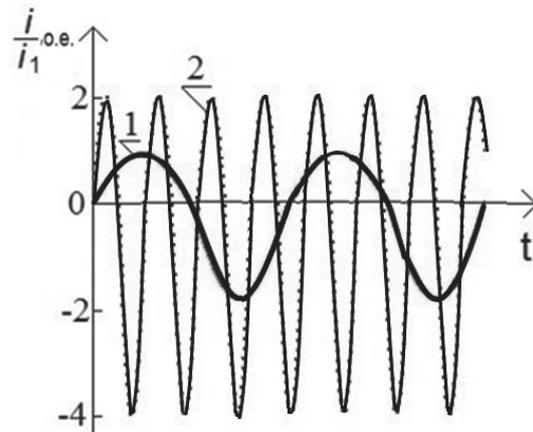
На рисунках 4 и 5 представлены временные диаграммы напряжения и тока в диагонали инвертора при заряде ЕН.

На рисунках 6 и 7 представлены временные диаграммы напряжения на обкладках и между обкладками (на емкости и индуктивности) МИЭК при заряде ЕН.



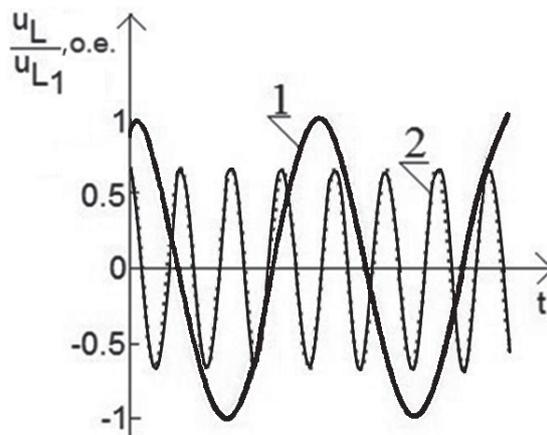
1 — режим заряда ЕН при неизменной форме тока;
2 — режим заряда ЕН при изменяющейся форме тока

Рисунок 4. Временная диаграмма напряжения в диагонали инвертора



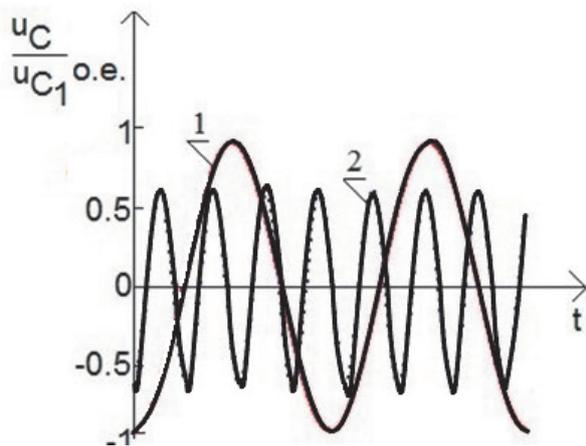
1 — режим заряда ЕН при неизменной форме тока;
2 — режим заряда ЕН при изменяющейся форме тока

Рисунок 5. Временная диаграмма тока через обкладки МИЭК



1 — режим заряда ЕН при неизменной форме тока;
2 — режим заряда ЕН при изменяющейся форме тока

Рисунок 6. Временная диаграмма напряжения на обкладке МИЭК (на индуктивности)



1 — режим заряда ЕН при неизменной форме тока;
2 — режим заряда ЕН при изменяющейся форме тока

Рисунок 7. Временная диаграмма напряжения между обкладками (на емкости) МИЭК

На рисунке 8 представлены временные диаграммы напряжений на транзисторах инвертора. На первом графике показаны напряжения на накрест лежащих транзисторах инвертора VT1 и VT4, VT3 и VT2 при подаче импульсов поочередного отпирания и запираания накрест лежащих транзисторов.

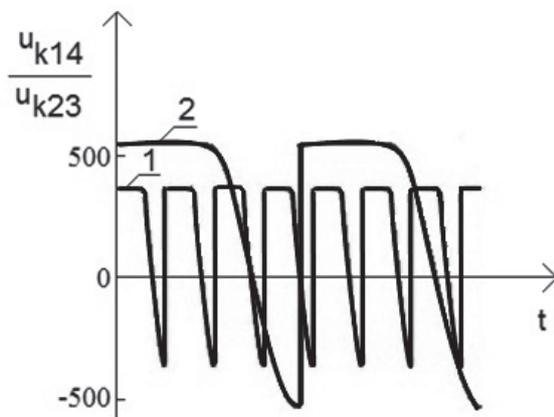


Рисунок 8. Временная диаграмма напряжений на транзисторах инвертора

Применение в качестве ИЕП МИЭК позволяет обеспечить наиболее оптимальный с энергетической точки зрения режим заряда ЕН током неизменной формы с автоматическим поддержанием его постоянства в процессе заряда с целью получения линейно возрастающего напряжения (рису-

нок 2, график 1) для заряда ЕН с максимальным КПД [14].

Исследования временных диаграмм заряда ЕН показывают, что при энергетически эффективном режиме заряда ЕН обеспечивается увеличение амплитуды напряжения на обкладках гибридного ЭМЭ в 1,5 раза, уменьшение амплитуды тока — в 1,4 раза при той же выходной мощности системы заряда ЕН (рисунки 4 и 5, график 1). Оценка энергетической эффективности разных режимов заряда ЕН показала, что мощность потерь в режиме заряда ЕН током неизменной формы меньше в 2,2 раза, что приводит к повышению КПД на 15 %.

Напряжения на индуктивностях и емкостях ИЕП находятся в противофазе и равны (рисунки 6 и 7). Значения напряжений и токов свидетельствует о резонансном режиме работы ИЕП.

По результатам моделирования произведена оценка энергетической эффективности для разных режимов заряда ЕН. С помощью модели произведен выбор наиболее оптимального схемотехнического решения с использованием ИЕП для построения на его основе силовой части устройства заряда ЕН реального объекта, произведена оценка энергетической эффективности для разных режимов заряда ЕН. Показано, что режим работы системы заряда ЕН током неизменной формы повышает КПД с 80 % до 95 %.

Результаты исследований, проведенные на основе математической модели, показывают, что при резонансном режиме работы гибридного ЭМЭ, при совпадении частоты свободных колебаний гибридного ЭМЭ с частотой коммутации полупроводниковых ключей инвертора достигается наиболее энергетически эффективный режим заряда ЕН.

Применение ИЕП обеспечивает постоянство значения тока в цепи нагрузки, что позволяет экономично использовать установленную мощность повышающего трансформатора, исключить броски тока при включении ЕН на заряд, обеспечить линейное нарастание напряжения на заряжаемом ЕН.

При проектировании системы заряда ЕН следует перейти от трансформаторно-выпрямительных схем к схемам со звеном повы-

шенной частоты. Силовая пассивная часть звена повышенной частоты должна строиться на основе МИЭК. Это позволяет улучшить частотные свойства и повысить добротность контура коммутации, улучшить условия работы полупроводниковых приборов, а также уменьшить массу и габариты коммутационного контура за счет функциональной интеграции.

Авторами разработаны и запатентованы электротехнические устройства на базе МИЭК, работающем в составе двухтактного преобразователя, на активную и емкостную нагрузку [20].

Выводы

1. Авторами разработана математическая модель системы заряда ЕН с ИЕП на базе МИЭК, включенным в диагональ инвертора. Особенность разработанной математической модели заключается в описании электромагнитных процессов в МИЭК системой линейных уравнений с помощью интегральных параметров.

2. В результате исследования получены временные диаграммы токов и напряжений

на элементах схемы при процессах заряда ЕН. Анализ временных диаграмм заряда ЕН показывает, что при энергетически эффективном режиме заряда ЕН обеспечивается увеличение амплитуды напряжения на обкладках гибридного ЭМЭ в 1,5 раза, уменьшение амплитуды тока в 1,4 раза при той же выходной мощности системы заряда ЕН. Оценка энергетической эффективности разных режимов заряда ЕН показала, что мощность потерь в режиме заряда ЕН током неизменной формы меньше в 2,2 раза, что приводит к повышению КПД на 15 %.

3. Результаты исследований, проведенные на основе математической модели, показывают, что наиболее эффективный с энергетической точки зрения режим заряда ЕН достигается при наиболее благоприятном с точки зрения электромагнитных процессов (значений токов и напряжений на обкладках) режиме работы гибридного ЭМЭ. Данный режим является резонансным и наступает при совпадении частоты свободных колебаний гибридного ЭМЭ с частотой коммутации полупроводниковых ключей инвертора.

Список литературы

1. Miller K.J., Collier K.N., Soll-Morris H.B., Raja Swaminathan, Mchenry M.E. Induction Heating of FECO Nanoparticles for Rapid RF Curing of Epoxy Composites // *Journal of Applied Physics*. 2009. Vol. 105. 07E714.

2. Tavakoli M.H., Ojaghi A., Mohammadi-Manesh E., Mansour M. Influence of Coil Geometry on the Induction Heating Process in Crystal Growth Systems // *Journal of Crystal Growth*. 2009. Vol. 311. P. 1594–1599. doi:10.1016/j.jcrysgr.2009.01.092.

3. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Стабилизационные свойства индуктивно-емкостных преобразователей на основе гибридных электромагнитных элементов // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. 2017. № 5-6 (157). С. 28–36.

4. Карабельская И.В. Примеры расчета электрических полей при электрохимической защите трубопроводов от коррозии // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2015. Т. 11, № 2. С. 23–29.

5. Карабельская И.В., Абызбаев И.З. Методы расчета электрических полей при

электрохимической защите трубопроводов от коррозии в неоднородных и клиновидных средах // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*, 2015. Т. 11, № 4. С. 25–33.

6. O'Loughlin M. An Interleaved PFC Preregulator for High-Power Converters // *Topic 5: Texas Instrument Power Supply Design Seminar*, 2007, pp. 5-1–5-14.

7. Брылина О.Г., Гельман М.В. Исследование двухзвенных преобразователей частоты // *Электротехнические системы и комплексы*. 2013. № 21. С. 270–278.

8. Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р., Корнилов Г.П., Крубцов Д.С. Формирование фазных напряжений четырехуровневого высоковольтного преобразователя частоты // *Электротехнические системы и комплексы*. 2011. № 19. С. 174–181.

9. Брылина О.Г., Гельман М.В. Исследование трехфазного активного выпрямителя напряжения // *Электротехнические системы и комплексы*. 2014. № 1 (22). С. 47–50.

10. Радионов А.А., Маклаков А.С. Компенсация реактивной мощности в сети с

помощью активного выпрямителя напряжения // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 226–231.

11. Sum K. Kit. Improved Valley-Fill Passive Power Factor Correction Current Shaper Approaches // IEC Specification Limits. PCIM Magazine, Feb. 1998.

12. Morrow K., Karner D., Francfort J. Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging Infrastructure Review. U.S. Department of Energy, Vehicle Technologies Program, 2008.

13. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Хлюпин П.А. Компьютерная модель системы заряда емкостного накопителя на основе индуктивно-емкостного преобразователя // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. № 4. С. 374–390. URL: http://ogbus.ru/issues/4_2015/ogbus_4_2015_p374-390_KonesevSG_ru.pdf.

14. Cheng C.J., Bao S.J., Li C.M. A Facile and Well-Tailored Vanadium Oxide Porous Network for High-Capacity Electrochemical Capacitive Energy Storage // Materials Letters, 2014, Vol. 120. DOI: 10.1016/j.matlet.2014.01.111.

15. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Тенденции развития индуктивно-емкостных преобразователей, их основные параметры и характеристики // Актуальные вопросы энергетики: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. С. 252–255.

16. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Методы оценки показателей надежности сложных компонентов и систем // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». 2015. № 1. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=17558>.

17. Danilov A. Modern Industrial Current Sensors // Modern Electronics. 2004. Vol. 1. P. 26–28.

18. Musavi F., Eberle W., Dunford W.G. A Phase Shifted Semi-Bridgeless Boost Power Factor Corrected Converter for Plug in Hybrid Electric Vehicle Battery Chargers // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE. 2011. P. 821–828.

19. Konesev S.G., Khazieva R.T., Bochkareva T.A. Mathematical Modeling of Inverter with a Hybrid Resonant Circuit Operation Modes // 2018 International Conference on Industrial Engineering,

Applications and Manufacturing (ICIEAM), ICIE-2018, Saint-Petersburg, 2018. P. 1-5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.872884.

20. Пат. 2632412 Российская Федерация, МПК Н 03 К 3/53, Н 02 М 5/06. Индуктивно-емкостный преобразователь / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, Т.А. Бочкарева. 2016143651, заявлено 07.11.16; опубл. 04.10.17. Бюл. № 28.

References

1. Miller K.J., Collier K.N., Soll-Morris H.B., Raja Swaminathan, Mchenry M.E. Induction Heating of FECO Nanoparticles for Rapid RF Curing of Epoxy Composites. *Journal of Applied Physics*, 2009, Vol. 105, 07E714.

2. Tavakoli M.H., Ojaghi A., Mohammadi-Manesh E., Mansour M. Influence of Coil Geometry on the Induction Heating Process in Crystal Growth Systems. *Journal of Crystal Growth*, 2009, Vol. 311, pp. 1594–1599. doi:10.1016/j.jcrysgro.2009.01.092.

3. Konesev S.G., Khazieva R.T. Stabilizatsionnye svoystva induktivno-emkostnykh preobrazovatelei na osnove gibridnykh elektromagnitnykh elementov [Stabilization Properties of Inductive-Capacitive Converters Based on Hybrid Electromagnetic Elements]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont — Electrical Equipment: Operation and Repair*, 2017, No. 5-6 (157), pp. 28–36. [in Russian].

4. Karabel'skaya I.V. Primery rascheta elektricheskikh polei pri elektrokhimicheskoi zashchite truboprovodov ot korrozii [Examples of Calculation of Electric Fields at Electrochemical Protection of Pipelines against Corrosion]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2015, Vol. 11, No. 2, pp. 23–29. [in Russian].

5. Karabel'skaya I.V., Abyzbaev I.Z. Metody rascheta elektricheskikh polei pri elektrokhimicheskoi zashchite truboprovodov ot korrozii v v neodnorodnykh i klinovidnykh sredakh [Methods for Calculating Electric Fields at Electrochemical Protection of Pipelines against Corrosion in Inhomogeneous Media and Wedge]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2015, Vol. 11, No. 4, pp. 25–33. [in Russian].

6. O'Loughlin M. An Interleaved PFC Preregulator for High-Power Converters. *Topic*

5: *Texas Instrument Power Supply Design Seminar*, 2007, pp. 5-1–5-14.

7. Brylina O.G., Gel'man M.V. Issledovanie dvukhzvennykh preobrazovatelei chastoty [Research of Variable Adjustable Frequency Converters]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electrotechnical Systems and Complexes*, 2013, No. 21, pp. 270–278. [in Russian].

8. Khramshin T.R., Khramshin R.R., Kornilov G.P., Krubtsov D.S. Formirovanie faznykh napryazhenii chetyrekhurovnevoogo vysokovol'tnogo preobrazovatelya chastoty [Formation of Phase Voltages of a Four-Level High-Voltage Frequency Converter]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electrotechnical Systems and Complexes*, 2011, No. 19, pp. 174–181. [in Russian].

9. Brylina O.G., Gel'man M.V. Issledovanie trekhfaznogo aktivnogo vypryamitelya napryazheniya [Investigation of a Three-Phase Active Voltage Rectifier]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electrotechnical Systems and Complexes*, 2014, No. 1 (22), pp. 47–50. [in Russian].

10. Radionov A.A., Maklakov A.S. Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti v seti s pomoshch'yu aktivnogo vypryamitelya napryazheniya [Compensation of Reactive Power in Grid with the Help of PWM Boost Rectifier]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electrotechnical Systems and Complexes*, 2013, No. 21, pp. 226–231. [in Russian].

11. Sum K. Kit. Improved Valley-Fill Passive Power Factor Correction Current Shaper Approaches. *IEC Specification Limits*. PCIM Magazine, Feb. 1998.

12. Morrow K., Karner D., Francfort J. *Plug-In Hybrid Electric Vehicle Charging Infrastructure Review*. U.S. Department of Energy, Vehicle Technologies Program, 2008.

13. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Khlyupin P.A. Komp'yuternaya model' sistemy zaryada emkostnogo nakopitelya na osnove induktivno-emkostnogo preobrazovatelya [Computer Model of the Capacitive Storage Charge System Based on Inductive-Capacitive Transducers]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2015, No. 4, pp. 374–390. URL: <http://ogbus.ru/>

issues/4_2015/ogbus_4_2015_p374-390_KonesevSG_ru.pdf. [in Russian].

14. Cheng C.J., Bao S.J., Li C.M. A Facile and Well-Tailored Vanadium Oxide Porous Network for High-Capacity Electrochemical Capacitive Energy Storage. *Materials Letters*, 2014, Vol. 120. DOI: 10.1016/j.matlet.2014.01.111.

15. Konesev S.G., Khazieva R.T. Tendentsii razvitiya induktivno-emkostnykh preobrazovatelei, ikh osnovnye parametry i kharakteristiki [Trends in the Development of Inductive-Capacitive Converters, Their Main Parameters and Characteristics]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye voprosy energetiki»* [Collection of Articles of Scientific Works of International Scientific and Practical Conference «Actual Problems of Energetics»]. Omsk, Izd-vo OmGTU, 2017, pp. 252–255. [in Russian].

16. Konesev S.G., Khazieva R.T. Metody otsenki pokazatelei nadezhnosti slozhnykh komponentov i sistem [Methods for Assessing the Reliability Indicators of Complex Components and Systems]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya» — Electronic Scientific Journal «Modern Problems of Science and Education»*, 2015, No. 1. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=17558>. [in Russian].

17. Danilov A. Modern Industrial Current Sensors. *Modern Electronics*, 2004, Vol. 1. pp. 26–28.

18. Musavi F., Eberle W., Dunford W.G. A Phase Shifted Semi-Bridgeless Boost Power Factor Corrected Converter for Plug in Hybrid Electric Vehicle Battery Chargers. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE*. 2011, pp. 821–828.

19. Konesev S.G., Khazieva R.T., Bochkareva T.A. Mathematical Modeling of Inverter with a Hybrid Resonant Circuit Operation Modes. *2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), ICIE-2018*. Saint-Petersburg, 2018, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.872884.

20. Konesev S.G., Khazieva R.T., Bochkareva T.A. *Induktivno-emkostnyi preobrazovatel'* [Inductive-Capacitive Converter]. Patent RF, 2017. [in Russian].



Комиссаров Д. Р.
Komissarov D. R.

*аспирант, инженер кафедры
«Электрооборудование судов
и автоматизации производства»,
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»,
г. Керчь, Республика Крым,
Российская Федерация*



Бордюг А. С.
Bordyug A. S.

*кандидат технических наук, доцент
кафедры «Электрооборудование судов
и автоматизации производства»,
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»,
г. Керчь, Республика Крым,
Российская Федерация*

УДК 519.7

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-4-28-36

ПРИМЕНЕНИЕ НИКЕЛЬ-ЦИНКОВЫХ БАТАРЕЙ В АВАРИЙНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПАССАЖИРСКОГО СУДНА

Применение новых технологических батарей, например литий-ионных на пассажирских судах, имеет негативное последствие — потенциально высокий ток короткого замыкания. Пассажирское судно ограничивает конструктивные решения для изменения внутреннего пространства судна, поэтому важность работы заключается в обосновании безопасности и надежности в эксплуатации никель-цинковых батарей для сети потребителей 220 В в аварийных ситуациях.

В статье рассмотрены возможности применения никель-цинковых батарей на пассажирских судах в качестве аварийного источника электроэнергии, способы управления и применения в сетях переменного тока. Проблема применения заключается в том, что системы управления на судах отключаются при чрезмерном потреблении тока, такое использование неприменимо с функцией поддержки источника бесперебойного питания (ИБП). Устройство бесперебойного питания обеспечивает непрерывность работы аварийной электроэнергетической системы при обесточивании судна и сохраняет аварийные системы жизнеобеспечения судна в критических ситуациях.

Батарея находится на том же месте, где и батарея в устройстве бесперебойного питания. Разница между батареей ИБП и батареей пассажирского судна заключается в том, что батарея пассажирских судов поддерживает важную систему переменного тока. Эта система питает и поддерживает сети аварийного освещения, радио и телефонии, сигнализации, аварийного питания систем дистанционного управления главными дизелями, рулевого управления и станций сигнальных огней. Как распределенная энергетическая система частью ее конструкции является градуированная схема защиты с токовым и временным различиями между уровнями.

Основными преимуществами по сравнению с аккумуляторной батареей (АКБ) являются объем накапливаемой энергии и отсутствие необходимости в обслуживании. В течение цикла заряда-разряда не происходит выброса газа, что позволит отказаться от необходимости дополнительного вентиляционного оборудования в аккумуляторном помещении. Соединения от герметичных модулей имеют низкий ток, при использовании поляризованных разъемов опасность прикосновений обслуживающего персонала устраняется.

Ключевые слова: никель-цинковая батарея, устройство бесперебойного питания, электроэнергетические системы, пассажирское судно, аварийный источник электроэнергии.

APPLICATION OF NICKEL-ZINC BATTERIES IN THE EMERGENCY POWER SYSTEM OF PASSENGER SHIP

The use of new technological batteries, for example, lithium-ion batteries in passenger ships, has a negative consequence — a potentially high short-circuit current. The passenger ship limits design solutions for changing the interior space of the ship, therefore, the importance of the work is to substantiate the safety and reliability of the operation of nickel-zinc batteries for the 220 V network of consumers in emergency situations.

The article discusses the possibilities of using nickel-zinc batteries on passenger ships as an emergency source of electricity, methods of control and application in alternating current networks. An application problem is that control systems on ships are shut down when excessive current is consumed, this use is not applicable with the uninterruptible power supply (UPS) support function. An uninterruptible power supply device ensures the continuity of the emergency power system in the event of a ship's power outage and preserves the emergency life support systems of the ship in critical situations.

The battery is in the same place as the battery in the UPS. The difference between a UPS battery and a passenger ship battery is that a passenger ship battery supports an important AC system. This system powers and maintains the emergency lighting, radio and telephony, signaling, emergency power supply for main diesel remote control systems, steering and signal light stations. As a distributed power system, part of its design is a graduated protection circuit with current and time differences between levels.

The main advantages over storage batteries (accumulators) are the amount of accumulated energy and no need for maintenance. During the charge-discharge cycle, no gas is emitted, which will eliminate the need for additional ventilation equipment in the battery room. Connections from sealed modules have a low current, when using polarized connectors, the risk of touching the service personnel is eliminated.

Key words: nickel-zinc battery, uninterruptible power supply, power systems, passenger ship, emergency power supply.

Цель работы

Целью работы является изучение проблем преобразования электроэнергии при использовании никель-цинковых батарей в аварийных сетях переменного тока пассажирских судов. Пассажирское судно ограничивает конструктивные решения для изменения внутреннего пространства судна, поэтому важность работы заключается в обосновании безопасности и надежности в эксплуатации никель-цинковых батарей для сети потребителей 220 В в аварийных ситуациях.

Проблема применения заключается в том, что системы управления на судах отключаются при чрезмерном потреблении тока, такое использование неприменимо с функцией поддержки источника бесперебойного питания (ИБП). Устройство бесперебойного питания обеспечивает непрерывность работы аварийной электроэнергетической системы

при обесточивании судна и сохраняет аварийные системы жизнеобеспечения судна в критических ситуациях.

Аварийная электроэнергетическая система переменного тока

В существующих пассажирских судах батарея обеспечивает циклический заряд электроэнергии. Заряд происходит с помощью выпрямителей в максимально короткие сроки и питает аварийную энергосистему переменного тока через инверторы.

Батарея находится на том же месте, где и батарея в устройстве бесперебойного питания. Разница между батареей ИБП и батареей пассажирского судна заключается в том, что батарея пассажирских судов поддерживает важную систему переменного тока. Эта система питает и поддерживает сети аварийного освещения, радио и телефонии, сигнализации, аварийного питания систем дистан-

ционного управления главными дизелями, рулевого управления и станций сигнальных огней [1]. Как распределенная энергетическая система частью ее конструкции является градуированная схема защиты с токовым и временным различиями между уровнями.

На рисунке 1 показана принципиальная схема аварийной электроэнергетической системы переменного тока.

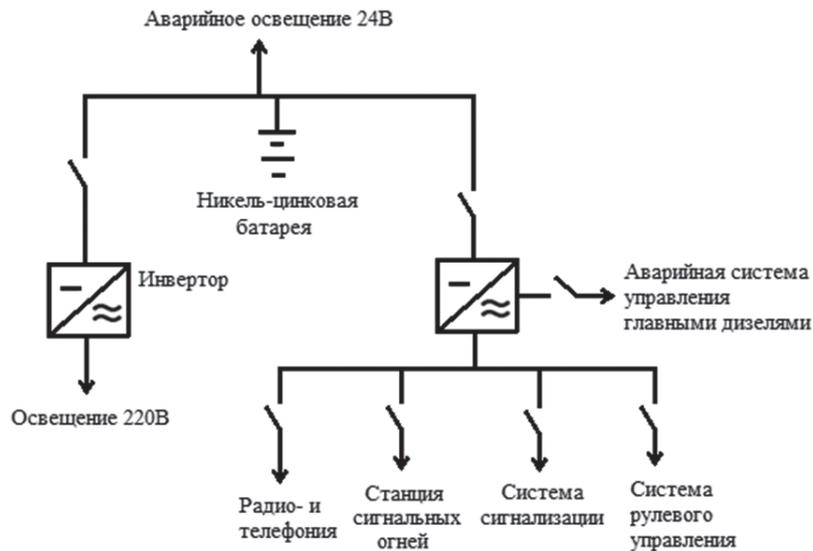


Рисунок 1. Принципиальная схема аварийной электроэнергетической системы переменного тока

деляется падением напряжения в конце глубокого разряда батареи. Технологии с применением данных батарей должны работать в диапазоне, близком к номинальному.

Потенциальный ток разряда может составлять до 300 А. В аккумуляторной батарее (АКБ) подача этого тока значительно снижает выходное напряжение, еще больше увеличивая ток для питания потребителей [2–4].

АКБ требует периодической эксплуатации с регулярными задачами по измерению уровня кислоты и плотности электролита, периодическим пополнением ячеек дистиллированной водой и проверкой болтовых соединений между ними. Открытые соединения представляют опасность прикосновения для обслуживающего персонала и короткого замыкания.

Заряд аккумулятора приводит к выделению водорода, который легко воспламеняется в широком диапазоне концентраций, вследствие чего образуется сернокислотный туман.

Функциональные характеристики батарей

Электроэнергетическая система переменного тока работает при номинальном напряжении 220 В, которое можно согласовать, выбрав нужное количество ячеек последовательно. Однако свинцово-кислотную батарею необходимо периодически заряжать, что ставит верхний предел рабочего диапазона системы в 260 В. Нижний предел 170 В опре-

Физическое воздействие — не менее важная задача для электрической связи. Батарея АКБ весит 3 т и расположена на верхних палубах в непосредственной близости к пассажирскому салону [5–8].

Объем, доступный для замены, фиксируется к объему существующего аккумуляторного помещения. Воздействие солнечных лучей на поверхность палубы значительно повышает температуру помещения аккумуляторных батарей, что недопустимо при выделении сернокислотного тумана, а так как невозможно конструктивно изменять помещение, необходимо применять кондиционеры воздуха для поддержания микроклимата и проветривания помещения [9]. В таблице 1 обобщены соображения по проектированию.

Предлагаемое решение основано на химической паре: никель — цинк (Ni–Zn). На рисунке 2 показан химический цикл.

Пара никель — цинк была запатентована Томасом Эдисоном в 1901 г., но не имела коммерческого успеха из-за проблем с сохранением стабильности цинкового анода при повторяющихся циклах заряда-разряда [10, 11]. За последние несколько лет исследователи изменили детали рецептуры электролита, чтобы преодолеть недостатки.

Ni-Zn был идентифицирован как лидер по основному применению батарей, в котором

рассматривался и оценивался широкий спектр химических веществ, включая вариации свинцовой кислоты, никель-сульфура и альтернативные составы ионов лития. На рисунке 3 показаны сравнительные результаты, аналогичные тем, которые были выявлены при поиске технологии.

Было два параллельных, конкурирующих исследования: одно базировалось на основе запатентованного литиевого элемента, а дру-

Таблица 1. Соображения по конструированию литий-ионных батарей

Данные	Характеристики
Номинальный ток нагрузки:	300 А
Диапазон напряжений:	170–260 В, номинальный 220 В
Емкость:	90 А ч в течение 5 ч
Выбросы при нормальной эксплуатации:	Водород (при применении уравнивающего заряда)
Вес (сравнительный):+	3 т
Активный объем ячейки:	0,2 м ³
Опасность для персонала:	Туман серной кислоты; открытые сильноточные клеммы и звенья
Вспомогательное оборудование:	Дистиллированная вода (доливка ячейки); вентиляция; гидрометр и датчики уровня электролита

- **Анодный материал :** Цинк / Оксид цинка
- **Электролит :** Водный Гидроксид Калия
- **Катодный материал :** Никель-оксигидроксид / Гидроксид никеля



- Номинальное напряжение 1.73 V
- Экзотермическая реакция разряда

Рисунок 2. Никель-цинковый цикл



Рисунок 3. График сравнения литий-ионных, свинцово-кислотных и Ni-Zn батарей

гое — с использованием Ni–Zn. Оба типа ячеек имели одинаковую мощность, примерно 10–12 А·ч. Ni–Zn был выбран для АКБ, так как предполагались более простая физическая интеграция с судном и меньший риск в вопросах безопасности [12].

В результате базовая ячейка, используемая для этой разработки, имеет емкость 12 А·ч, призматическую конструкцию для более плотной упаковки, а водный электро-

Таблица 2. Характерные особенности

Данные	Характеристики
Ячейка	Призматическая
Номинальная мощность при 10-часовой работе	12 А ч – 5,8 кВт ч
Мощность энергии	6 Вт ч/кг
Плотность энергии	13 Вт ч/л
Принятие заряда	Эндотермическое
Водная химия	Электролит гидроксида калия
Техническое обслуживание	Не требуется доливка или заправка
Процесс переработки	Циклический



Рисунок 4. Вид среза ячейки Ni-Zn

0,3 м³ и весе, сравнимом с ячейками АКБ. 15 из этих модулей затем соединяются параллельно, образуя накопитель энергии мощностью 180 А·ч, 88 кВт·ч. Это вдвое больше,

лит гидроксида калия поглощается в сепаратор между катодной и анодной пластинами. Конструкция ячейки не выделяет опасные газы при зарядке (или разрядке). В таблице 2 представлены характерные особенности ячейки, а рисунок 4 представляет собой частичный вид среза.

Для построения полной батареи 15 ячеек будут соединены последовательно, образуя модуль 220 В, 12 А·ч, 5,8 кВт·ч в объеме

чем у установленной в настоящее время батареи АКБ, и она может поместиться в то же аккумуляторное помещение. Для цепочки ячеек не требуется никаких мер по распределению напряжения, а модули не нуждаются в каких-либо мерах по распределению нагрузки.

Набор модулей не требует активной системы управления в отличие от других высокоэнергетических систем на основе литий-ионных. Накладные расходы (по объему) на оборудование при использовании батарей делают литий-ионные батареи непривлекательными для эксплуатации. В таблице 3 показано, как потенциально новая Ni–Zn батарея оценивается с точки зрения мощности и безопасности [13].

Основными улучшениями по сравнению с АКБ являются объем накапливаемой энергии и отсутствие необходимости в обслуживании. В течение цикла заряда-разряда не происходит выброса газа, что позволит отказаться от необходимости дополнительного вентиляционного оборудования в аккумуляторном помещении. Соединения от герметичных модулей имеют низкий ток, используя поляризованные разъемы, опасность прикосновения к обслуживающему персоналу устраняется.

Таблица 3. Соображения по конструированию Ni-Zn батарей

Данные	Характеристики
Номинальный ток нагрузки:	400 А
Диапазон напряжений:	180–260 В, номинальный 220 В
Емкость:	180 А ч в течение 5 ч
Выбросы при нормальной эксплуатации:	Нет
Вес (сравнительный):	2,8 т
Активный объем ячейки:	0,3 м ³
Опасность для персонала:	Нет никаких выбросов в атмосферу, безопасность при прикосновении
Вспомогательное оборудование:	Система дистанционного мониторинга

Короткое замыкание небольшой группы ячеек приводит к повышению температуры на 150 °С и выходу пара из электролита, но при этом не происходит разрушения ячеек или их взрыва.

Еще одним эксплуатационным отличием от АКБ является уменьшенный диапазон напряжений от полностью заряженного до полностью разряженного (рисунок 5). Нет никаких ограничений на скорость перезарядки, так как

химический процесс во время зарядки является эндотермическим: ячейки имеют тенденцию охлаждаться при зарядке. Номинальный ток разряда ($C/4$, где C — числовое значение ампер-часовой емкости элемента) достаточно низок, повышение температуры считается минимальным (± 50 °С).

Однако, как и другие химические соединения с высокой мощностью или энергией, Ni-Zn имеет низкое сопротивление и высо-

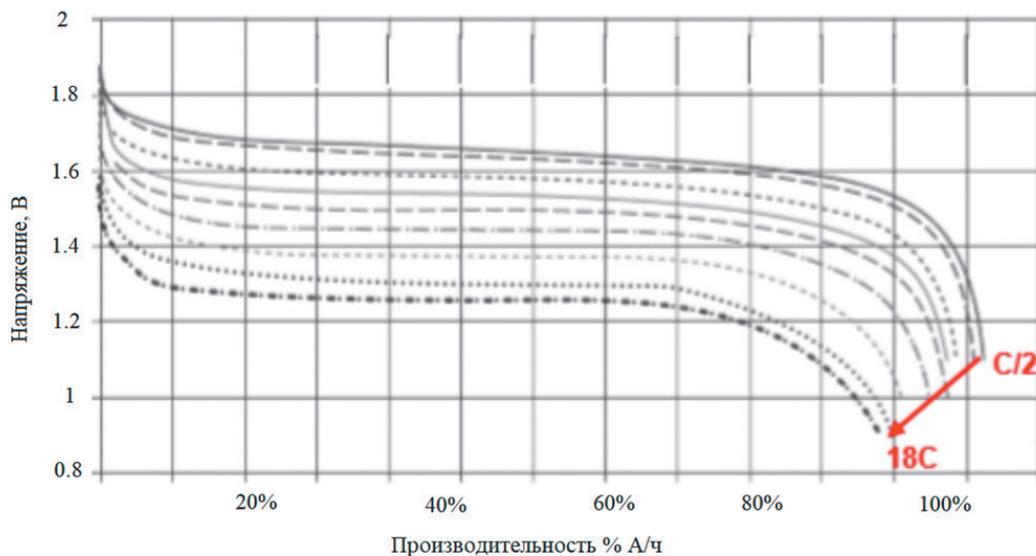


Рисунок 4. Вид среза ячейки Ni-Zn

кий ток короткого замыкания. Числовое значение ампер-часовой емкости элемента равно 40С. Это означает, что для мощности 160 А·ч предполагаемый ток короткого замыкания очень высок.

Система защиты батареи от тока перегрузки/короткого замыкания

Существует ряд возможностей для управления потенциальным током короткого замы-

кания, но большинство из них имеют серьезные недостатки.

— *Высокоскоростные автоматические выключатели.* Одна из версий этих устройств работает путем отвода тока в твердотельное устройство, затем размыкает механические контакты за 100 мкс, а затем отключает твердотельный байпас. Проблема этих устройств заключается в том, что номинальные параме-

тры устройства далеко не соответствуют спецификации тока нагрузки более 400 А, а прерывание менее чем за 1 мс не обеспечивает защиту от тока в заданных промежутках времени.

— *Твердотельные автоматические выключатели* основаны на IGBT или встроенном тиристоре с управляемым затвором (IGCT). Это обеспечит время переключения 10 мкс, но не сможет обеспечить постоянный ток, который требуется для цепи инвертора. Еще одна проблема с твердотельным переключателем — это потери при работе, силовой транзистор или тиристор будет иметь прямое падение напряжения около 2 В. Потери при 400 А составят 800 Вт, что потребует для системы принудительного охлаждения. Шунтирование твердотельного устройства с помощью механического переключателя для уменьшения потерь возвращает к проблеме времени работы — 10–15 мс. Кроме того, твердотельный переключатель должен быть постоянно рассчитан на сквозной ток (~ 500 А).

— *Дополнительное сопротивление.* В батарею может быть встроено сопротивление, что ограничит ток короткого замыкания в 500 А. При внутренней ЭДС 220 В необходимо общее сопротивление 5 МОм, что приведет к падению напряжения на 20 В при номинальном разряде 400 А и потере 800 Вт, что является недопустимым [14, 15].

Напряжение батареи 220 В достаточно низкое, чтобы для коммутации можно было использовать мощные МОП-транзисторы (МОП-транзистор переключается между высоким и низким сопротивлением под воздействием потенциала затвора). Подходящая конструкция будет иметь сопротивление включения 0,1 МОм. При 400 А потери устройства составляют 160 Вт, а падение напряжения всего 40 мВ, что очень выгодно отличается от потерь 800 Вт и падения 2 В в тиристорном переключателе. Однако реализация этой конструкции с использованием доступных устройств потребовала бы сотен переключателей в жесткой параллели и все еще требовала бы принудительного охлаждения.

Одним из решений является подключение в цепь токоограничивающего резистора, когда нагрузка на модуль превышает допустимый показатель перегрузки. Резистор имеет кратковременный номинальный ток (ток подается только в течение 500 мс), поэтому избыточная энергия нагревает основную часть резистора, затем энергия рассеивается в окружающую среду после окончания события неисправности.

Использование МОП-транзистора с токоограничивающим резистором обеспечивает низкое падение напряжения твердотельного коммутатора и потери проводимости, а также сверхбыстрое управление током, но не обе-

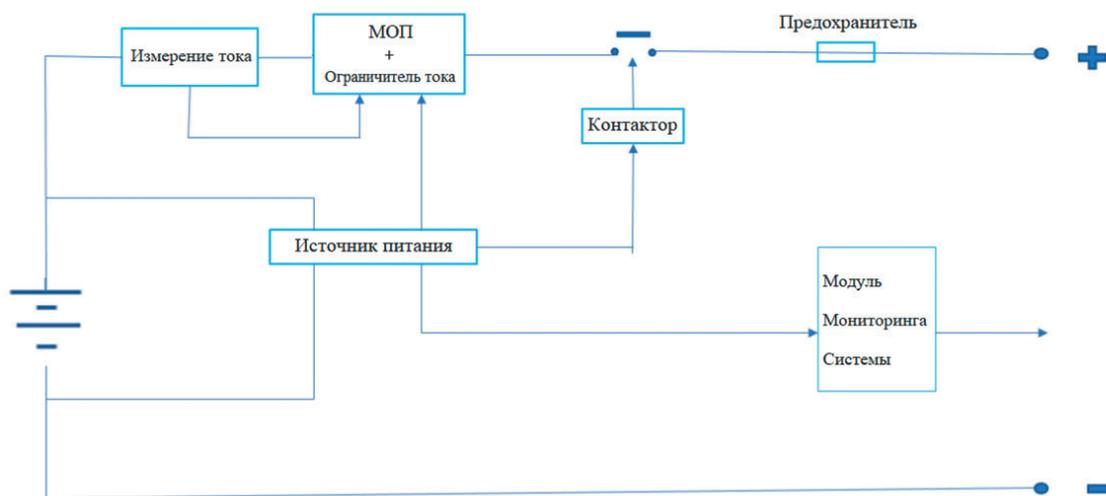


Рисунок 6. Принципиальная схема твердотельного коммутатора на основе МОП-транзистора с токоограничивающим резистором

спечивает изоляцию модуля и не определяет, что происходит за пределами 500-миллисекундного рабочего периода. Для этого сетевой провод включает в себя однополюсный контактор или реле и предохранитель. Они выбираются для пропускного тока более 400 А; реле может прервать его по истечении 500 мс, если внешняя неисправность сохранится [16]. На рисунке 6 кратко представлена схема твердотельного коммутатора.

Выводы:

По сравнению с АКБ Ni–Zn батареи накапливают вдвое больше энергии и не требуют постоянного контроля в их эксплуатации, а в течение цикла заряда-разряда не происходит выброса газа, что позволит

отказаться от необходимости дополнительного вентиляционного оборудования в аккумуляторном помещении. Ni–Zn батареи не требуют дополнительной системы охлаждения, а соединения от герметичных модулей имеют низкий ток, используя поляризованные разъемы, опасность прикосновения обслуживающего персонала устраняется. Короткое замыкание не приводит к разрушению ячеек или их взрыву.

Использование МОП-транзистора с токоограничивающим резистором обеспечивает низкое падение напряжения твердотельного коммутатора и потерю проводимости, а также защищает батарею от тока перегрузки и короткого замыкания.

Список литературы

1. Пионтковский Б.А. Эксплуатация электрических аккумуляторов на предприятиях электросвязи: учебник для вузов. М.: Связь, 1988. 248 с.
2. Кашкаров А.П. Аккумуляторы: справ. пособие. М.: ИП РадиоСофт, 2014. 192 с.
3. Хрусталева Д.А. Аккумуляторы. М.: Изумруд, 2003. 224 с.
4. NR Battery Energy Storage System Application Solution-RU 19.2.28. URL: <http://nrec.com/ru/web/upload/2019/05/10/15574682910935xy18v.pdf>.
5. Аккумуляторы // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона: в 86 т. Т. 82 и 4 доп. СПб., 1890–1907.
6. Шумик С.В., Савич Е.Л. Техническая эксплуатация аккумуляторов. М.: Высшая школа, 2006. 220 с.
7. Болтовский В.И., Вайсгант З.И. Эксплуатация, обслуживание и ремонт свинцовых аккумуляторов. Л.: Энергоатомиздат, 2006. 180 с.
8. Инструкция по эксплуатации стационарных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей в составе ЭПУ на объектах ВСС России / Утв. Госкомсвязи России 13.05.98: ввод в действие с 13.05.98. М.: ЛОНИИС, 1998. 64 с.
9. ГОСТ 12.1.005. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей

зоны / Введ. 01.01.89. М.: Изд-во стандартов, 1991. 15 с.

10. Особенности заряда и разряда литиевых аккумуляторных батарей и современные технические средства управления этими процессами. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-zaryada-i-razryada-litievyyh-akkumulyatornyh-batarey-i-sovremennye-tehnicheskije-sredstva-upravleniya-etimi-protsessami/viewer>.

11. Алгоритмы заряда свинцово-кислотных батарей. URL: <https://www.drive2.ru/l/490695822753661142>.

12. Булатов В.Н., Даминов Д.А. Основы проектирования и конструирования РЭА: учеб. пособие. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2006. 288 с.

13. ГОСТ Р МЭК 60896-2-99. Свинцово-кислотные стационарные батареи. Общие требования и методы испытаний. Закрытые типы / Введ. 2000-01-28. М.: Изд-во стандартов, 1999. 21 с.

14. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: учеб. пособие. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1991. 622 с.

15. Быстров Ю.А., Мироненко И.Г. Электронные цепи и устройства: учебник для вузов. СПб.: Энергоатомиздат, 1999. 512 с.

16. Хлуденев А.В. Автоматизированное проектирование электронных устройств: методические указания. Оренбург: ГОУ ОГУ, 1999. 30 с.

References

1. Piontkovskii B.A. *Ekspluatatsiya elektricheskikh akkumulyatorov na predpriyatiyakh elektrosvyazi: uchebnik dlya vuzov* [Operation of Electric Batteries at Telecommunication Enterprises: Textbook for Universities]. Moscow, Svyaz' Publ., 1988. 248 p. [in Russian].
2. Kashkarov A.P. *Akkumulyatory: spravochnoe posobie* [Batteries: Reference Guide]. Moscow, IP RadioSoft Publ., 2014. 192 p. [in Russian].
3. Khrustalev D.A. *Akkumulyatory* [Batteries]. Moscow, Izumrud Publ., 2003. 224 p. [in Russian].
4. *NR Battery Energy Storage System Application Solution-RU 19.2.28*. URL: <http://nrec.com/ru/web/upload/2019/05/10/15574682910935xy18v.pdf>.
5. *Akkumulyatory. Entsiklopedicheskii slovar' Brokgauza i Efrona: v 86 t. T. 82 i 4 dop.* [Batteries. Brockhaus and Efron Encyclopedic Dictionary: In 86 Vol. (Vol. 82 and Add. 4)]. Saint-Petersburg, 1890-1907. [in Russian].
6. Shumik S.V., Savich E.L. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya akkumulyatorov* [Technical Maintenance of Batteries]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 220 p. [in Russian].
7. Boltovskii V.I., Vaisgant Z.I. *Ekspluatatsiya, obsluzhivanie i pemont svintsovykh akkumulyatorov* [Operation, Maintenance and Repair of Lead-Acid Batteries]. Leningrad, Enepgoatomizdat, 2006. 180 p. [in Russian].
8. *Instruktsiya po ekspluatatsii stantsionarnykh svintsovo-kislotnykh akkumulyatornykh batarei v sostave EPU na ob"ektakh VSS Rossii. Utv. Goskomsvyazi Rossii 13.05.98: vvod v deistvie s 13.05.98* [Operating Instructions for Stationary Lead-Acid Rechargeable Batteries as Part of the EPU at the Facilities of the VSS of Russia: Approved by Goskomsvyaz of Russia 13.05.98: Introd. 13.05.98]. Moscow, LONIIS Publ., 1998. 64 p. [in Russian].
9. *GOST 12.1.005. Obshchie sanitarnogigienicheskie trebovaniya k vozdukh u rabochei zony. Vved. 01.01.89* [State Standard 12.1.005. General Sanitary and Hygienic Requirements for the Air in the Working Area. Introd. 01.01.89]. Moscow, Izd-vo standartov, 1991. 15 p. [in Russian].
10. *Osobennosti zaryada i razryada litievykh akkumulyatornykh batarei i sovremennye tekhnicheskie sredstva upravleniya etimi protsessami* [Features of the Charge and Discharge of Lithium Storage Batteries and Modern Technical Means of Controlling These Processes.] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-zaryada-i-razryada-litievyyh-akkumulyatornyh-batarey-i-sovremennye-tehnicheskie-sredstva-upravleniya-etimi-protsessami/viewer>. [in Russian].
11. *Algoritmy zaryada svintsovo-kislotnykh batarei* [Algorithms for Charging Lead-Acid Batteries]. URL: <https://www.drive2.ru/l/490695822753661142>. [in Russian].
12. Bulatov V.N., Daminov D.A. *Osnovy proektirovaniya i konstruirovaniya REA: uchebnoe posobie* [Basics of Designing and Constructing Electronic Equipment: Textbook]. Orenburg, GOU OGU Publ., 2006. 288 p. [in Russian].
13. *GOST R MEK 60896-2-99. Svintsovo-kislotnye stantsionarnye batarei. Obshchie trebovaniya i metody ispytaniy. Zakrytye tipy. Vved. 2000-01-28* [State Standard R IEC 60896-2-99. Lead-Acid Stationary Batteries. General Requirements and Test Methods. Closed Types. Introd. 2000-01-28]. Moscow, Izd-vo standartov, 1999. 21 s. [in Russian].
14. Gusev V.G., Gusev Yu.M. *Elektronika: uchebnoe posobie* [Electronics: Textbook]. 2-e izd. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 622 p. [in Russian].
15. Bystrov Yu.A., Mironenko I.G. *Elektronnyye tsepi i ustroystva: uchebnik dlya vuzov* [Electronic Circuits and Devices: Textbook for Universities]. Saint-Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1999. 512 p. [in Russian].
16. Khludenev A.V. *Avtomatizirovannoe proektirovanie elektronnykh ustroystv: metodicheskie ukazaniya* [Computer-Aided Design of Electronic Devices: Guidelines]. Orenburg, GOU OGU Publ., 1999. 30 p. [in Russian].



Root D. I.
Root D. I.

курсант кафедры
«Энергетические установки
и электрооборудование
судов»,
ФГБОУ ВО «Камчатский
государственный
технический университет»,
г. Петропавловск-
Камчатский,
Российская Федерация



Rogozhnikov A. O.
Rogozhnikov A. O.

курсант кафедры
«Энергетические установки
и электрооборудование
судов»,
ФГБОУ ВО «Камчатский
государственный
технический университет»,
г. Петропавловск-
Камчатский,
Российская Федерация



Tolstova L. A.
Tolstova L. A.

доцент кафедры
«Энергетические установки
и электрооборудование
судов»,
ФГБОУ ВО «Камчатский
государственный
технический
университет»,
г. Петропавловск-
Камчатский,
Российская Федерация

УДК 621.311

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-4-37-45

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СУДОВОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ

Современное судно обязательно оснащается автономной судовой энергетической системой (СЭС), где вырабатывается, распределяется и потребляется электрическая энергия. На судне множество технических средств, но СЭС является приоритетом. Обратившись к ретроспективе, видим, что система поступательно развивалась, впитывая последние достижения электротехнической отрасли и автоматизации. Сегодня современные суда из поколения в поколение повышают грузоподъемность, двигаются с большей скоростью, тотально электрифицируются, а также автоматизируется всё большее число процессов. На судах устанавливаются электростанции, из поколения в поколение повышающих мощность. К сегодняшнему дню СЭС генерируют несколько тысяч киловатт. Управление электростанциями на судах осуществляется автоматически через особые системы, защищающие генераторы от перегрузок, стабилизирующие частоту, не допуская резких изменений напряжения. Невозможно сопоставить обстановку, в которой работает судовое электрооборудование, с теми условиями, которые происходят на берегу. На судах электрооборудование должно выдерживать такие факторы, как постоянно проявляющиеся крен и дифферент, вибрационные и ударные воздействия, перегрев и повышенную влажность воздушной среды, невозможность быстро доставить оборудование на ремонтную базу. Следовательно, надёжность судовых электроустановок как ремонтнопригодных регулируется особыми требованиями. К настоящему моменту корабли оснащены автоматическим управлением, которое подает сигналы на разнообразные установки и системы. Позитивно, что энергетические объекты судна управляются автоматически. Максимальный уровень автоматизации в системе получен на всех звеньях, подключенных к электростанции, где оперативность переходных процессов актуализирует применение автоматики, а человеческие реакции несовершенны и не настолько быстры. Статья посвящена обзору решений, в ходе которых судовые энергетические системы модернизируются, качество электроэнергии повышается, электропотребители судна снабжаются более надёжно, а в итоге параллельно работающие генераторы действуют стабильно, тогда как число единиц команды, обслуживающее установки СЭС, снижается.

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, система автоматического управления, судовая энергетическая система, техническая эксплуатация, модернизация, электроэнергетическая система, судовая электростанция, автоматизация, функциональность, надежность, эффективность.

MODERNIZATION OF SHIP POWER COMPLEX BY ITS ELEMENTS MODIFICATION

A modern ship is necessarily equipped with an autonomous ship power system (SPS), where electricity is generated, distributed and consumed. There are many technical facilities on the ship, but SPS is a priority. Looking back, we see that the system has been progressively developing, absorbing the latest achievements of the electrical industry and automation.

Today modern ships from generation to generation increase the carrying capacity, move at a higher speed, totally electrify, and more and more processes are automated. Power plants are installed on ships that increase power from generation to generation. To date, SPS generates several thousand kilowatts. Power plants on ships are controlled automatically through special systems that protect the generators from overloads, stabilize the frequency, avoiding voltage jumps.

It is not possible to compare the environment in which the ship's electrical equipment operates with those occurring ashore. On ships, electrical equipment must withstand such factors as constantly manifesting roll, trim on the bow or stern, vibration and shock effects, overheating and high humidity of the air, the inability to quickly deliver the equipment to the repair base. Consequently, the reliability of ship electrical installations as maintainable is regulated by special requirements.

To date, the ships are equipped with automatic control, which sends signals to a variety of installations and systems. It is positive that the ship's energy facilities are controlled automatically. The maximum level of automation in the system has been achieved at all links connected to the power plant, where the efficiency of transient processes actualizes the use of automation, and human reactions are imperfect and not so fast.

The article is devoted to an overview of solutions, during which the ship's power systems are modernized, the quality of electricity increases, the ship's electrical consumers are supplied more reliably, and as a result, the parallel operating generators operate stably, while the number of team units serving the SPS installations decreases.

Key word: ship power plant, automatic control system, ship power system, technical operation, modernization, electric power system, ship power plant, automation, functionality, reliability, efficiency.

Электроэнергетическая система — это полноценный комплекс общесудового электрооборудования, кабельных трасс, механизмов и распределительных устройств, предназначенный для производства и потребления электрической энергии [1].

Судовая энергетическая установка работает надежно и стабильно, если производитель не нарушил высокого качества электрооборудования, изготавливая механизм, а также надежность зависит от освоения широкого спектра автоматических контролирующих устройств, возможности управлять и регулировать режимы работы, применяя последние достижения таких научных отраслей, как электротехника, радиодело и цифровые технологии.

Создание проекта судовой энергетической системы (СЭС) для судна видится особенно сложным в курсе электротехнической части, так как задача имеет характер многоцелевой, должна учитывать разнообразие режимов работы, согласно которым действуют электроэнергетические системы, электроприводы, гребные установки, разнообразные и принципиально непохожие конструкции. В настоящее время Российская Федерация установила курс, требуя развить судоходный транспорт для морских и речных маршрутов, из чего логически вытекает потребность осовременить действующее судовое электрооборудование [2].

Однозначно, что рост мощностей и более высокая сложность СЭС являются первой

предпосылкой усилить автоматизацию. Если на судне установлена электроэнергетическая система, компоненты которой относятся к системе управления, или в ином виде применяются решения по автоматизации как ресурсы, решение называют автоматизированным [3, 4].

Рассматривая ретроспективу судовых систем, в феномене автоматизации актуализируются три ключевых этапа. Первоначально процесс автоматизации распространялся на обособленные узлы или агрегаты, что позволяло автоматизировать отдельные процессы управления и защиты в судовой электроэнергетической системе (рисунок 1).

Затем были автоматизированы наиболее важные системы, обеспечивающие устойчивость судовой электроэнергетики. Дальнейшее их развитие позволило разрозненные системы интегрировать в единый производственный комплекс, что в целом повысило уровень автоматизации судовой электростанции.

Общая схема автоматизации судовой электростанции представлена на рисунке 2.

Следовательно, отдельная система генерирует и распределяет электроэнергию, а другая система отдаёт распоряжения по судовождению, но вызов времени требует подчинить разобщенные системы одному центру управления.

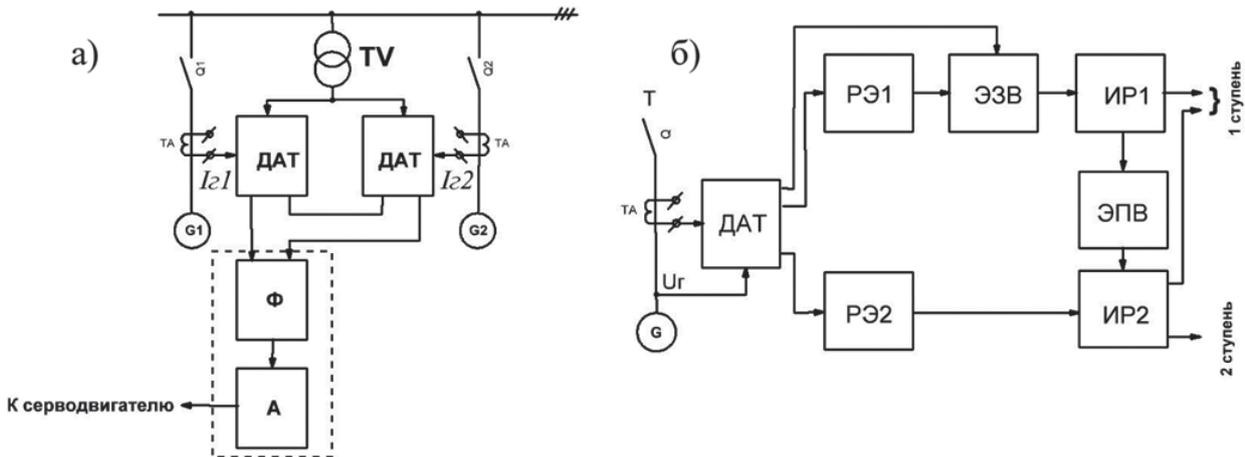


Рисунок 1. Схемы автоматизации процессов судовой электростанции: устройство распределения мощности (а); устройство токовой защиты (б)

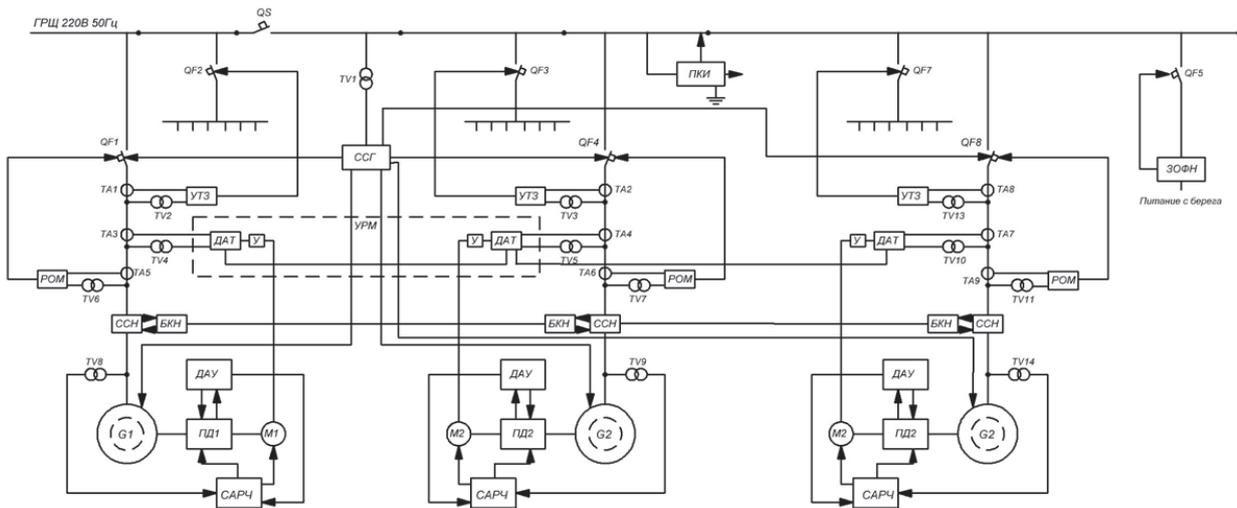


Рисунок 2. Типовая схема автоматизации судовой электростанции

Решая вопрос, в каком объёме рационально автоматизировать судно, обращаются к виду, согласно которому обслуживаются узлы и агрегаты в машинном отделении.

В Регистре автоматизация представлена двумя ключевыми классами:

1. А1 — обслуживание машинных отделений выполняется безвахтенно;
2. А2 — машинное отделение обслуживается в зависимости от хода или стоянки сокращённой вахтенной службой.

В частности, существует возможность обеспечить вахту в дистанционном режиме, когда машинное отделение будет обслуживать только один оператор, принявший смену в ЦПУ [5, 6].

На сегодняшний день для судовых энергетических систем вопрос модернизации направлен на такие векторы:

- по возможности, как можно более полно автоматизировать судовые электрические станции как единый комплекс;
- обеспечить высокую надежность, гибкое и экономичное управление силовыми мощностями, успешно переходить на более высокие частоты или повышать напряжение. Система будет более эффективна экономически, если от главного двигателя будут запитаны все устройства, потребляющие только данный вид энергии, и если шире оснащать крупные корабли установками утилизационной турбогенерации;
- генерировать более высококачественную электроэнергию, что достигается ростом совершенства работы автоматических стабилизаторов и применяемых на судне противоаварийных защит;
- устранить несовершенные аспекты, существующие как конструктивные недоработки узлов, машин, аппаратов, используя эффективные проекты и современные материалы, перейдя на стойкие к износу контакты, применяя эффективные средства дугогашения, а также массово внедряя бесконтактные приборы;
- обеспечить безукоризненные ремонтные и эксплуатационные работы, своевременно очищая, смазывая, окрашивая, просушивая или сменяя подвергшиеся износу ком-

поненты, детали или узлы, совместно с регулировочными и настроечными процедурами, отслеживая ситуацию на аккумуляторах, используя технику, где самодиагностика заложена как автоматический режим [7].

Из электротехнических устройств, которыми оборудовано судно, система СЭС формируется как целостный комплекс, где в условиях плавания или в порту генерируется, преобразовывается, распределяется электроэнергия, чтобы подать питание на приемники или тем потребителям, которые присутствуют на корабле.

Главный двигатель, когда корабль находится в плавании, испытывает значительную нагрузку, так как на крутящий момент нарастает сопротивление движущегося судна, но нагрузка изменяется естественным образом и сложна для описания. Если судно классифицируется как крупнотоннажное, морское волнение не влияет на крутящийся момент. Однако малотоннажные корабли, такие как рыбопромысловый флот, туристические, торговые, научно-исследовательские суда, сталкиваются с тем, что винт частично оголяется, а вращение двигателя происходит с различной частотой, колеблющейся более чем значительно.

Изменившееся погружение винта заставляет откликнуться регулятор, ограничивающий частоту вращения дизельного двигателя. Конструкторы предусмотрели, что сверхнормативная нагрузка на двигатель вызовет срабатывание регулятора нагрузки, после чего шаг винта будет изменён, так как в системе управления был сгенерирован сигнал, управляющий этим механизмом, а шаг снизится. Следовательно, если море волнуется на уровне 9 баллов, предусмотрено стабилизировать шаг винта через автоматические изменения, подав сигнал через механизм, но колеблющаяся частота вращения вала не изменится до равновесия.

Частота вращения регулируется отдельным устройством, части которого изнашиваются, что ведет к сбоям настроек, незапланированным динамическим характеристикам компонентов, обеспечивающих возможность автоматически управлять двигателями, из-за чего дополнительно возрастает вероятность

роста амплитуды, тогда как колебания частоты вращения становятся более продолжительными.

Динамика двигателя нуждается в надёжной компенсации, так как влияние дестабилизирующих факторов нарушает режим работы валового генератора. Задачу решают, установив устройство регуляции, работающее в скользящем режиме и обеспечивающем эффективную работу. Важно дать в числовом выражении оценку того, насколько зависит момент главного двигателя по диапазону изменений под воздействием факторов дестабилизации [8, 9].

Влияние внешних условий в процессе плавания судна на его механический движущий комплекс приводит к возникающим на валопроводе дополнительных колебаний нагрузки. Обеспечение безопасности плавания и качественной технической эксплуатации требует компенсации этих процессов. Проблема будет устранена, внедрив механизм, адаптивно регулирующий изменения, где регулятор активируется для работы в скользящем режиме.

Главный двигатель испытывает воздействие различных моментов сопротивления, которые изменяются в зависимости от направления и силы ветра, волн и других факторов эксплуатации, например сопротив-

ления трала, скованности воды льдом. Переходные процессы характеризуют максимально заметные перемены несвязанного компонента той частоты напряжения, которое развивает валовый генератор.

Параллельная работа валового генератора и дизель-генератора СЭС разлаживается, что выражается в растущем угле ЭДС, зафиксированном на первой и второй установке. Агрегаты начинают обмениваться уравнительными токами. В штормящем море синхронизм будет утрачен валовым генератором, так как коленчатый вал показывает резкие перепады частоты вращения, дестабилизирует главную энергетическую установку.

Потребность уравновесить переходной процесс, баланс которого нарушает эксплуатационные факторы, и стабилизировать частоту, с которой вращается валогенератор, актуализирует изучение концепции работы устройства с адаптивным принципом регуляции, включающимся в скользящем режиме. Также необходимо произвести численную оценку эквивалентного воздействия эксплуатационных факторов как основной дестабилизирующей причины нормальной работы судовой установки. Допустимые отклонения параметров напряжения и частоты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристика качества судовой электроэнергетики

Параметры, %	Режим		
	длительный	повторно-кратковременный	кратковременный
Напряжение постоянного тока U (В)	- 4,0 + 4,0	- 6,0 + 6,0	- 8,0 + 8,0
Напряжение переменного тока U (В)	- 1,5 + 1,5	- 7,0 + 4,0	- 20,0 + 9,0
Частота f (Гц)	2,0 + 2,0	4,0 + 4,0	6,0 + 4,0

Однозначно, что необходимо спроектировать, а затем разработать структурную схему, на которой адаптивная САУ подает сигналы, возбуждая синхронизированный генератор. Это решение станет основой, благодаря которому будет устранена дестабилизация динамических характеристик, когда на генератор поступает изменяющийся ток возбуждения, а оборудование судна получает резко изменяющееся напряжение.

Мощность, напряжение и ток связаны следующими зависимостями:

$$I = P / U \tag{1}$$

— для постоянного тока;

$$I = P / \sqrt{3} U \cos \varphi \tag{2}$$

— для переменного трехфазного тока.

Ситуация ярко сказывается на безопасности, когда судно вышло в плавание, где сильно воздействие дестабилизирующих эксплуатационных факторов [10, 11].

К настоящему моменту практика судоводных компаний показывает, что СЭС заменяются под корпоративные требования, из-за чего массово производятся замены на уста-

новки, предложенные иностранными производителями, повышая функциональность и эффективность судов. Между тем, не утратили силу регламенты Морского регистра и международные нормативно-правовые акты, где раскрыты требования по эксплуатации установленного на судах электрооборудования, режимы работы и использование подобных агрегатов. Изучив регламенты, заявим, что отечественные нормы не совпадают с требованиями актуальных международных стандартов.

В отдельных случаях судно, где было установлено электрооборудование от зарубежного производителя, страдает из-за частых автоматических отключений от сетевого питания. Следовательно, электроток не поступает бесперебойно, а судно подвергается угрозе. Обстоятельство связано с тем, что пиковая нагрузка является чрезмерной, а электроавтоматика установленного на корабле источника электротока не способна генерировать электрическую энергию заданной частоты и напряжения.

Однозначно, что процесс модернизации СЭС должен происходить при четком акценте на энергосбережение, а любые новые устройства, модернизирующие СЭС, должны отвечать критерию соответствующей технологичности. Подобные требования имеют особый вес для рыболовецких судов, где энергопотребление достигает значительного объёма.

Обоснованием модернизации служит не только удешевление выхода в плавание, где будет потребляться меньше энергетических ресурсов, а также необходимость перевести мореплавание в более безопасный и экологичный формат, что выгодно для владельцев судов.

Однозначно, что кардинально обновить отечественную флотилию, ведущую рыбный промысел, затратно с точки зрения вложения капитала. Но затруднения в данной сфере могут быть устранены, если рационально модернизировать СЭС, внедряя современные модели агрегатов, улучшенных и технологически совершенных, КПД которых достигает уровня мировых требований [12, 13].

В подобном случае судно модернизируют частично, а замене подлежат только силовые

установки и системы управления. Не менее актуально для рыболовецкого флота решение повысить мощность разнообразных потребителей на корабле, из-за чего просчитывается прибавка для СЭС по критерию мощности, а в процессе модернизации система дополняется синхронными генераторами или повышается мощность действующих.

Логично, что, модернизировав судно, владелец несет дополнительные затраты, так как действующие генераторы подлежат демонтажу, усилению, а затем установке на прежнее место. Переоборудуя СЭС, необходимо ориентироваться, что основной потребитель электроэнергии будет представлен электрическими машинами, питающимися не только от постоянного, но и от переменного тока. Следовательно, генераторные мощности должны соответствовать той нагрузке, которая в совокупности необходима потребителям, обязательно должны учитываться разнообразные режимы, где среди динамических особый акцент ставится на пусковом режиме как наиболее энергоёмком. Однозначно, что траловый комплекс развивает различные уровни мощности, учитывая массу улова, из-за чего лебёдка, присоединенная к валу электродвигателя, даёт основную нагрузку. Важно просчитать максимальный вес трала, вписавшись ниже верхнего предела мощности, который генерирует действующая на корабле СЭС [14, 15].

Вывод

Одним из вариантов, позволяющих модернизировать СЭС, рассматривается демонтаж изношенного и технически не современного дизель-генератора, отказ от применения аварийно-предупредительной сигнализации. Но необходимо внедрить решение, на основании которой СЭС будет управляться дистанционно, оператором из рулевой рубки. Подбирая для монтажа новый дизель-генератор, следует учесть актуальные технико-эксплуатационные характеристики, улучшив функциональные возможности корабля, отличные от тех, которые обеспечивал демонтированный агрегат. Подобный сценарий модернизации не заставит вносить изменения в конструкцию корпуса, изменять общесудовые системы.

Список литературы

1. Сенков Г.И. Судовые энергетические установки, их эксплуатация и ремонт: учебник. Л.: Судостроение, 1983. 272с.
2. Белов О.А., Парфёнкин А.И. Электротехника и электроника на судах рыбопромыслового флота: учебное пособие. М.: Моркнига, 2017. 344 с.
3. Баранов А.П. Автоматическое управление судовыми электроэнергетическими установками. М.: Транспорт, 1981. 329 с.
4. Белов О.А., Мясников Г.С. Внедрение комплексной защиты судовых асинхронных электроприводов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: матер. Второй междунар. науч.-техн. конф. 2020. С. 73–76.
5. Пантина А.И., Белов О.А. Контроль технического состояния судовых асинхронных двигателей на основе характеристик внешнего электромагнитного поля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. Т. 13. № 1. С. 32–36.
6. Белов О.А., Парфенкин А.И. Системная интеграция контроля электрооборудования // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 1. С. 14–17.
7. Жиленков А.А., Черный С.Г. Исследование автоколебательных процессов в комбинированных автономных электроэнергетических системах // Контроль. Диагностика. 2016. № 5. С. 61–67.
8. Белов О.А. Методология оценки технического состояния электрооборудования при развитии параметрических отказов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2015. № 3. С. 96–102.
9. Белов О.А. Аналитический обзор факторов эффективной эксплуатации морского транспорта // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: матер. Междунар. науч.-техн. конф. 2019. С. 5–9.
10. Белов О.А. Методология анализа и контроля безопасности судна как сложной организационно-технической системы // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2015. № 34. С. 12–18.
11. Белов О.А. Оценка безопасности эксплуатации судовых энергетических установок // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2017. № 42. С. 6–10.
12. Сивоконь В.П., Лапшов Д.В., Белов О.А. Диагностические признаки нестандартного проявления нелинейности в электрических сетях // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2019. № 48. С. 18–27.
13. Гераськин А.К., Белов О.А. Дефектация и настройка судовых автоматических выключателей способом моделирования электромагнитного поля // Образование, наука и молодежь — 2017: матер. науч.-практ. конф. [Электронный ресурс] / Керченский государственный морской технологический университет. 2017. С. 162–166.
14. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPowerSystems и Simulink. СПб.: Питер, 2008. 288 с.
15. Кротенко Д.С., Белов О.А. Моделирование процессов оптимизации режимов судовой электроэнергетической системы при электропитании от береговой сети // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: матер. Второй междунар. науч.-техн. конф. 2020. С. 77–80.

References

1. Senkov G.I. *Sudovye energeticheskie ustanovki, ikh ekspluatatsiya i remont: uchebnik* [Ship Power Plants, Their Operation and Maintenance: Textbook]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1983. 272 p. [in Russian].
2. Belov O.A., Parfenkin A.I. *Elektrotekhnika i elektronika na sudakh rybo-promyslovogo flota: uchebnoe posobie* [Electrical Engineering and Electronics on Water Fishing Vessels: Training Manual]. Moscow, Morkniga Publ., 2017. 344 p. [in Russian].
3. Baranov A.P. *Avtomaticheskoe upravlenie sudovymi elektro-energeticheskimi ustanovkami* [Automatic Control of Ship Power Plants]. Moscow, Transport Publ., 1981. 329 p. [in Russian].
4. Belov O.A., Myasnikov G.S. *Vnedrenie kompleksnoi zashchity sudovykh asinkhron-*

nykh elektroprivodov [Comprehensive Protection Implementation of Asynchronous Electric Drives]. *Materialy Vtoroi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya»* [Materials of Second International Scientific and Technical Conference «Technical Operation of Water Vessels: Problems and Ways of Development»]. 2020, pp. 73–76. [in Russian].

5. Pantina A.I., Belov O.A. Kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya sudovykh asinkhronnykh dvigatelei na osnove kharakteristik vneshnego elektromagnitnogo polya [Technical State Verification of Marine Induction Motor on the Characteristics of External Electromagnetic Field]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekxy i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2017, Vol. 13, No. 1, pp. 32–36. [in Russian].

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

7. Zhilenkov A.A., Chernyi S.G. Issledovanie avtokolebatel'nykh protsessov v kombinirovannykh avtonomnykh elektroenergeticheskikh sistemakh [Investigation of Self-Oscillatory Processes in Combined Autonomous Electric Power Systems]. *Kontrol'. Diagnostika — Monitoring. Diagnostics*, 2016, No. 5, pp. 61–67. [in Russian].

8. Belov O.A. Metodologiya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya pri razvitiy parametricheskikh otkazov [Methodology for Assessing the Technical Condition of Electrical Equipment with the Development of Parametric Failures]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya — Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology*, 2015, No. 3, pp. 96–102. [in Russian].

9. Belov O.A. Analiticheskii obzor faktorov effektivnoi ekspluatatsii morskogo transporta [An Analytical Review of the Factors of Effective Operation of Sea Transport]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi kon-*

ferentsii «Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya». [Materials of the International Scientific and Technical Conference «Technical Operation of Water Transport: Problems and Ways of Development»]. 2019, pp. 5–9. [in Russian].

10. Belov O.A. Metodologiya analiza i kontrolya bezopasnosti sudna kak slozhnoi organizatsionno-tekhnicheskoi sistemy [Methodology of Analysis and Control of Ship Safety as a Complex Organizational and Technical System]. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Kamchatka State Technical University*, 2015, No. 34, pp. 12–18. [in Russian].

11. Belov O.A. Otsenka bezopasnosti ekspluatatsii sudovykh energeticheskikh ustanovok [Safety Assessment of the Ship Power Plants Operation]. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Kamchatka State Technical University*, 2017, No. 42, pp. 6–10. [in Russian].

12. Sivokon' V.P., Lapshov D.V., Belov O.A. Diagnosticheskie priznaki nestandartnogo proyavleniya nelineinosti v elektricheskikh setyakh [Diagnostic Signs of Non-Standard Manifestation of Nonlinearity in Electrical Networks]. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Kamchatka State Technical University*, 2019, No. 48, pp. 18–27. [in Russian].

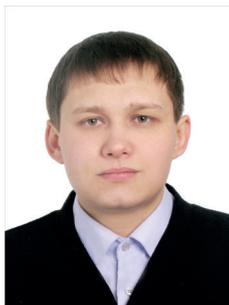
13. Geras'kin A.K., Belov O.A. Defektatsiya i nastroyka sudovykh avtomaticheskikh vyklyuchatelei sposobom modelirovaniya elektromagnitnogo polya [Defect Detection and Adjustment of Marine Automatic Switches by the Method of Electromagnetic Field Simulation]. *Materialy nauchno-prakticheskikh konferentsii «Obrazovanie, nauka i molodezh' — 2017» [Elektronnyi resurs], Kerchenskii gosudarstvennyi morskoi tekhnologicheskii universitet* [Materials of Scientific and Practical Conferences «Education, Science and Youth — 2017» [Electronic Resource], Kerch State Marine Technological University]. 2017, pp. 162–166. [in Russian].

14. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of Electrical Devices in MATLAB SimPowerSystems and Simulink]. Saint-Petersburg, Piter, 2008. 288 p. [in Russian].

15. Krotenko D.S., Belov O.A. Modelirovanie protsessov optimizatsii rezhimov sudovoi elektroenergeticheskoi sistemy pri elektropitanii ot beregovoi seti [Optimization Processes Modeling of the Ship's Electric Power System Mode with Power Supply from the Coastal Network]. *Materialy Vtoroi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya»*. [Materials of the Second International Scientific and Technical Conference «Technical Operation of Water Transport: Problems and Ways of Development»]. 2020, pp. 77–80. [in Russian].



Хазиева Р. Т.
Khazieva R. T.
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



Мухаметшин А. В.
Mukhametshin A. V.
инженер кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», начальник научно-исследовательской лаборатории, ООО НИЦ «Энергодиагностика», г. Уфа, Российская Федерация



Горшенин А. И.
Gorshenin A. I.
студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

УДК 621.317.312

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-4-46-55

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ИСПЫТАНИИ ИЗОЛЯЦИИ

При проектировании источников испытательного напряжения на переменном токе промышленной частоты для регулярной оценки качества изоляции высоковольтного оборудования стоит задача измерения тока, протекающего через испытуемый объект. Авторами разработан алгоритм и предложено техническое решение измерения тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты, в котором используются прецизионный резистор, изолирующий усилитель и аналогово-цифровой преобразователь микроконтроллера. Разработанный алгоритм проведения исследования схемы измерения переменного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты, позволяет повысить скорость разработки измерительных устройств. В ходе исследования стенда схемы измерения переменного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты, создан опытно-промышленный образец, позволяющий производить измерения среднеквадратичного значения тока пределах от 1 до 320 мА. Применение разработанной схемы измерения тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты, позволяет получать среднеквадратичное значение тока в реальном масштабе времени, и, следовательно, оперативно контролировать ток в высоковольтных цепях для постоянного мониторинга. Внедрение данного образца позволит на его базе создавать ряд цифровых измерительных миллиамперметров, позволяющих производить измерение переменного тока в высоковольтных испытательных установках для испытания изоляции объектов от 15 до 200 нФ, в диапазоне от 1 до 1000 мА. Полученные результаты могут быть использованы в технике высокого напряжения для исследования схем измерения тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты.

Ключевые слова: испытание изоляции, повышенное напряжение, переменное синусоидальное напряжение, высоковольтная испытательная установка, промышленная частота, испытуемый объект.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE ACCURATE MEASUREMENT SCHEME FOR INSULATION TESTS

When designing test voltage sources with AC power frequency for regular assessment of the insulation quality of high-voltage equipment, the task is to measure the current flowing through the test object. The authors have developed an algorithm and proposed a technical solution for measuring the current flowing through the test object when testing insulation with an alternating sinusoidal voltage of industrial frequency, which uses a precision resistor, an isolation amplifier and an analog-to-digital Converter of a microcontroller. The developed algorithm for the study of the circuit for measuring the alternating current flowing through the test object when testing the insulation with an alternating sinusoidal voltage of the industrial frequency makes it possible to increase the speed of developing measuring devices. During the study of the stand of the circuit for measuring the alternating current flowing through the tested object when testing the insulation with an alternating sinusoidal voltage of industrial frequency, an experimental industrial sample was created that makes it possible to measure the rms current value within the range from 1 to 320 mA. The use of the developed circuit for measuring the current flowing through the test object when testing insulation with an alternating sinusoidal voltage of industrial frequency, allows you to obtain the rms current value in real time, and, therefore, to quickly monitor the current in high-voltage circuits for continuous monitoring. The introduction of this sample will make it possible, on its basis, to create a number of digital measuring milliammeters that allow measuring alternating current in high-voltage test installations for testing the insulation of objects from 15 to 200 nF, in the range from 1 to 1000 mA. The results obtained can be used in high voltage technology to study circuits for measuring the current flowing through the test object when testing insulation with an alternating sinusoidal voltage of industrial frequency.

Key words: insulation test, overvoltage, alternating sinusoidal voltage, power frequency, high voltage test rig, test object.

В процессе эксплуатации изоляция высоковольтного электрооборудования подвергается электрическим, тепловым, механическим и другим видам воздействия. Данные виды воздействия на изоляцию вызывают в ней тяжелые необратимые изменения, которые, как правило, приводят к преждевременному старению. Для поддержания ее в работоспособном состоянии, согласно требованиям ГОСТ 1516.3-96, ПУЭ, ПТЭЭП, заводским нормам и руководящим документам, требуется регулярная оценка качества изоляции. Одним из основных видов оценки качества изоляции высоковольтного электрооборудования является испытание повышенным переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты, после которого выносится окончательное решение о возможности ее дальнейшей работы. В качестве источника высокого переменного напряжения промышленной частоты применяется

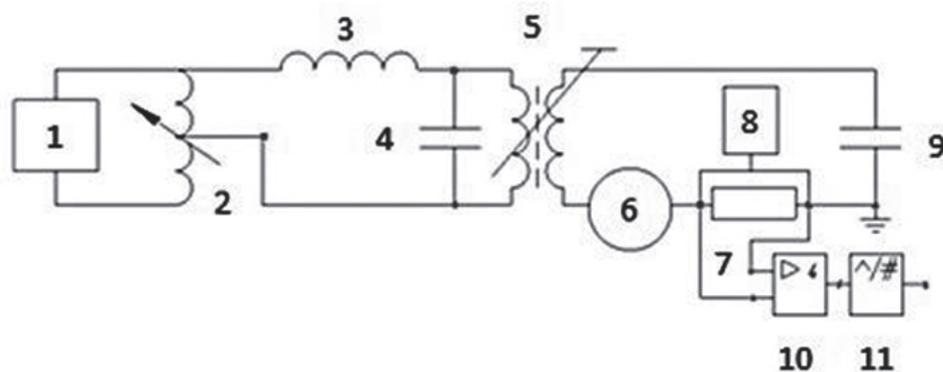
резонансная испытательная установка, резонанс в которой создается в первичной цепи высокопотенциального повышающего испытательного трансформатора [1–10]. В процессе испытания повышенным переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты согласно ГОСТ Р 55194-2012 требуется измерение тока, протекающего через испытуемый объект.

Для измерения тока в устройствах испытания изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты применяются прецизионные резисторы, датчики тока на основе эффекта Холла разомкнутого и замкнутого типов, датчики на основе трансформаторов тока, магнитостатические и магниторезистивные датчики, а также катушки Роговского [11, 12].

Для исследования работы схемы измерения переменного тока от 1 до 330 mA в резонансной испытательной установке при испы-

тании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты до 16000 В для объектов с большой ёмкостью (от 15 до 65 нФ) используется прецизионный резистор типа P1-37, сигнал (падение напряжения) с которого поступает на изолирующий усилитель типа АМС1301 производства «Texas Instrument», и с выхода усилителя сиг-

нал подается на аналого-цифровой преобразователь типа STM32L476VGT6 производства фирмы «ST Microelectronics». Структурная схема измерения переменного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты, представлена на рисунке 1.



- 1 — сеть, 220 В, 50 Гц; 2 — регулятор напряжения от 0 до 220 В;
 3 — резонансный дроссель; 4 — конденсатор; 5 — повышающий испытательный трансформатор; 6 — образцовый прибор для измерения переменного тока;
 7 — прецизионный резистор; 8 — осциллограф; 9 — испытуемый объект;
 10 — изолирующий усилитель; 11 — АЦП

Рисунок 1. Схема измерения тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты

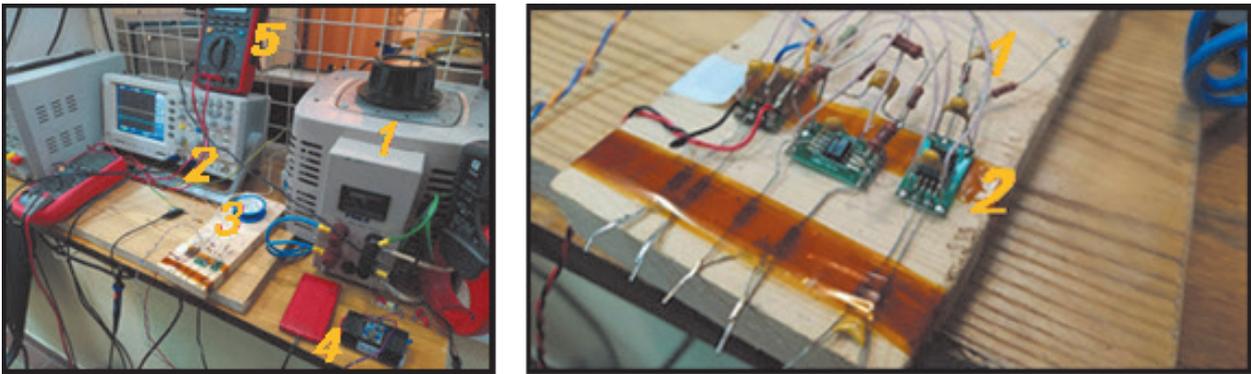
Стенд для исследования схемы измерения переменного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты, разработан и исследован в лаборатории кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий» УГНТУ при финансовой поддержке компании ООО НИЦ «Энергодиагностика».

Экспериментальный стенд для исследования схемы измерения переменного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты с использованием прецизионного резистора, представлен на рисунке 2.

Для реализации схемы измерения переменного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением про-

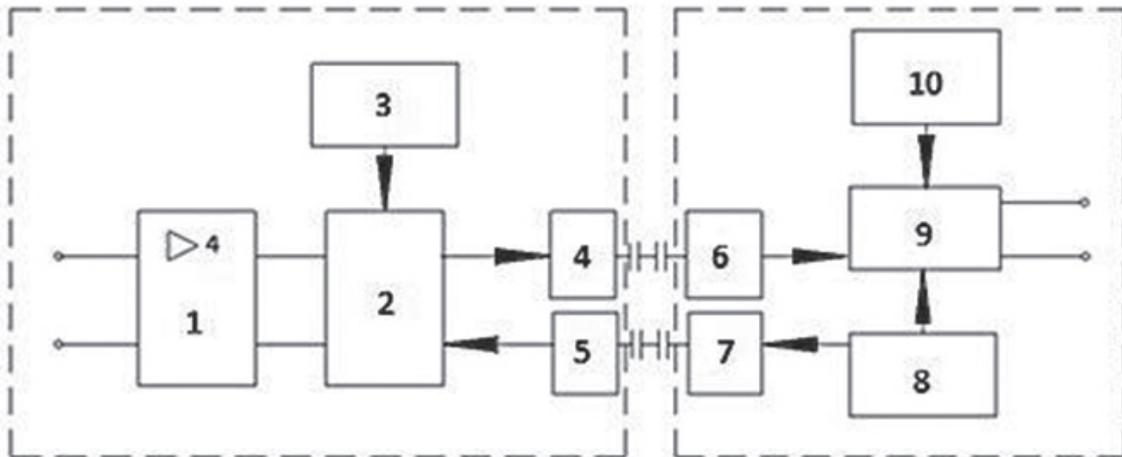
мышленной частоты, выбран изолирующий усилитель типа АМС1301 производства «Texas Instrument». Данный изолирующий усилитель создает барьер для электромагнитных потерь входной схемы от выходной и обеспечивает гальваническую развязку до 7000 В. Он используется в сочетании с изолированными источниками питания, это устройство предотвращает появление шумовых токов и повреждение чувствительной схемы. На рисунке 3 представлена функциональная схема изолирующего усилителя типа АМС1301 производства «Texas Instrument» [12].

Прецизионные резисторы типа P1-37 — резисторы постоянные непервоочные прецизионные изолированного и неизолированного вариантов исполнения, предназначены для работы в электрических цепях постоянного, переменного токов и в импульсном режиме.



- а) 1 — лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) типа TDGC2-5K; 2 — осциллограф типа GDS-71022;
 3 — изолирующий усилитель типа АМС1301; 4 — источники опорного напряжения;
 5 — цифровой мультиметр типа UT81В в режиме измерения переменного напряжения;
- б) 1 — прецизионный резистор типа Р1-37; 2 — изолирующий усилитель типа АМС1301

Рисунок 2. Экспериментальный стенд для исследования схемы измерения переменного тока, протекающего через испытуемый объект



- 1 — дифференциальный усилитель; 2 — каскад модулятора; 3 — источник опорного напряжения; 4 — передача данных, Tx; 5 — приём данных, Rx; 6 — приём данных, Rx; 7 — передача данных Tx; 8 — осциллятор; 9 — фильтр; 10 — источник опорного напряжения

Рисунок 3. Функциональная схема изолирующего усилителя типа АМС1301

Таблица 1. Допускаемые отклонения от номинальных значений сопротивления резистора

Пределы номинальных сопротивлений, Ом	Допускаемые отклонения от номинального сопротивления, %
1 – 10	$\pm 0,5; \pm 1$
св. 10 – 100	$\pm 0,25; \pm 0,5; \pm 1$
св. 100 – 1 x 103	$\pm 0,05; \pm 0,1; \pm 0,25; \pm 0,5; \pm 1$
св. 1 x 103 – 1 x 105	$\pm 0,01; \pm 0,02; \pm 0,05; \pm 0,1; \pm 0,25; \pm 0,5; \pm 1$
св. 1 x 105	$\pm 0,05; \pm 0,1; \pm 0,25; \pm 0,5; \pm 1$

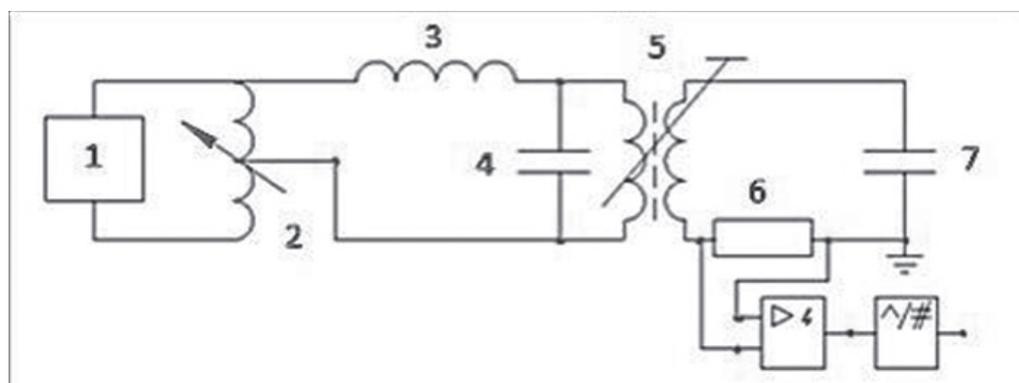
Сигнал с прецизионного резистора типа P1-37 подается на дифференциальный усилитель типа АМС1301, на выходе дифференциального усилителя происходят усиление входного сигнала в 4 раза и передача его на каскад модулятора, где происходит преобразование аналоговых выборок сигнала в поток информации и передача на аналого-цифровой преобразователь микросхемы типа STM32L476VGT6.

Исследование схемы измерения переменного тока, протекающего через испытуемый

объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты, проводится по алгоритму, представленному на рисунке 4 и схеме на рисунке 5. Повышающий высокопотенциальный испытательный трансформатор, обозначенный цифрой 5 на рисунке 5, предоставлен компанией ООО НИЦ «Энергодиагностика» (г. Уфа). Погрешность сопротивления резистора 7 не больше $\pm 0,5\%$ по таблице 1.



Рисунок 4. Алгоритм проведения исследования схемы измерения переменного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты



1 — сеть, 220 В, 50 Гц; 2 — регулятор напряжения типа TDGC2-5K;
3 — резонансный дроссель; 4 — импульсный конденсатор с комбинированным диэлектриком типа K75-40;
5 — повышающий высокопотенциальный испытательный трансформатор;
6 — прецизионный резистор типа P1-37; 7 — испытуемый объект (ёмкостная нагрузка от 15 до 65 нФ);
8 — изолирующий усилитель типа АМС1301; 9 — АЦП типа STM32L476VGT6

Рисунок 5. Схема измерения переменного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты

Согласно алгоритму, приведенному на рисунке 4, произведем исследование схемы измерения переменного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты.

Последовательность проведения исследования:

1. Предварительный расчет и выбор прецизионного резистора
Ёмкость объекта 25 нФ (ёмкостная нагрузка).

Расчётное падение напряжения на прецизионном резисторе типа P1-37:

$$U = I \cdot R,$$

где I — ток протекающего через испытуемый объект, мА;

R — сопротивление прецизионного резистора типа P1-37, Ом.

$$U = 0,042 \cdot 2 = 0,083 \text{ В.}$$

2. Проверка выборочной точки для проверки работы схемы

Установим ток, протекающий через испытуемый объект, равный 42 мА при помощи образцового миллиамперметра 6 рисунка 5, при плавном подъеме испытательного напряжения приблизительно до 6000 В.

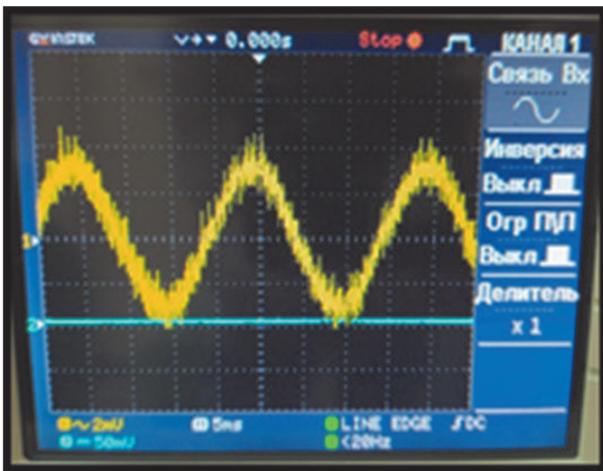


Рисунок 6. Осциллограмма напряжения на прецизионном резисторе типа P1-37

На рисунке 6 представлена осциллограмма напряжения на прецизионном резисторе типа P1-37 при испытании объекта ёмкостью 25 нФ. Из осциллограммы, пред-

ставленной на рисунке 6 для схемы на рисунке 5, получены данные, которые представлены в таблице 2.

На рисунке 7 представлены осциллограммы напряжений на выходе изолирующего усилителя типа АМС1301. Из осциллограммы, представленной на рисунке 7 для схемы на рисунке 5, получены данные, представленные в таблице 2.

Уровень входного напряжения для АЦП микроконтроллера типа STM32L476VGT6 устанавливается опорным напряжением + 2,5 В. АЦП микроконтроллера типа STM32L476VGT6 разрешением 12 бит, может выдать $2^{12} = 4096$ уровней квантования, 1 бит (шум) АЦП составит:

$$\frac{U_1}{N} = \frac{2,5}{4096} = 610,35 \text{ мкВ,}$$

где U_1 — уровень опорного напряжения, В; N — уровень квантования.

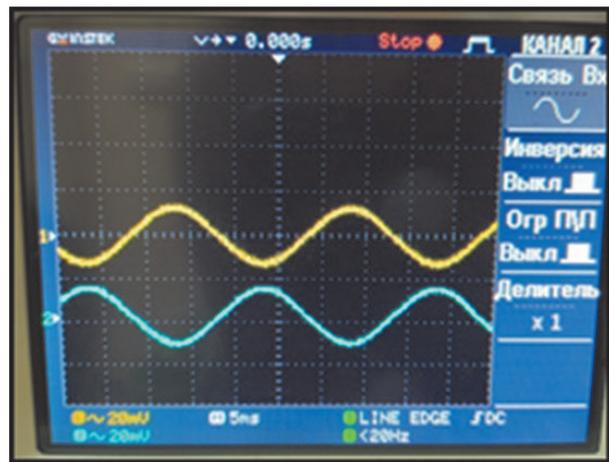


Рисунок 7. Осциллограмма напряжения на выходе изолирующего усилителя типа АМС1301

Таблица 2. Результаты экспериментов

№ п/п	Измеренный и расчетные параметры для ёмкости объекта	Ёмкость объекта 25 нФ	Ёмкость объекта 65 нФ
1.	Измеренное напряжения на ЛАТРе, В	67	220
2.	Измеренное выходное напряжения на испытуемом объекте, В	5860	16000
3.	Амплитудное значение напряжения на входе усилителя, мВ	8,1	227,3
4.	Амплитудное значение напряжения на выходе усилителя, мВ	32,4	909,2
5.	Количество квантов с АЦП	53	1490
6.	Измеренный ток на образцовом миллиамперметре, мА	42,0	302,4
7.	Измеренный ток разработанного устройства, мА	41,9	303,2
8.	Погрешность измерения тока, %	0,24	0,26

Для АЦП STM32L476VGT6 написана программа для вычисления среднеквадратичного значения синусоидального переменного тока за один период 20 мс. За 20 мс происходит 100 измерений, одно измерение в 200 мкс. Но, если данной откалиброванной схемой среднеквадратичного значения синусоидального тока производить измерения других сигналов, к примеру измерения постоянного тока, сигналы прямоугольной формы и др., то данная схема будет иметь большую ошибку вычисления, так как в про-

грамме вводятся усредняющие фильтры для стабильного значения в канале и происходит двоичное деление для разгрузки ядра.

На рисунке 8 представлена экспериментальная зависимость уровней квантования от тока на образцовом амперметре в режиме калибровки для экспериментального образца. По данной зависимости при максимальном токе 320 мА АЦП преобразовывает данное значение в 1490 кванта и программным путем происходит вычисление среднеквадратичного значения синусоидального переменного тока.

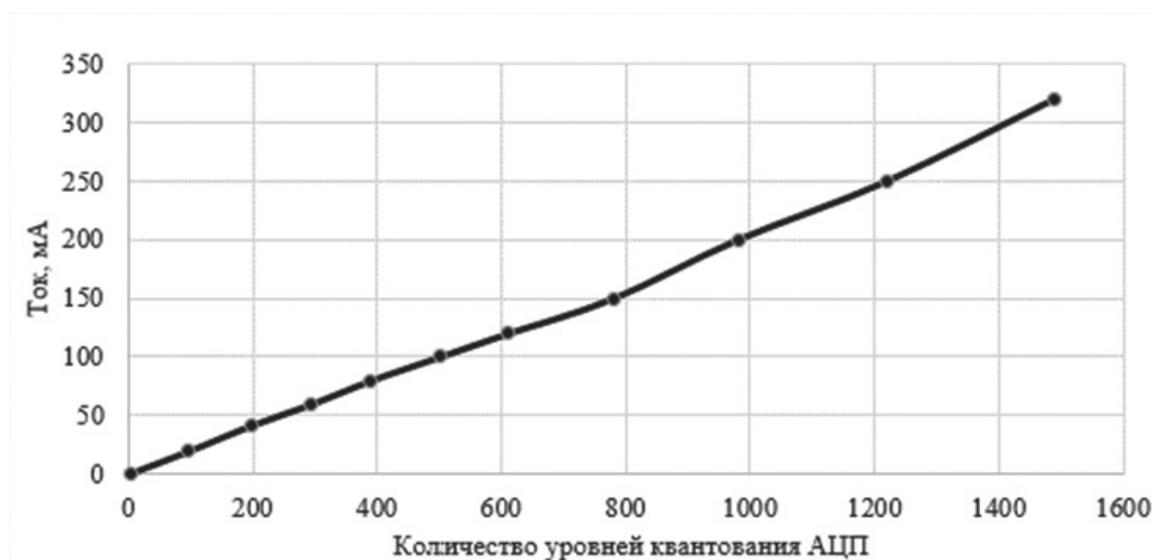


Рисунок 8. Зависимость количества уровней квантования от тока на образцовом амперметре в режиме калибровки экспериментального образца

По результатам исследования создан опытно-промышленный образец схемы измерения переменного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты, представленный на рисунке 9.

Опытно-промышленный образец состоит из 2 монтажных плат. Монтажная плата № 1 состоит из изолирующего усилителя типа АМС1301 производства «Texas Instrument», фильтра, источника высокоточного опорного напряжения, дросселя. Она служит для снятия сигнала с прецизионного резистора типа P1-37, усиления и передачи в плату № 2. Плата № 2 состоит из преобразователя типа STM32L476VGT6 производства фирмы «ST Microelectronics», фильтров, источника высокоточного опорного напряжения.

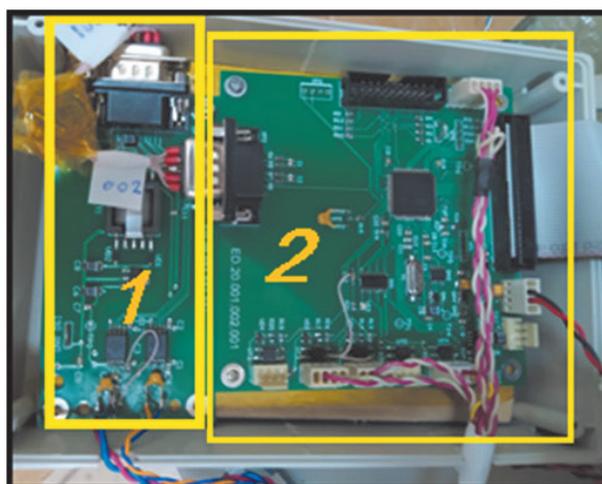


Рисунок 9. Опытно-промышленный образец измерения тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты

Разработанная плата позволяет производить измерения среднеквадратичного значения тока в пределах от 1 до 320 мА, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты от 25 до 16000 В. Внедрение данного образца позволит на его базе создавать ряд цифровых измерительных миллиамперметров, позволяющих производить измерение переменного тока в высоковольтных испытательных установках для испытания изоляции объектов от 15 до 200 нФ, в диапазоне от 1 до 1000 мА.

Выводы

1. Сделан обзор существующих датчиков для измерения тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты, для резонансной испытательной установки был выбран прецизионный резистор типа P1-37 с изолирующим усилителем типа АМС1301, которые обладают следующими преимуществами: невысокая стоимость компонентов, гальваническая развязка и высокая надежность компонентов.

2. Применение разработанной схемы измерения тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты, позволяет получать среднеква-

дратичное значение тока в реальном масштабе времени и, следовательно, оперативно контролировать ток в высоковольтных цепях для постоянного мониторинга.

3. Разработан алгоритм проведения исследования схемы измерения переменного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты, который позволяет повысить скорость разработки измерительных устройств.

4. Разработанная плата позволяет производить измерения среднеквадратичного значения тока в пределах от 1 до 320 мА, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты от 25 до 16000 В. Внедрение данного образца позволит на его базе создавать ряд цифровых измерительных миллиамперметров, позволяющих производить измерение переменного тока в высоковольтных испытательных установках для испытания изоляции объектов от 15 до 200 нФ, в диапазоне от 1 до 1000 мА. Полученные результаты могут быть использованы в технике высокого напряжения для исследования схем измерения тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты [13, 14]

Список литературы

1. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Кириллов Р.В. Выбор схемы ВИУ для работы в резонансном режиме // Сб. науч. тр. I Междунар. науч.-техн. конф. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013. С. 209–215.

2. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Хазиева Р.Т., Стрижев Д.А. Новые схемотехнические решения резонансной высоковольтной испытательной установки // Инновационные направления развития электропривода, электротехнологий и электрооборудования: межвуз. сб. науч. тр. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2012. С. 178–183.

3. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В. Оценка влияния параметров изоляции высоковольтного оборудования на режимы работы

испытательной установки // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». 2015. № 2. URL: www.science-education.ru/122-20794.

4. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В. Математическое моделирование резонансных режимов испытательной установки // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2015. № 3. С. 51–55.

5. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Конев А.А. Исследование режимов работы дросселя резонансной испытательной установки // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12, № 3. С. 5–10.

6. Пат. 132213 Российская Федерация, МПК G 01 R. Компактная испытательная

установка для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением / С.Г. Конесев, А.В. Мухаметшин. 2013108529; заявл. 10.09.13, Бюл. № 25.

7. Пат. 2662952 Российская Федерация, МПК G 01 R. Установка для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением / С.Г. Конесев, А.В. Мухаметшин, А.А. Конев, И.З. Гайнутдинов. 2017130067; заявл. 24.08.17. Бюл. № 22.

8. Пат. 156457 Российская Федерация, МПК G 01 R. Установка для испытания средств защиты / А.В. Мухаметшин, Е.В. Мухаметшин. 201524718/28; заявл. 23.06.15. Бюл. № 31.

9. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Анализ динамики патентования индуктивно-емкостных преобразователей для систем стабилизации тока // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*, 2016. Т. 12, № 4. С. 55–61.

10. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Оценка стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2018. Т. 14. № 2. С. 13–20.

11. Данилов А. Современные промышленные датчики тока // *Современная электроника*. 2004. № 1. С. 26–28.

12. АМС1301-Q1 SBAS792A. APRIL 2017.

13. Хазиева Р.Т., Купцов Д.В. Анализ динамики патентования устройств заряда емкостных накопителей // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2019. Т. 15, № 3. С. 41–44. DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-41-44.

14. Хазиева Р.Т., Иванов М.Д. Математическая модель колебательной механической системы // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2019. Т. 15, № 4. С. 74–82.

References

1. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Kirillov R.V. Vybor skhemy VIU dlya raboty v rezonansnom rezhime [The Choice of the VIA Circuit for Operation in the Resonant Mode]. *Sbornik nauchnykh trudov I Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Collection of Scientific Works of I International Scientific and Technical Conference]. Ufa, UGNTU Publ., 2013, pp. 209–215. [in Russian].

2. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Khazieva R.T., Strizhev D.A. Novye skhemotekhnicheskie resheniya rezonansnoi vysokovol'tnoi ispytatel'noi ustanovki [New Circuit Solutions of a Resonant High-Voltage Testing Facility]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov «Innovatsionnye napravleniya razvitiya elektroprivoda, elektrotekhnologii i elektrooborudovaniya»* [Interuniversity Collection of Scientific Works «Innovative Directions of Development of Electric Drive, Electrotechnology and Electrical Equipment»]. Ufa, UGNTU Publ., 2012, pp. 178–183. [in Russian].

3. Konesev S.G., Mukhametshin A.V. Otsenka vliyaniya parametrov izolyatsii vysokovol'tnogo oborudovaniya na rezhimy raboty ispytatel'noi ustanovki [Assessment of the Influence of the Insulation Parameters of High-Voltage Equipment on the Operating Modes of the Test Facility]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya»* — Electronic Scientific Journal «Modern Problems of Science and Education», 2015, No. 2. URL: www.science-education.ru/122-20794. [in Russian].

4. Konesev S.G., Mukhametshin A.V. Matematicheskoe modelirovanie rezonansnykh rezhimov ispytatel'noi ustanovki [Mathematical Modeling of Resonance Modes of the Test Setup]. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya – News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region*, 2015, No. 3, pp. 51–55. [in Russian].

5. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Konev A.A. Issledovanie rezhimov raboty drosselya rezonansnoi ispytatel'noi ustanovki [Modelling Modes Inductor Resonance Test Set]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2016, Vol. 12, No. 3, pp. 5–10. [in Russian].

6. Konesev S.G., Mukhametshin A.V. Kompaktnaya ispytatel'naya ustanovka dlya ispytaniya izolyatsii elektrooborudovaniya povyshennym napryazheniem [Compact Testing Facility for Testing Insulation of Electrical Equipment with Increased Voltage]. Patent RF, 2013. [in Russian].

7. Konesev S.G., Mukhametshin A.V. *Ustanovka dlya ispytaniya izolyatsii elektrooborudovaniya povyshennym napryazheniem*

[Installation for Testing Insulation of Electrical Equipment with Increased Voltage]. Patent RF, 2017. [in Russian].

8. Mukhametshin A.V., Mukhametshin E.V. *Ustanovka dlya ispytaniya sredstv zashchity* [Installation for Testing Protective Equipment]. Patent RF, 2015. [in Russian].

9. Konesev S.G., Khazieva R.T. Analiz dinamiki patentovaniya induktivno-emkostnykh preobrazovatelei dlya sistem stabilizatsii toka [Analysis of the Dynamics of Patenting Inductive-Capacitive Converters for Current Stabilization Systems]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2016, Vol. 12, No. 4, pp. 55–61. [in Russian].

10. Konesev S.G., Khazieva R.T. Otsenka stabilizatsionnykh svoystv induktivno-emkostnykh preobrazovatelei [Assessment of Inductive-Capacitive Converters Stabilization Properties]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2018, Vol. 14, No. 2, pp. 13–20. [in Russian].

11. Danilov A. Sovremennye promyshlennyye datchiki toka [Modern Industrial Current Sensors]. *Sovremennaya elektronika — Modern Electronics*, 2004, No. 1, pp. 26–28. [in Russian].

12. *AMC1301-Q1 SBAS792A*. APRIL 2017.

13. Khazieva R.T., Kuptsov D.V. Analiz dinamiki patentovaniya ustroystv zaryada emkostnykh nakopitelei [Analysis of Patenting of Inductive-Capacitive Transducers for Current Stabilization Systems]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2019, Vol. 15, No. 3, pp. 41–44. DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-41-44. [in Russian].

14. Khazieva R.T., Ivanov M.D. Matematicheskaya model' kolebatel'noi mekhanicheskoi sistemy [Simplified Mathematical Model of an Oscillating Mechanical System]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2019, Vol. 15, No. 4, pp. 74–82. [in Russian].



Курочкин Л. М.
Kurochkin L. M.
кандидат технических наук,
доцент высшей школы
прикладной математики и
вычислительной физики,
ФГАОУ ВО «Санкт-
Петербургский
политехнический
университет Петра
Великого»,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация



Чернышев А. С.
Chernyshev A. S.
научный сотрудник
Сектора численного
моделирования,
ФГБУН Физико-
технический
институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация



Курочкин М. А.
Kurochkin M. A.
кандидат технических наук,
доцент,
доцент высшей школы
прикладной математики и
вычислительной физики,
ФГАОУ ВО «Санкт-
Петербургский
политехнический
университет Петра
Великого»,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация



Чуватов М. В.
Chuvatov M. V.
ведущий программист,
ФГАОУ ВО «Санкт-
Петербургский
политехнический
университет Петра
Великого»,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация



Жиленков А. А.
Zhilenkov A. A.
заведующий кафедрой
киберфизических систем,
ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский
государственный
морской технический
университет»,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

УДК 004.942

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-4-56-67

ОЦЕНКА СОГЛАСОВАННОСТИ ДИСКРЕТНОГО И СПЛОШНОСРЕДНОГО ПОДХОДОВ В РАМКАХ ГИБРИДНОЙ МОДЕЛИ НА ПРИМЕРЕ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ РЕГИОНА

Разработка и исследование средств моделирования транспортных сетей является актуальной задачей ввиду их постоянного роста и модернизации, появления требований к

управлению дорожным трафиком и дорожной инфраструктурой. Моделирование указанных сетей является основным средством прогнозирования изменений состояний транспортных потоков, на основании которого могут быть реализованы методы управления дорожным трафиком, разработаны специализированные средства передачи данных для интеллектуальных транспортных сетей, обоснованы планы реконструкции и развития дорожных сетей. В работе представлен анализ результатов совместного использования континуального и дискретного подходов при моделировании дорожного трафика в одном из центральных районов Санкт-Петербурга. Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что использование указанных подходов при моделировании транспортных сетей даёт согласованные результаты на сложных участках дорожных сетей, при этом возможно дальнейшее усовершенствование предиктивной способности континуального метода для более точного разрешения дорожной сети с большим количеством перекрестков. Результаты, полученные в рамках континуального подхода, могут быть использованы как входные данные для дискретного подхода для уточнения характеристик дорожного трафика. Континуальный метод моделирования не имеет повышенных требований к необходимым для его выполнения вычислительным ресурсам, к тому же его выполнение может быть реализовано параллельно без особых «накладных расходов». Работа обосновывает целесообразность построения гибридных моделей транспортных систем, позволяющих сократить время моделирования без ущерба точности результатов моделирования.

Ключевые слова: транспортные сети, континуальный метод, гибридные модели, дорожные сети.

ASSESSMENT OF THE CONSISTENCY OF DISCRETE AND CONTINUOUS-MEDIUM APPROACHES IN THE HYBRID MODEL ON THE EXAMPLE OF THE REGIONAL TRANSPORT NETWORK

Development and research of transport network modeling tools is an urgent task due to their constant growth and modernization; the emergence of requirements for road traffic management and road infrastructure. Modeling of these networks is the main tool for predicting changes in the state of traffic flows, which can be used to implement road traffic management methods, develop specialized data transmission tools for intelligent transport networks, and justify plans for the reconstruction and development of road networks. The paper presents an analysis of the results of joint use of continuous and discrete approaches in modeling road traffic in one of the Central districts of St. Petersburg. The results of the research allow us to conclude that the use of these approaches in modeling transport networks gives consistent results on complex sections of road networks, while it is possible to further improve the predictive ability of the continuous method for more accurate resolution of the road network with a large number of intersections. The results obtained in the framework of the continuum approach can be used as input data for the discrete approach to Refine the characteristics of road traffic. The continuous modeling method does not have high requirements for the computing resources necessary for its execution, and its execution can be implemented in parallel without any special «overhead». The paper substantiates the feasibility of building hybrid models of transport systems that reduce the simulation time without compromising the accuracy of the simulation results.

Key words: transport network, the continuum method, a hybrid model of the road network.

Постановка проблемы

Создание дорожных сетей, а также модернизация и управление существующими дорожными сетями требуют разработки средств оперативного моделирования, позволяющих прогнозировать распространение дорожного трафика на значительных фраг-

ментах дорожных сетей, предсказывать появление заторов, разрабатывать и исследовать методы динамического контроля дорожной обстановки.

Данная работа посвящена анализу возможности построения гибридной модели транспортных потоков, объединяющей в себе

как свойства непрерывной гидрогазодинамической модели, так и дискретной микромодели транспортных потоков. В работе проводится анализ сопоставимости результатов моделирования распространения транспортных потоков, проведённых с использованием дискретного и непрерывного подходов, а также формирования критериев, определяющих возможность перехода между дискретным и непрерывным уровнями модели. В качестве примера дорожной сети в представленной работе используется схема одного из центральных районов Санкт-Петербурга, отражающая свойства реальной дорожной сети. В качестве инструментов построения моделей и проведения расчетов используются OpenFoam и SUMO.

Обзор предметной области

Моделирование широко используется для разработки и модернизации транспортных сетей (ТС) крупных городов, направленных на решение задач развития дорожных сетей и оптимизации транспортных потоков. Методы моделирования транспортных потоков могут быть классифицированы по различным признакам, таким как: изменчивость данных (динамика/статика), использование вероятностных составляющих, уровень детализации (макроскопические, микроскопические, мезоскопические), метод расчётов (имитационные/математические) и другим [1–6]. На данный момент универсальные методы моделирования транспортных потоков не представлены. Целесообразность использования каждого метода определяется условиями решаемой задачи, ограничениями имеющихся временных и вычислительных ресурсов.

При решении задач построения моделей транспортных сетей активно используются математические модели. Интерес исследователей привлекают как разработка моделей транспортных сетей, описывающих отдельные свойства транспортных сетей: модели распределения потоков, модели расщепления потоков, учитывающие способы передвижений, энтропийные модели, используемые для формирования матриц корреспонденций, так и многостадийные модели, включающие в себя свойства перечисленных моделей [3].

Ключевой особенностью указанной работы является использование модели стационарной динамики [5] вместо широко используемой модели равновесного распределения потоков Бэкмана, требующей сложной калибровки. Предложенная в работе [3] модель позволяет проводить калибровку по реальным данным; в работе представлена оценка вычислительной сложности предложенных алгоритмов для заданной точности вычислений.

Разработка моделей транспортных сетей, описывающих их отдельные свойства, также вызывает интерес исследователей. Работа [1] посвящена созданию моделей равновесного распределения транспортных потоков. В работе рассматривается разработка эффективного решения энтропийно регуляризованных задач выпуклой оптимизации для поиска стохастических равновесий Нэша. В указанной работе рассматриваются задачи поиска универсальных способов нахождения обычных и стохастических равновесий в популяционных играх загрузки. Предложенный в работе подход может быть адаптирован для решения задач поиска равновесий в многостадийных транспортных моделях [3]. По результатам работы можно сделать вывод о том, что использование классического метода условного градиента Франк-Вульфа [4] является наилучшим подходом к поиску не стохастического решения модели Бэкмана. В работе показано, что для случаев стохастических равновесий целесообразно ставить и решать двойственную задачу, используя для решения универсальный градиентный метод Ю.Е. Нестерова [2].

В ряде случаев широко применяются имитационные модели. Указанные модели относятся к одному из четырех классов:

1. Макроскопические: используются для получения оценок общих свойств дорожного трафика, не описывают индивидуальные характеристики поведения каждого отдельного участника дорожного движения. Обычно не представляют повышенных требований к используемым вычислительным средствам;

2. Микроскопические: используют результаты расчёта индивидуальных свойств поведения каждого участника дорожного движе-

ния. Позволяют построить детализированную модель транспортной сети. Представляют повышенные требования к вычислительным средствам по сравнению с макроскопическими моделями;

3. Мезоскопические: представляют собой модели, построенные за счёт объединения моделей макроскопического и микроскопического уровней;

4. Субмикроскопические: помимо моделирования индивидуальных свойств поведения каждого участника дорожного движения, свойственного микроскопическому уровню, производят моделирование процессов внутри транспортного средства (вплоть до переключения передач) [7, 8].

К основным средствам разработки имитационных моделей транспортных сетей, отражающих свойства значительных фрагментов реальных дорожных сетей, индивидуальных свойств транспортных средств, моделей поведения водителей, свойств дорожной инфраструктуры, стоит отнести PTV Vissim [9], MATSim [10] и SUMO [7].

Программный проект MATSim (Multi-Agent Transport Simulation) разрабатывался с целью создания моделей трафика на базе реализаций моделей поведения отдельных участников дорожного движения с использованием их ежедневной/еженедельной программы активности. Другими словами, указанный проект представляет собой много-агентную систему, содержащую планы каждого агента на собственные передвижения на день или более. Указанное решение позволяет отказаться от формирования и обработки фиксированных матриц корреспонденций «на все случаи жизни». Проект предназначен для получения оценки характеристик дорожного трафика на значительном временном интервале (например сутки). Проект распространяется свободно (в том числе и исходный код), представляет из себя интегрированную платформу на основе Java.

Решение PTV Vissim является коммерческим продуктом. Указанное решение распространяется с пользовательским интерфейсом, позволяющим оперативно провести настройки модели, с интегрированными средствами визуализации, в т.ч. трёхмерной.

PTV Vissim предназначен для проведения моделирования транспортных систем на небольшие временные интервалы (1–3 ч).

В данной работе использовался симулятор SUMO, основными аргументами в пользу этого выбора стало то, что он распространяется бесплатно, позволяет оперативно экспортировать значительные фрагменты схем реальных участков дорожных сетей, позволяют описывать как свойства отдельных автомобилей, так и свойств дорожной инфраструктуры.

В качестве альтернативы дискретным моделям активно используются гидродинамические модели транспортной сети. Они позволяют эффективно описывать поведение транспортного потока на макроскопическом уровне, оперируя уравнениями сохранения для непрерывного, однородного континуума, что позволяет использовать известные и проверенные методики решения таких уравнений из вычислительной гидрогазодинамики.

Макроскопические гидродинамические модели изначально в своей основе содержали уравнение сохранения полной плотности автомобильного потока машин (например обзор в [11]). Скорость потока находилась из алгебраического стационарного соотношения между плотностью потока и усреднённой скоростью. Решение искомого уравнения приводило к возникновению ударных волн с разрывами функции плотности на границах, для устранения этого эффекта использовалась искусственная диффузия.

В силу равновесного решения для скорости и невозможности модели предсказывать локальные нестационарности и неоднородности потока, было решено расширить модель введением уравнения скорости потока [12, 13]. Уравнение для скорости имеет схожий с уравнением сохранения импульса для сплошной среды вид, и может быть выведено из микроскопического описания транспортного потока, построенного на основе модели ведущий-ведомый (газокинетические модели, использующие аналогию с уравнением Больцмана) [14]. В полученном уравнении присутствуют слагаемые, отвечающие за взаимное влияние участников дорожного движения друг на друга (аналог

давления в сплошной среде), и релаксационное слагаемое, отвечающее за стремление усредненной скорости потока к некоторому равновесному значению, являющемуся параметром задачи.

Так как в реальном потоке существует локальная скоростная неоднородность, возникающая за счет перестроений машин, обгонов и случайных ускорений и замедлений транспортных средств, дополнительно вводились переменные, отвечающие за вариативность транспортного потока [12]. Локальные пульсации скорости учитываются в модифицированном уравнении для давления, что, в свою очередь, влияет на распределение плотности и скорости всего потока.

Для повышения качества предсказательных возможностей сплошнородных моделей и разрешения тонких эффектов вводились дополнительные модификации, такие как учет влияния отдельных участников движения на поток [15], что приближает макроскопические сплошнородные модели к микроскопическим, или разработка детальной гидродинамической модели для расчета отдельных перекрестков [16].

Симулятор SUMO

Симулятор SUMO позволяет работать с микроскопическими моделями (светофоры) и их индивидуальными свойствами. Дороги образуют дорожные сети с перекрестками, развязками. Особое внимание уделяется описанию свойств дорожного трафика, распределению его по дорожной сети, характеристикам свойств транспортных средств (ТС), особенностей их движения («манера вождения») на дорогах. Симулятор позволяет импортировать схемы дорожных сетей сторонних форматов, например, из OpenStreetMaps.

Построение модели подразумевает формирование описаний транспортной сети и сценария моделирования. Симулятор SUMO позволяет детально описать свойства входного трафика: время и место появления конкретного ТС заданного типа (интенсивность появления ТС на входах транспортной сети), скорость, маршрут транспортных средств, свойства распределения транспортных потоков на перекрестках и др. Описание распре-

деления транспортных потоков основано на использовании матриц корреспонденций.

При расчёте параметров движения конкретного транспортного средства используется модифицированная дискретная модель Краусса [17]. Модель позволяет вычислять скорость безопасного движения v_{safe} (без аварий) конкретного ТС на данном участке дороги, учитывая «поведение» окружающих ТС:

$$v_{safe}(t) = -\tau \cdot b + \sqrt{(\tau \cdot b)^2 + v_{lbader}(t-1)^2 + 2 \cdot b \cdot g_{lbader}(t-1)}$$

Модель принимает во внимание такие параметры, как: время реакции водителя (τ), ограничения на значения максимальных замедлений (b), скорость впередиидущего ТС (v_{leader}) и дистанцию до него в конкретный момент времени ($g_{lbader}(t)$). Указанная модель реализует допущение того факта, что ТС могут двигаться со скоростью меньшей, чем максимальная допустимая на конкретном участке дороги. Модель использует собственную зависимость ускорения от скорости движения ТС. Чем ближе скорость движения ТС к максимальной возможной, тем меньше ускорение:

$$a(v) = a(1 - v/v_{max}).$$

Особенности реализации симулятора SUMO позволяют отражать в моделях особенности поведения реальных потоков транспорта, например, плавный старт транспортного потока со светофора; формирование заторов из-за транспортных средств, двигающихся слишком медленно; движения потока разнотипных ТС.

Результаты моделирования могут содержать: описания траекторий транспортных средств (в т.ч. скорости на траектории); численные характеристики моделируемого трафика, собранные с помощью детекторов модели (в т.ч. агрегированные характеристики по дорогам, полосам движения), протоколы переключения светофоров. Результаты моделирования могут быть визуализированы средствами симулятора или сохранены в файлах.

Математическая модель

Основу математической модели составляет уравнение сохранения потока машин,

эквивалентное уравнению сохранения массы для задачи о сжимаемом газе:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot V)}{\partial r} = 0,$$

где ρ — плотность транспортного потока [1/м]; V — скорость потока [м/с].

Это и последующие уравнения в рамках математической модели записаны для случая квазиодномерного транспортного потока и могут быть легко перенесены на двумерный случай.

Как было указано в обзоре, использование только уравнения сохранения с алгебраическим выражением для V не дает корректного описания транспортного потока. Поэтому модель была дополнена уравнением для расчета скорости потока в каждой точке транспортной сети, эквивалентного уравнению сохранению импульса сжимаемого газа с добавочными источниками слагаемыми:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \cdot V}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial(\rho \cdot V)}{\partial r} = \\ = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\rho}{\tau} \cdot (V_e - V), P = \rho \cdot \Theta, \end{aligned}$$

где P — эквивалентное давление, отвечающее за влияние соседних автомобилей, [м/с²]; τ — характерное время установления потока и достижения равновесной скорости [с]; V_e — равновесная скорость потока [м/с]; Θ — модельный параметр, отвечающий за хаос в автомобильном потоке (внезапные перестроения, ускорения и замедления отдельных участников движения) и связь между давлением и плотностью [м²/с²]. Ниже даны пояснения к каждому из слагаемых.

Первое слагаемое, являющееся градиентом давления, нарастает в местах скопления автомобилей и отражает взаимное влияние соседних машин друг на друга. В случае возникновения заторов повышение давления, а с ним и его градиента, препятствует дальнейшему нарастанию плотности потока в этой точке и вынуждает автомобили искать другие пути объезда, что отражает взаимодействие отдельных водителей в микромоделях.

Ограничения по скоростному режиму, накладываемые на каждом участке дорожной сети, отражены во втором слагаемом. Скорость V_e — равновесная скорость потока,

реализуемая при равномерном и гомогенном режиме движения по дороге и при такой плотности потока, когда расстояние между машинами больше минимального, определенного безопасностью движения при выбранном скоростном режиме. Параметр τ зависит от типа транспортного средства, свойств дорожной сети, параметров потока и является входным параметром. Параметр Θ в рассматриваемой модели принимается постоянным, равным 1.

Полученная система уравнений эквивалентна системе уравнений Навье-Стокса для сжимаемой среды [18] и может быть решена численно, используя известные подходы из вычислительной гидрогазодинамики.

Граничные и начальные условия

В начальный момент времени задается равномерное распределение транспортных средств в расчетной области с нулевой скоростью. На входных участках дорог задается поток машин, значение которого берется из модели SUMO, и вычисляются значения скорости и плотности потока. На выходных участках дорог задается фиксированный уровень давления, остальные величины потока получаются из расчета.

Численный метод

Дискретизация уравнений сохранения проводится при помощи метода конечных объемов на сетке с искомыми величинами потока, определенными в центрах ячеек [19, 20]. Каждый участок дороги представляет собой квазиодномерную трубу с единичным разбиением поперек дороги. Общий вид уравнения сохранения для некоторой скалярной величины ϕ с учетом нестационарного и конвективного слагаемых и дополнительного источников слагаемого имеет следующий вид [21]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \phi d\Omega + \int_S \rho \phi \vec{V} \cdot \vec{n} dS = \int_{\Omega} Q d\Omega,$$

где Ω — объем ячейки; S — площадь поверхности ячейки, \vec{n} — нормаль к поверхности; Q — источниковое слагаемое.

При дискретизации по времени используется неявная схема первого порядка точности с постоянным шагом по времени Δt . Выбор неявной схемы обусловлен тем, что она позволяет вести счет с большими шагами по

времени для достижения стационарного решения. В то же время учет нестационарного слагаемого позволяет проводить расчет и нестационарных процессов.

Выражения для вычисления поверхностного интеграла включают в себя неизвестные значения переменной φf на гранях ячеек. Для определения значений φf используются противопоточные схемы первого и второго порядка точности. Схемы первого порядка точности используются в некоторых случаях для получения начального распределения, от которого возможен расчет со вторым поряд-

ком по пространству. Дополнительно в целях повышения устойчивости алгоритма используется линейризация источниковых слагаемых и линейная релаксация переменных.

Решение дискретизованных уравнений, а также обновление параметров течения происходит по схеме, изображенной на рисунке 1.

Результаты и анализ

В работе приводятся результаты численного моделирования в рамках гидродинамического подхода и метода SUMO участка дорожной сети одного из центральных районов Петербурга (рисунок 2).

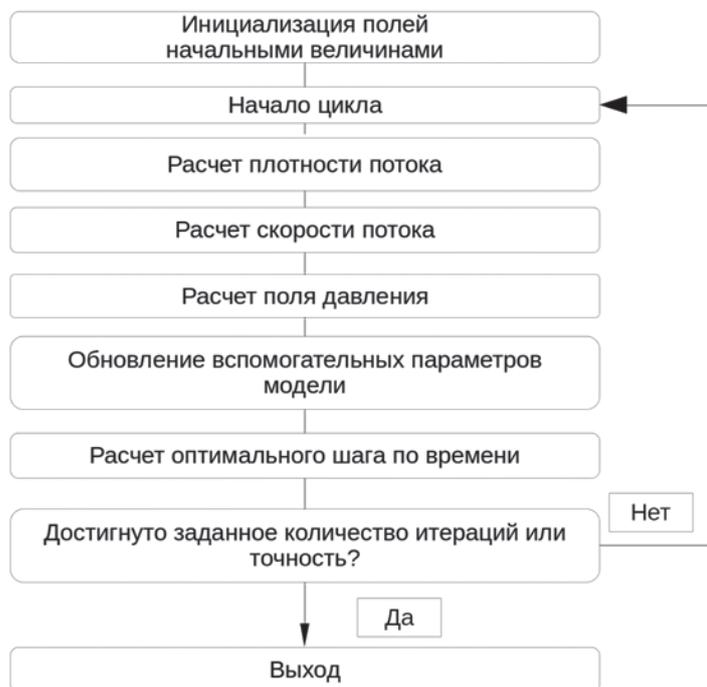


Рисунок 1. Численная схема континуального алгоритма

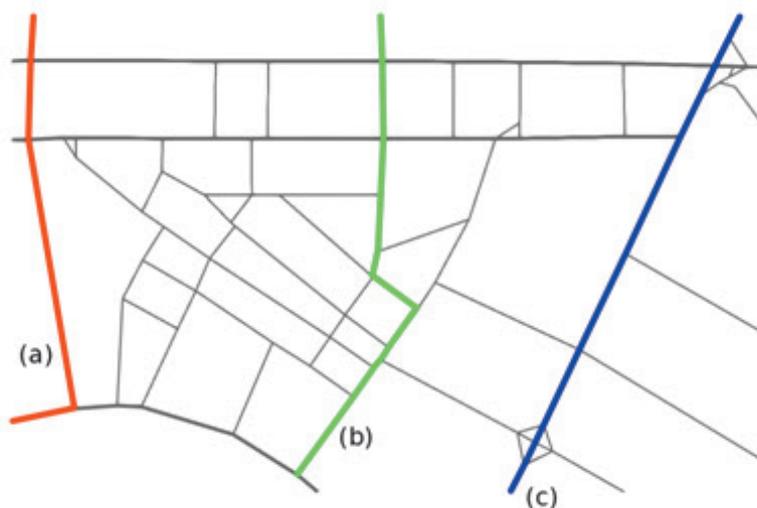


Рисунок 2. Участок дорожной сети региона с преобладающим движением трафика сверху вниз. Буквами обозначены маршруты, по которым проводилось сравнение двух подходов: маршрут 1 (a), маршрут 2 (b), маршрут 3 (c)

Моделировалась ситуация утреннего трафика, когда большая часть машин едет в центр города по определенным маршрутам, с доминирующим направлением в масштабах всей сети. Было получено распределение скорости и плотности потока в каждой точке

сети: в рамках метода SUMO — нестационарное распределение, в гидродинамическом подходе — квазистационарное.

Характерные распределения давления и скорости в транспортном потоке представлены на рисунках 3 и 4.

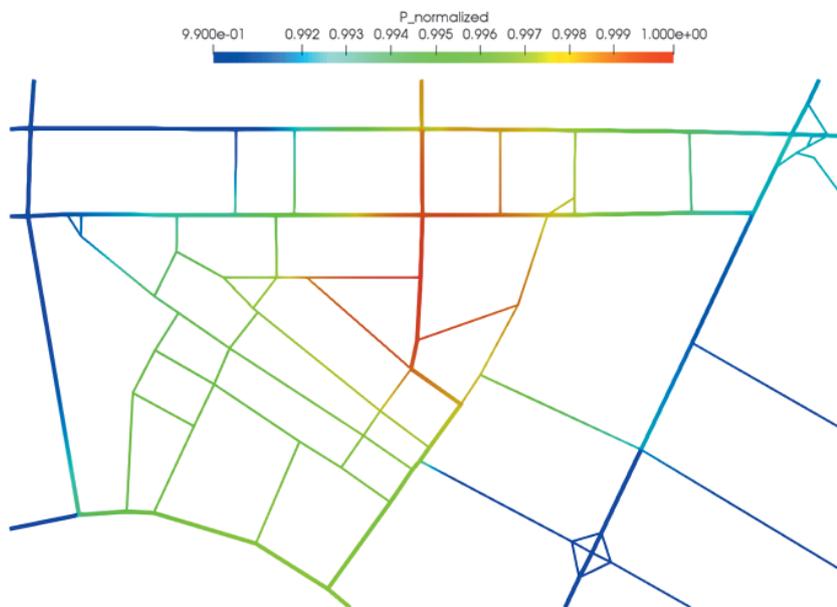


Рисунок 3. Распределение нормированного давления в области

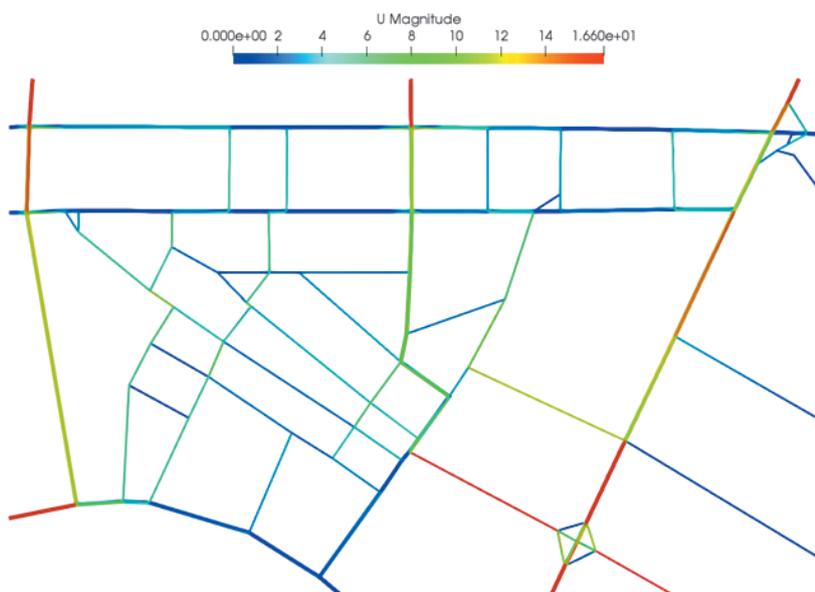


Рисунок 4. Распределение скорости дорожного трафика в области

Можно отметить локальный рост давления в верхне-центральной части дорожной сети, что обусловлено взаимодействием центрального и двух боковых вертикальных въездов, приводящих к увеличению взаимного влияния соседних транспортных

средств друг на друга и их дальнейшему перераспределению на соседние второстепенные участки дорожной сети.

Сравнение двух подходов осуществлялось по оценке второй нормы по каждому из трех отдельно взятых маршрутов, отображенных

на рисунке 2. Для этого каждый маршрут представлялся в виде элементарных отрезков дорог (от перекрестка до перекрестка). Для каждого отрезка i вычислялись среднее по времени и пространству значение скорости потока V_{ri} для каждого из двух подходов и их абсолютная разность $|\Delta V_{ri}|$. Для всего массива скоростей потока и полученных разностей вычислялись вторые нормы $M_{V2} = \sqrt{\sum_i V_{ri}^2}$ и $M_{\Delta 2} = \sqrt{\sum_i \Delta V_{ri}^2}$. Затем

рассчитывалось отношение этих норм, при этом норма по скорости выбиралась максимальной из норм для SUMO и гидродинамического (CFD) подходов:

$$\lambda = 100 \cdot \frac{M_{\Delta 2}}{\text{MAX}(M_{V2, \text{SUMO}}, M_{V2, \text{CFD}})}.$$

Параметр λ использовался для оценки согласованности двух подходов для различных участков дорожной сети. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение результатов расчетов SUMO и континуальной моделью для трех маршрутов

Маршрут	Вторая норма, SUMO	Вторая норма, CFD	Вторая норма, ΔV	λ
Маршрут 1	21,45	32,31	11,37	35,19
Маршрут 2	30,81	25,92	11,73	38,07
Маршрут 3	29,27	29,91	3,91	13,09

Видно, что наилучшее соответствие между подходами обеспечивается для участка с минимальным количеством дополнительных съездов, что хорошо согласуется с общими представлениями о применимости гидродинамической модели и предыдущими результатами расчетов.

Дополнительно для гидродинамического подхода было проведено тестовое моделирование Т-образного перекрестка с второстепенным съездом (рисунок 5).

В базовом режиме условия заданы таким образом, что транспортный поток, поступающий со въезда слева, делится в соотношении 1 : 1 между второстепенным и правым съездами. При сохранении граничных условий на входе и выходах ширина проезжей части второстепенного съезда уменьшалась, что привело к уменьшению транспортного потока через этот съезд (таблица 2).

Таким образом было промоделировано квазистационарное распределение транспорт-



Рисунок 5. Схема Т-образного перекрестка с изменяемым второстепенным съездом

Таблица 2. Результаты расчета Т-образного перекрестка с различной шириной бокового выезда

Отношение размера бокового выезда к основному	Поток через боковой выезд, машин/(м с)	Поток через основной выезд, машин/(м с)	Доля потока через боковой выезд	Доля потока через основной выезд
1	0,83	0,83	0,50	0,50
0,5	4,60E-01	1,21E+00	0,27	0,72
0,25	2,38E-01	1,43E+00	0,14	0,85
0,125	1,18E-01	1,55E+00	0,07	0,92

ного потока при перекрытии второстепенного съезда, что может быть вызвано, в частности, переключением светофора или возникновением внештатной ситуации на съезде.

Выводы

В работе было проведено численное моделирование участка дорожной сети одного из центральных районов Петербурга в рамках двух подходов: непрерывного гидродинамического и SUMO. Было продемонстрировано удовлетворительное согласие двух подходов на сложном участке сети. Отмечено, что минимальное расхождение было получено на прямолинейном участке с минимальным количеством боковых ответвлений, на которые уходит трафик, что согласуется с общими представлениями о применимости предложенного гидродинамического подхода и прошлыми работами [22, 23].

Основным выводом по этой части работы может послужить то, что гидродинамиче-

ский подход в силу своей экономичности может быть использован также для получения первоначальной картины транспортного потока, которая затем может быть уточнена детальными микроскопическими моделями, такими как SUMO.

Также было проведено моделирование перекрытия съезда одного перекрестка в рамках непрерывной модели. Нестационарный процесс перекрытия моделировался в рамках квазистационарного подхода с последовательным сужением проезжей части перекрываемого съезда. Было показано, что такой подход позволяет с малыми затратами описать уменьшение транспортного потока по выбранному участку дороги и может быть интегрирован в глобальную модель.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-07-00430.

Список литературы

1. Баймурзина Д.Р., Гасников А.В., Гасникова Е.В., Двуреченский П.Е., Ершов Е.И., Кубентаева М.Б., Лагуновская А.А. Универсальный метод поиска равновесий и стохастических равновесий в транспортных сетях // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2019. Т. 59, № 1. С. 21–36.
2. Nesterov Yu. Universal Gradient Methods for Convex Optimization Problems // CORE Discussion Paper 2013/63. 2013. http://www.uclouvain.be/cps/ucl/doc/core/documents/coredp2013_26web.pdf.
3. Гасников А.В., Дорн Ю.В., Нестеров Ю.Е., Шпирко С.В. О трехстадийной версии модели стационарной динамики транспортных потоков // Математическое моделирование. 2014. Т. 26. № 6. С. 34–70. arXiv:1405.7630.
4. Patriksson M. The Traffic Assignment Problem. Models and Methods. Utrecht, Netherlands: VSP, 1994.
5. Nesterov Y., de Palma A. Stationary Dynamic Solutions in Congested Transportation Networks: Summary and Perspectives // Networks Spatial Econ. 2003. № 3(3). P. 371–395.
6. Недяк А.В., Рудзейт О.Ю., Зайнетдинов А.Р. Классификация методов

моделирования транспортных потоков // Вестник Евразийской науки. 2019. № 6. <https://esj.today/PDF/87SAVN619.pdf> (доступ свободный).

7. Alvarez Lopez, Pablo and Behrisch, Michael and Bieker-Walz, Laura and Erdmann, Jakob and Flötteröd, Yun-Pang and Hilbrich, Robert and Lücken, Leonhard and Rummel, Johannes and Wagner, Peter and Wießner, Evamarie. Microscopic Traffic Simulation Using SUMO // 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). 2019. P. 2575–2582.

8. Krauss S. Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics: Ph. D. Thesis, Universität zu Köln. 1998.

9. PTV Vissim [Электронный ресурс]. <https://www.ptvgroup.com/en/solutions/products/ptv-vissim> (дата обращения 24.11.2020).

10. MATSim [Электронный ресурс]. <https://www.matsim.org> (дата обращения 24.11.2020).

11. Helbing D. Gas-Kinetic Derivation of Navier-Stokes-Like Traffic Equations // Phys. Rev. E. 1996. No. 53(3). P. 2366.

12. Wagner C. A Navier-Stokes-Like Traffic Model // Physica A. 1997. No. 245. P. 124–138.

13. Helbing D., Henneke A., Shvetsov V., Treiber M. Micro- and Macro- Simulation of Freeway Traffic // *Math. and Comp. Modelling*. 2002. No. 35. P. 517–547.

14. Méndez A.R., Velasco R.M. An Alternative Model in Traffic Flow Equations // *Transp. Res. Part B*. 2008. No. 42. P. 782–797.

15. Tosin A., Zanella M. Kinetic-Controlled Hydrodynamics for Traffic Models with Driver-Assist Vehicles // *Multiscale Model. Simul.* 2019. No. 17(2). P. 716–749.

16. Холодов Я.А., Алексеенко А.Е., Васильев М.О., Холодов А.С. Построение математической модели дорожного перекрестка на основе гидродинамического подхода // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2014. № 6(4). С. 503–522.

17. Stefan Krauß, Peter Wagner, Christian Gawron. Metastable States in a Microscopic Model of Traffic Flow // *Physical Review E*. 1997. Vol. 55, No. 304. P. 55–97.

18. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Изд-во «Дрофа», 2003. 840 с.

19. Чёрный С.Г., Жиленков А.А. Существование и достижимость консенсуса как проблема обеспечения надёжности в распределённых приложениях и киберфизических системах // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2020. Т. 16. № 2. С. 92–104.

20. Жиленков А.А., Чёрный С.Г. Повышение степени отказоустойчивости в сложных программно-аппаратных системах сетевого управления // *Датчики и системы*. 2019. № 12 (242). С. 11–17.

21. Versteeg H.K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. 2nd Edition. Pearson Education Limited, UK, 2007.

22. Курочкин Л.М., Чернышев А.С., Курочкин М.А., Чуватов М.В. Анализ целесообразности разработки гибридных моделей транспортных систем // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2019. № 4 (48). С. 99–109.

23. Глазунов В.В., Чуватов М.В., Чернышев А.С., Курочкин Л.М. Метод и технология интеграции дискретной и сплошно-средней моделей транспортных потоков региона // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика.*

Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12. № 4. С. 111–122.

References

1. Baimurzina D.R., Gasnikov A.V., Gasnikova E.V., Dvurechenskii P.E., Ershov E.I., Kubentaeva M.B., Lagunovskaya A.A. Universal’nyi metod poiska ravnovesii i stokhasticheskikh ravnovesii v transportnykh setyakh [Universal Method for Finding Equilibria and Stochastic Equilibria in Transport Networks]. *Zhurnal vychislitel’noi matematiki i matematicheskoi fiziki — Mod. and Math. Phys.*, 2019, Vol. 59, No. 1, pp. 21–36. [in Russian].

2. Nesterov Yu. Universal Gradient Methods for Convex Optimization Problems. *CORE Discussion Paper*, 2013/63. 2013. http://www.uclouvain.be/cps/ucl/doc/core/documents/coredp2013_26web.pdf.

3. Gasnikov A.V., Dorn Yu.V., Nesterov Yu.E., Shpirko S.V. O trekhstadiinnoi versii modeli statsionarnoi dinamiki transportnykh potokov [On a Three-Stage Version of the Model of Stationary Dynamics of Transport Flows]. *Matematicheskoe modelirovanie — Mathematical Modelling*, 2014, Vol. 26, No. 6, pp. 34–70. arXiv:1405.7630. [in Russian].

4. Patriksson M. *The Traffic Assignment Problem. Models and Methods*. Utrecht, Netherlands: VSP, 1994.

5. Nesterov Y., de Palma A. Stationary Dynamic Solutions in Congested Transportation Networks: Summary and Perspectives. *Networks Spatial Econ.*, 2003, No. 3(3), pp. 371–395.

6. Nedyak A.V., Rudzeit O.Yu., Zainetdinov A.R. Klassifikatsiya metodov modelirovaniya transportnykh potokov [Classification of Methods for Modeling Transport Flows]. *Vestnik Evraziiskoi nauki — Bulletin of Eurasian Science*, 2019, No. 6. <https://esj.today/PDF/87SAVN619.pdf> (dostup svobodnyi). [in Russian].

7. Alvarez Lopez, Pablo and Behrisch, Michael and Bieker-Walz, Laura and Erdmann, Jakob and Flötteröd, Yun-Pang and Hilbrich, Robert and Lücken, Leonhard and Rummel, Johannes and Wagner, Peter and Wießner, Evamarie. Microscopic Traffic Simulation Using SUMO. *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. 2019, pp. 2575–2582.

8. Krauss S. *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics: Ph. D. Thesis*, Universit"atzuK"oln, 1998.
9. *PTV Vissim* [Electronic Resource]. <https://www.ptvgroup.com/en/solutions/products/ptv-vissim> (accessed 24.11.2020).
10. *MATSim* [Electronic Resource]. <https://www.matsim.org> (accessed 24.11.2020).
11. Helbing D. Gas-Kinetic Derivation of Navier-Stokes-Like Traffic Equations. *Phys. Rev. E.*, 1996, No. 53(3), pp. 2366.
12. Wagner C. A Navier-Stokes-Like Traffic Model. *Physica A.*, 1997, No. 245, pp. 124-138.
13. Helbing D., Henneke A., Shvetsov V., Treiber M. Micro- and Macro- Simulation of Freeway Traffic. *Math. and Comp. Modelling*, 2002, No. 35, pp. 517-547.
14. Méndez A.R., Velasco R.M. An Alternative Model in Traffic Flow Equations. *Transp. Res. Part B.*, 2008, No. 42, pp. 782-797.
15. Tosin A., Zanella M. Kinetic-Controlled Hydrodynamics for Traffic Models with Driver-Assist Vehicles. *Multiscale Model. Simul.*, 2019, No. 17(2), pp. 716-749.
16. Kholodov Ya.A., Alekseenko A.E., Vasil'ev M.O., Kholodov A.S. Postroenie matematicheskoi modeli dorozhnogo perekrestka na osnove gidrodinamicheskogo podkhoda [Development of Mathematical Model of Road Intersection on the Basis of the Hydrodynamic Approach]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie — Computer Research and Modeling*, 2014, No. 6(4), pp. 503-522. [in Russian].
17. Stefan Krauß, Peter Wagner, Christian Gawron. Metastable States in a Microscopic Model of Traffic Flow. *Physical Review E.*, 1997, Vol. 55, No. 304, pp. 55-97.
18. Loitsyanskii L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of Liquid and Gas]. Moscow, Drofa Publ., 2003. 840 p. [in Russian].
19. Chernyi S.G., Zhilenkov A.A. Sushchestvovanie i dostizhimost' konsensusa kak problema obespecheniya nadezhnosti v raspredelennykh prilozheniyakh i kiberfizicheskikh sistemakh [Existence and Reach Consensus as a Problem of Reliability in Distributed Applications and Cyber-Physical Systems]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2020, Vol. 16, No. 2, pp. 92-104. [in Russian].
20. Zhilenkov A.A., Chernyi S.G. Povyshenie stepeni otkazoustoichivosti v slozhnykh programmno-apparatnykh sistemakh setevogo upravleniya [Increasing Fault Tolerance in Complex Hardware-Software Network Control Systems]. *Datchiki i sistemy — Sensors and Systems*, 2019, No. 12 (242), pp. 11-17. [in Russian].
21. Versteeg H.K., Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. 2nd Edition. Pearson Education Limited, UK, 2007.
22. Kurochkin L.M., Chernyshev A.S., Kurochkin M.A., Chuvatov M.V. Analiz tselesoobraznosti razrabotki gibridnykh modelei transportnykh sistem [Analysis of the Feasibility of Developing Hybrid Models of Transport Systems]. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii — Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2019, No. 4 (48), pp. 99-109. [in Russian].
23. Glazunov V.V., Chuvatov M.V., Chernyshev A.S., Kurochkin L.M. Metod i tekhnologiya integratsii diskretnoi i sploshnosrednoi modelei transportnykh potokov regiona [Method and Technology of Integration of Discrete and Continuous-Medium Models of Transport Flows in the Region]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie — Scientific and technical Bulletin of the Saint-Petersburg State Polytechnic University. Computer Science. Telecommunications. Management*, 2019, Vol. 12, No. 4, pp. 111-122. [in Russian].



Мартынов О. В.
Martynov O. V.

кандидат физико-математических наук,
доцент, доцент кафедры «Робототехника
и комплексная автоматизация»,
ФГБОУ ВО «Ковровская государственная
технологическая академия
им. В.А. Дегтярева»,
г. Ковров, Российская Федерация



Карпенков А. С.
Karpenkov A. S.

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Робототехника и
комплексная автоматизация»,
ФГБОУ ВО «Ковровская государственная
технологическая академия
им. В.А. Дегтярева»,
г. Ковров, Российская Федерация

УДК 004.896:535.8

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-3-68-78

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ОТСЛЕЖИВАНИЯ УЧАСТКОВ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ ПО ДАННЫМ ВИДЕОПОТОКА

В статье описывается, разработанный авторами метод определения скорости объекта на основе динамического отслеживания опорных участков дорожного покрытия в потоке изображений, получаемого с видеокamеры. Отслеживание опорных участков осуществляется на основе формирования разностного функционала по функциям цветности изображений опорных участков, сохранённых на первичном кадре, и участков, получаемых при сканировании текущего кадра видеопотока.

Разработанный авторами метод определения скорости объекта на основе динамического отслеживания опорных участков дорожного покрытия в потоке изображений, получаемого с видеокamеры, заключается в следующей последовательности действий. Сначала осуществляется выбор и сохранение в памяти функции цветности максимально неоднородных участков изображения в первичном кадре (на основе определения коэффициента неоднородности участка изображения). Затем проводится оценка достоверности распознавания опорного участка на текущем кадре видеопотока (на основе определения коэффициента достоверности). После этого осуществляется расчет смещения координат опорных областей, с отбраковкой недостоверных областей распознавания опорных участков. После усреднения смещений областей (на основе весовых коэффициентов, определяемых по коэффициенту достоверности и коэффициенту неоднородности опорной области) осуществляется расчет скорости подвижного объекта.

Приведена проверка работоспособности метода, которая проводилась на автомобиле, в котором была установлена видеокamera и спутниковая навигационная система, работающая в режиме сантиметровой точности. Показано, что использование метода динамического отслеживания участков дорожного покрытия для нахождения скорости объекта позволяет определить эту величину с погрешностью, соизмеримой с погрешностью спутниковой навигационной системы сантиметровой точности. Показаны достоинства и недостатки разработанного авторами метода по сравнению с существующими.

Ключевые слова: визуальная одометрия, навигационная система, беспилотное транспортное средство, цифровая обработка видеосигнала.

CALCULATION OF VELOCITY OF A VEHICLE BASED ON DYNAMIC TRACKING OF ROAD PAVEMENTS USING VIDEO STREAM DATA

The article describes the method developed by the authors for calculation the velocity of a vehicle based on dynamic tracking of sections of the road surface obtained from a video camera. The advantages and disadvantages of this method are shown in comparison with existing methods. The complex development of a number of additional measures necessary for the effective application of this method to determine the speed in real conditions is given.

The article describes the method developed by the authors for calculation the velocity of a vehicle based on dynamic tracking of sections of the road surface obtained from a video camera. Tracking of the reference areas is carried out on the basis of the formation of the difference functional according to the chromaticity functions of the images of the reference areas saved on the primary frame and areas obtained by scanning the current frame of the video stream.

The method developed by the authors for calculation the velocity of a vehicle based on dynamic tracking of reference sections of the road surface in the stream of images obtained from a video camera consists in the following sequence of actions. First, the selection and storage of the chromaticity function of the most inhomogeneous areas of the image in the primary frame is carried out (based on the calculations of the coefficient of inhomogeneity of the image area). Then, the reliability of the recognition of the reference area is assessed on the current frame of the video stream (based on the calculations of the confidence factor). After that, the offset of the coordinates of the reference areas is calculated, with the rejection of unreliable recognition areas of the reference areas. After averaging the displacements of the regions (based on the weight coefficients determined by the coefficient of reliability and the coefficient of inhomogeneity of the reference region), the speed of the moving vehicle is calculated.

A test of the efficiency of the method is presented, which was carried out on a car in which a video camera and a satellite navigation system operating in centimeter accuracy mode were installed. It is shown that the use of the method of dynamic tracking of pavement sections to find the speed of an object makes it possible to determine this value with an error commensurate with the error of the satellite navigation system working in centimeter accuracy mode. The advantages and disadvantages of the method developed by the authors in comparison with the existing ones are shown.

Key words: visual odometry, navigation system, unmanned vehicle, digital video processing.

В настоящее время всё большую популярность получает задача автономной навигации движущегося объекта. Это относится как к движению транспортных средств по дорожной магистрали, так и к всевозможным объектам, обеспечивающим перемещение грузов по пересечённой местности. Насущная необходимость решения этой задачи обусловлена многими причинами, в частности:

- потребностью в беспилотных транспортных средствах (БПТС), обеспечивающих доставку пассажиров и груза к пункту назначения без участия человека;
- потребностью в обеспечении кратковременного автономного движения пилотируемого транспортного средства;
- потребностью в повышении безопасности движения средств передвижения;

- потребностью развития робототехнических средств, включающих обеспечение их движения как по дорогам общего пользования, так и по пересечённой местности.

Для реализации этих потребностей требуется точная навигации указанных средств (точное позиционирование и ориентация в пространстве), а также возможности их привязки к транспортным линиям по глобальной и локальной картам.

Наиболее эффективным и распространённым средством навигации является космическая навигация, однако позиционирование движущихся объектов часто сильно осложняется в случае существенного ухудшения получения данных с космических спутников по причине особенностей местности (горы, леса) и прочих помех. В таких случаях необ-

ходимо подключать автономную навигацию, не завязанную на работу спутников. Одним из базовых параметров, необходимых для обеспечения автономного определения координат объекта, является его скорость. Существующие методы и средства определения этого параметра при различных условиях и состояниях дорожного полотна обладают рядом недостатков, затрудняющих эффективное получение координат объекта в любой момент времени.

Эта статья посвящена описанию метода, разработанного авторами, по определению скорости объекта на основе динамического отслеживания участков дорожного покрытия получаемого с видеокамеры изображения. Этот метод относится к методам визуальной одометрии.

Для обеспечения навигации объекта необходимо определять в любой момент времени следующие параметры:

- координаты объекта в различных системах отсчёта;
- ориентацию продольной оси объекта (курс, тангаж и крен).

В случае автономной навигации определение координат осуществляется на основе измерения величины и направления скорости движения объекта в реальном времени. Это определяет потребность в точном определении величины скорости объекта в любой момент времени.

Основными средствами определения скорости объекта являются:

- механические датчики скорости;
- доплеровские датчики скорости;
- спутниковая навигационная система;
- датчики скорости визуальной одометрии.

Механический одометр имеет собственную погрешность до 5 %. В зависимости от условий эксплуатации транспортного средства, износа узлов и агрегатов, использования нештатных запчастей суммарная погрешность прибора может достигать 12–15 %.

На погрешность будут влиять такие факторы:

- несоответствие диаметра шин заводским (на которых производилась калибровка одометра);

- давление воздуха в шинах и состояние протектора;
- состояние дорожного покрытия (проскальзывание), закругления дороги;
- наличие или отсутствие груза;
- степень изношенности съёмного механизма одометра;
- точность заводской калибровки (как правило, пробег немного завышается).

Недостатком доплеровских датчиков скорости является сильная зависимость их точности измерения скорости от типа подстилающей поверхности и их положения относительно поверхности. Более того, данный тип датчиков чувствителен к шуму окружающей среды и шуму от других источников сигнала, работающих на схожих частотах [1–3].

Спутниковая навигационная система позволяет с высокой степенью точности измерить абсолютную скорость передвижения мобильного объекта в случае открытых пространств. Однако в случае густой растительности или плотной застройки точность измерений сильно падает.

Одним из способов повысить точность определения скорости движения объекта является использование методов визуальной одометрии, которые позволяют достичь точностей измерения скоростей с погрешностью в пределах 0,1–2,0 % [4].

Существующие методы визуальной одометрии можно разделить на три группы:

1. методы, базирующиеся на отслеживании изменения местоположения особых точек на изображении;
2. методы, основывающиеся на отслеживании изменения местоположения яркостной группы пикселей изображения;
3. методы, основывающиеся на отслеживании изменения местоположения участка изображения.

В первой группе методов осуществляется выбор и определение изменения местоположения особых точек (углы, прямые линии, кривые) изображения на последовательности кадров. На основании вычисленного изменения местоположения особых точек осуществляется расчет векторов скорости для каждой пары точек (на предыдущем кадре изображения и текущем). После этого осуществляется

расчет итогового вектора скорости камеры путем фильтрации множества значений расчетных векторов скоростей с предыдущего шага. Как правило, в качестве фильтра используется фильтр Калмана. По полученному итоговому вектору скорости камеры осуществляется расчет вектора скорости объекта, на котором установлена камера [5–11].

Вторая группа методов определяет изменение вектора скорости объекта по изменению яркости пикселей изображения видеокadra [12–16]. В методах данной группы осуществляется расчет смещения яркостной группы пикселей изображения между соседними кадрами. В качестве таких яркостных групп пикселей может выступать как каждый пиксель изображения (как в случае алгоритма Хорна-Шунка), так и распределенных по изображению групп пикселей (как в случае алгоритма Лукаса-Канаде). Достоинством алгоритмов первого типа является то, что отсутствует этап выбора яркостных групп пикселей на изображении. А их недостаток заключается в меньшей помехоустойчивости, по сравнению с алгоритмами второго типа. Недостатком алгоритмов второго типа является необходимость выбора таких яркостных групп пикселей, чтобы обеспечивалась высокая контрастность по сравнению с соседними к ним пикселями.

Общим недостатком методов визуальной одометрии первых двух групп является низкая точность работы на слаботекстурированных поверхностях, таких как снег, асфальт, бетон, трава.

На данных поверхностях высокую точность показывают методы третьей группы, которые заключаются в выделении и последующем отслеживании изменения местоположения одной или нескольких областей изображения [17]. В методах данной группы используются различные алгоритмы поиска объектов, образов на изображении. Основными характеристиками сходства, которые широко используются при сопоставлении областей изображения, являются: сумма квадратов разностей, сумма абсолютных разностей и нормализованная функция взаимной корреляции. Использование норма-

лизованной функции взаимной корреляции позволяет добиться большей точности, однако необходимо вычислительное устройство более высокой производительности [18].

Общий алгоритм работы методов третьей группы начинается с получения пары последовательных кадров изображения. После этого из первого кадра выбирается область изображения и затем она сопоставляется со следующим кадром посредством нормализованной взаимной корреляции. Затем вычисляется смещение пикселей между выделенной областью на первоначальном изображении и точкой максимальной корреляции. После измерения горизонтального и вертикального смещений пикселей эти смещения пикселей преобразуются в физическое горизонтальное и вертикальное смещение камеры (в метрах) с использованием параметров внутренней и внешней калибровки камеры.

Для эффективной работы методов визуальной одометрии третьей группы в окружающей среде должно присутствовать достаточное освещение и статическая сцена с достаточной текстурой, чтобы можно было выделить видимое движение [19]. В областях с гладким полом и с низкой текстурой очень важно учитывать направленный солнечный свет и условия освещения, которые могут приводить к неравномерности яркости изображения. Более того, тени от статических или динамических объектов или от самого транспортного средства могут существенно снизить точность расчета пиксельного смещения и, таким образом, привести к ошибочной оценке смещения [20].

Предлагаемый метод основан на отслеживании положения выделенных областей изображения дорожного покрытия в видеопотоке при движении объекта. Отслеживание участков дорожного покрытия (выделенных областей) в данном случае означает сохранение цвета (RGB параметра) каждого пикселя этих областей изображения в памяти с дальнейшим распознаванием этих областей на новых кадрах видеопотока. Определение величины изменения положения выделенных областей в плоскости изображения позволяет определить изменение положения самого

объекта, что, в свою очередь, даёт возможность вычислить скорость его движения.

Применение этого метода в реальных условиях затруднено целым рядом существенных проблем. Так, сложность отслеживания выделенных областей дороги обусловлена следующим:

- поверхность дорожного покрытия, как правило, обладает слабой неоднородностью;
- освещённость дорожного покрытия при движении может сильно изменяться;
- при поворотах движущегося объекта может изменяться как угол зрения на выделенную область, так и её ориентация в изображении;
- масштаб выделенной области меняется при изменении расстояния до неё;
- возможно появление помех на дороге, загораживающих выделенную область.

Кроме того, возникают проблемы при расчёте смещения объекта:

- калибровочный коэффициент пересчёта смещения области изображения в пикселях в смещение объекта в метрах зависит от расстояния до области из-за изменения масштаба изображения;
- для отслеживания областей и расчёта смещения объекта в реальном времени необходимо высокое быстродействие вычислений.

Для решения этих проблем была проведена комплексная разработка целого ряда дополнительных методов как для эффективного отслеживания областей, так и для оптимальной обработки полученных данных. Эти методы являются неотъемлемой частью описываемого метода.

Предлагаемый метод состоит из следующих этапов:

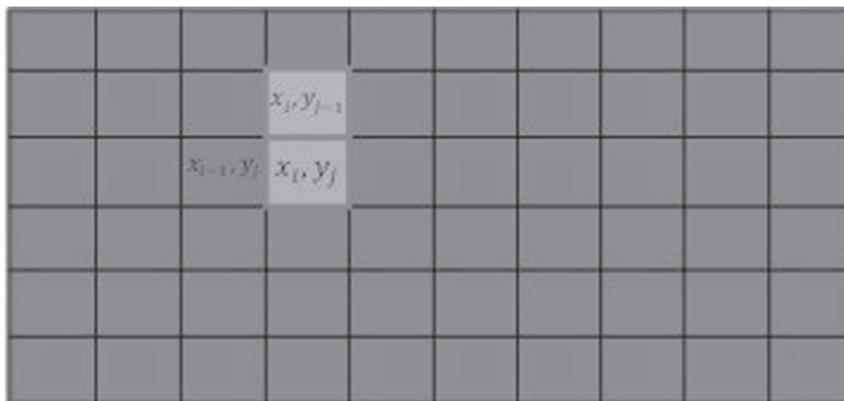


Рисунок 1. Схема выбора координат при расчёте коэффициента неоднородности области изображения

1. В первичном кадре видеопотока проводится выделение опорных областей изображения и сохранение функции цвета (функции полученной по RGB параметрам) каждого пикселя этих областей в памяти.

Предварительно всё изображение разделяется на заданное количество одинаковых по площади участков. В каждом участке осуществляется поиск координат области (с заданным размером), в которых она обладает максимальным коэффициентом неоднородности. Коэффициент неоднородности определяется по формуле:

$$k_{no} = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \times \sqrt{\left(\frac{\partial f_{RGB}(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_{RGB}(x, y)}{\partial y}\right)^2} dx \cdot dy,$$

где $f_{RGB}(x, y)$ — функция цвета пикселя с координатами x, y , зависящая от интенсивности красной, зелёной и синей его составляющих (цветовая функция); x_1, y_1, x_2, y_2 — координаты границы области. Для дискретного представления коэффициент рассчитывается следующим образом (рисунок 1):

$$k_{no} = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_2} \sum_{i=2}^{N_1} \left(f_{RGB}(x_i, y_j) - f_{RGB}(x_{i-1}, y_j)\right)^2 + \dots + \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=2}^{N_2} \left(f_{RGB}(x_i, y_j) - f_{RGB}(x_i, y_{j-1})\right)^2}.$$

Полученные области изображения сохраняются в массивы цвета (сохраняется функция цветности области) и массив координат границ областей. При превышении смещения координат опорных областей от начального положения в текущем кадре видеопотока заданному критическому смещению, либо уменьшению максимальной по областям достоверности обнаружения ниже критической достоверности процедура выбора областей повторяется в этом кадре. Это позволяет существенно уменьшить погрешность при изменении освещённости дороги, а также при поворотах объекта.

Такой подход к выбору опорных областей изображения дорожного покрытия позволяет

существенно повысить вероятность достоверного обнаружения этих областей на последующих кадрах (т.к. уменьшается вероятность выделения области со слабой неоднородностью).

2. В последующих кадрах видеопотока проводится поиск выделенных опорных областей.

Распознавание опорной области осуществляется на основе формирования разностного функционала по функциям цветности опорной области и области, получаемой при сканировании текущего кадра видеопотока. Разностный функционал ($RF(x, y_i)$) определяется по следующей формуле:

$$RF(x_t, y_t) = \int_{x_0+x_t}^{x_0+x_t+(x_2-x_1)} \int_{y_0+y_t}^{y_0+y_t+(y_2-y_1)} |f_{RGB}(x_0 + x_t + x, y_0 + y_t + y) - \dots \\ \dots - f_{RGBop}(x, y); \rho(x, y)| \cdot dx \cdot dy,$$

где x_0, y_0 — координаты начала сканирования текущего кадра видеопотока; x_t, y_t — координаты начала получения функционала; x_1, y_1, x_2, y_2 — координаты границы опорной области (рисунок 2); $f_{RGB}(x, y)$ — функция цветности сканируемой области изображения; $f_{RGBop}(x, y)$ — функция цветности опорной области; $\rho(x, y)$ — плотность вероятности нахождения пикселя опорной области вблизи

точки с запомненной координатой x, y (функция вводится для учёта искажения изображения опорной области в текущем кадре видеопотока).

Для уменьшения ошибки обнаружения и увеличения скорости расчётов для каждой опорной области выбирается область сканирования с координатами границ x_0, y_0, x_k, y_k , меньшая области кадра видеопотока. Причём

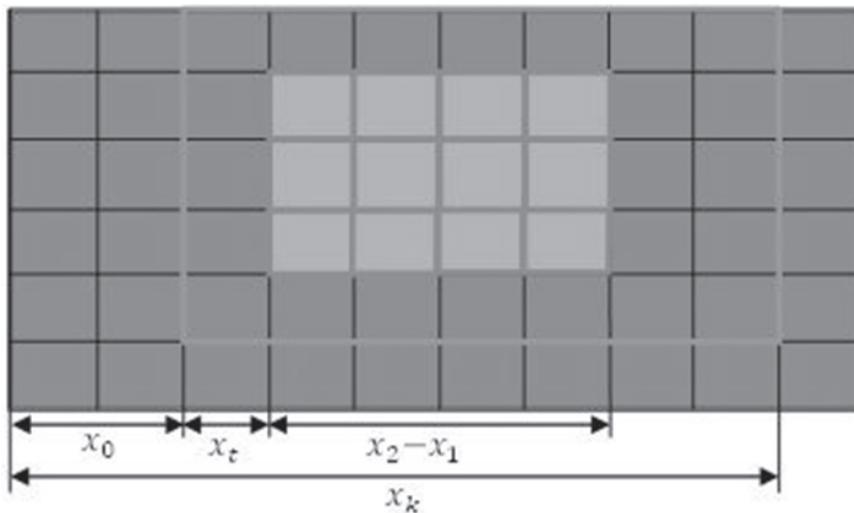


Рисунок 2. Схема выбора координат при сканировании изображения

координаты сканирования выбираются с учётом прогноза изменения положения опорной области (так, при преимущественном движении в одном направлении размер сканирования по движению увеличивается, а в противоположном направлении уменьшается).

Распознавание опорной области в текущем кадре осуществляется нахождением глобального минимума разностного функционала. Координаты области, соответствующие этому минимуму, принимаются за координаты опорной области в данном кадре.

Существенным отличием данного метода от подобных методов, существующих в мировой практике, является то, что отслеживаются не особые точки изображения, а особые области. Такой подход позволяет существенно повысить точность определения смещения кадров в условиях слабой неоднородности дорожного покрытия по причине того, что вероятность чёткого выделения особой области и дальнейшего её достоверного обнаружения в таких условиях выше, чем в аналогичной процедуре для особых точек.

3. Проводится определение проекций скорости объекта по осям OX и OY (OX направлена по направлению скорости движения объекта, а OY — в перпендикулярном направлении), а также, по этим проекциям, величины скорости.

В начале, по разности координат (в пикселях) опорных областей в текущем и предыдущем кадрах определяется набор смещений координат за кадр каждой опорной области. Затем проводится пересчёт этих значений в смещения координат опорной области в метрах путём умножения на калибровочный коэффициент, масштабируемый линейной зависимостью от координат опорной области, отсчитываемых от центра изображения. Для уменьшения нелинейности изменения этого коэффициента при изменении расстояния от точек опорной области поверхности дорожного покрытия до видеокамеры оптическая ось камеры располагается перпендикулярно этой поверхности и проводится компенсация дисторсии изображения.

По значениям смещения координат опорной области (в метрах) проводится определе-

ние смещения координат изображения за кадр с учётом достоверности распознавания каждой опорной области и их коэффициентов неоднородности. Коэффициент достоверности распознавания определяется по формуле:

$$K_{di} = \left(1 - \frac{N_{pmax} \cdot \min(RF_i(x, y))}{N_{pi} \cdot RF_{max}} \right) \cdot 100\%,$$

где $\min(RF(x, y))$ — минимальное значение разностного функционала для данной опорной области на текущем кадре; RF_{max} — разностный функционал, определяемый при самых неблагоприятных условиях распознавания (определяется однократно для данной видеокамеры); N_{pi} — число пикселей в опорной области; N_{pmax} — число пикселей в области, по которой определялся RF_{max} . Для повышения точности получения смещения изображения за кадр проводятся следующие процедуры:

- отбраковываются смещения опорных областей, не соответствующие условию достоверности обнаружения (коэффициент достоверности ниже порогового);
- проводится специализированное усреднение смещений областей (на основе весовых коэффициентов, определяемых по коэффициенту достоверности и коэффициенту неоднородности опорной области).

Изменение координат изображения соответствует величинам изменения координат объекта. Таким образом, проекции скорости объекта определяются как отношение изменения соответствующей координаты к периоду следования кадров видеопотока.

По описанной методике удаётся существенно уменьшить негативное влияние указанных выше факторов отслеживания выделенных областей дороги и расчёта смещения объекта. Однако её применение в реальном времени требует высокого быстродействия расчётов. Эту проблему удалось решить за счёт использования функций `openCL`, реализующих технологию `CUDA` многопоточных вычислений.

Проверка работоспособности метода проводилась на автомобиле Газель Next (рисунок 3), в котором были установлены видеокамера и спутниковая навигационная система

(СНС), работающая в режиме сантиметровой точности.

При движении автомобиля осуществлялось определение величины скорости как по СНС, так и по динамическому отслеживанию участков дорожного покрытия по данным

видеопотока, получаемого с видеокамеры, направленной перпендикулярно дороге (графики скоростей показаны на рисунке 4).

Для анализа влияния существенного искажения изображения на измерение скорости по описываемому методу на участке дороги

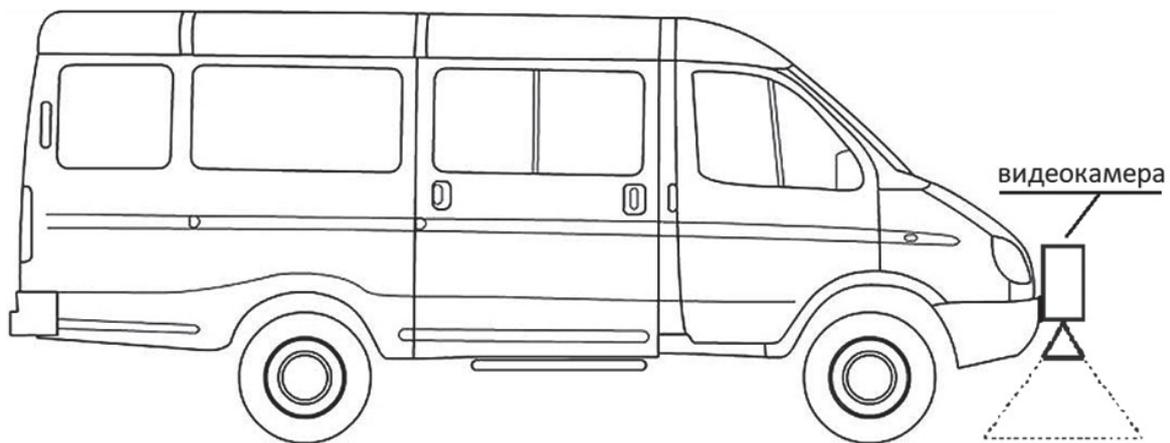


Рисунок 3. Схема расположения видеокамеры на а/м Газель Next

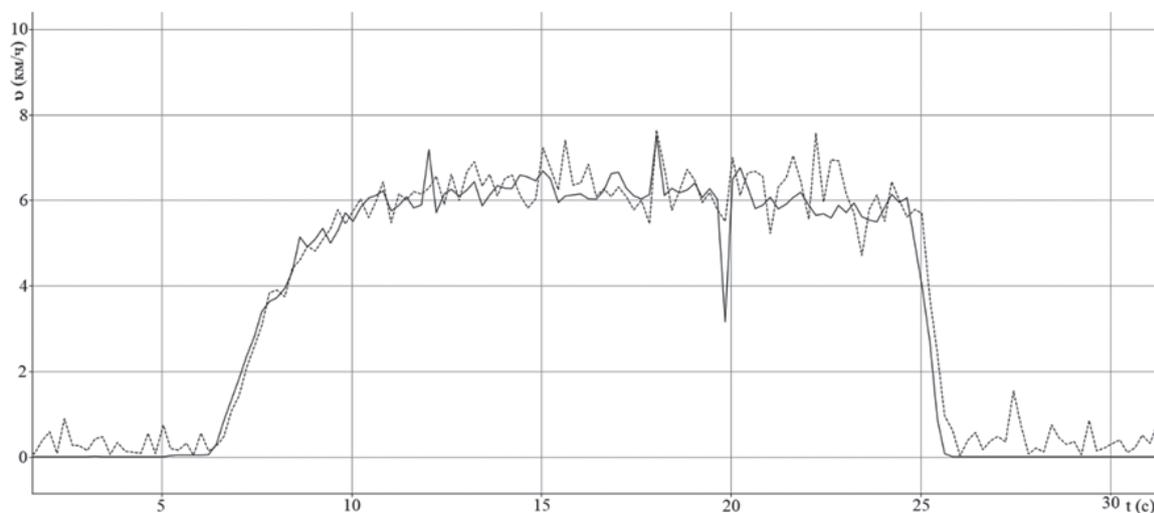


Рисунок 4. Сравнительный график скорости, полученной по видеокамере (непрерывная линия) и скорости, полученной по СНС (пунктирная линия)

от 15 до 23 с была проведена засветка изображения поверхности. Частота измерения скорости по СНС и по видеокамере составляет 5 Гц.

Как видим по графикам рисунка 4, погрешности измерений скорости по СНС (с сантиметровой точностью определения координат) и по видеокамере (при отсутствии сильной засветки в изображении дороги см. рисунок 5) практически совпадают. Даже при наличии сильной засветки выброс не происходит (рисунок 6 справа).

Это обусловлено тем, что имеются участки с хорошей неоднородностью, и при поиске именно они и выбираются в качестве опорных областей. Кроме того, специализированное усреднение смещений областей позволяет провести усреднение по областям с хорошим коэффициентом неоднородности и высоким коэффициентом достоверности обнаружения. Однако, в момент времени 19,5 с имеется разовый выброс. Этот выброс соответствует сильной засветке изображения дорожного покрытия (рисунок 6 слева).

Причём, в этом случае по всему изображению опорные области будут иметь низкий коэффициент неоднородности. На основе проведённого эксперимента можно сделать вывод, что использование метода динамического отслеживания участков дорожного

покрытия для нахождения скорости объекта позволяет определить эту величину с погрешностью, соизмеримой с погрешностью СНС сантиметровой точности. Выделим основные достоинства и недостатки этого метода.

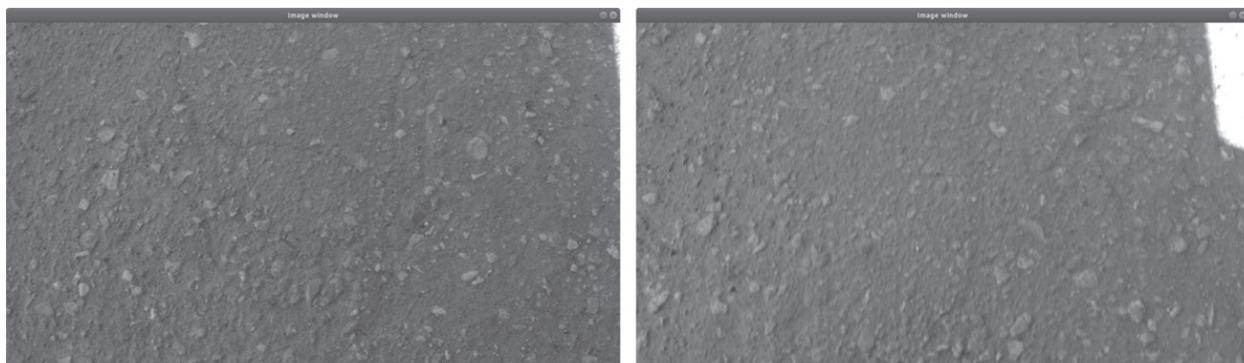


Рисунок 5. Изображения дорожного покрытия без засветки



Рисунок 6. Изображения дорожного покрытия с сильной засветкой (слева — сильная засветка изображения и происходит разовый выброс определения скорости; справа — сильная засветка, выброса не происходит)

Достоинства метода:

1. Такой метод определения скорости является автономным, т.е. не зависит от наличия спутников и качества их решения;
2. Частота получения скорости зависит только от числа кадров в секунду, реализуемой в видеокамере и может составлять 100 Гц и более;
3. Отсутствует зависимость точности от параметров движущегося объекта (наличие проскальзывания, изменение давления в шинах и прочее);
4. Позволяет проводить измерения при сложных погодных условиях (снег, дождь, ветер и прочее), если они не приводят к существенному ухудшению изображения дорожного покрытия;

5. Позволяет проводить измерения, хотя и с пониженной точностью, при неблагоприятном для измерений состоянии дорожного покрытия (мокрый или заснеженный асфальт, грязь на дороге и прочее).

Недостатки метода:

1. Увеличение погрешности измерений при низком качестве изображения дорожного покрытия;
2. Для определения больших значений скоростей требуется видеокамера, обеспечивающая высокое значение числа кадров в секунду (при 30 кадрах/с измеряемая максимальная скорость – 40 км/ч) и видеокарта с большим количеством ядер (> 1000);
3. Возможны выбросы измерения скорости при появлении кадров с низкой неоднородностью.

родностью изображения (засветка, водяное покрытие и прочее).

Вывод

Для компенсации проблем, обуславливающих точность измерения скорости, необходимо провести комплексирование с другими датчиками измерения этой величины.

Список литературы

1. Kreczmer B. Objects Localization and Differentiation Using Ultrasonic Sensors. West Palm Beach: INTECH Open Access Publisher, 2010.
2. Rone W., Ben-Tzvi P. Mapping, Localization and Motion Planning in Mobile Multi-Robotic Systems // *Robotica*. 2013. No. 31(1). P. 1–23.
3. Sanchez A., Castro A.D., Elvira S. Autonomous Indoor Ultrasonic Positioning System Based on a Low-Cost Conditioning Circuit // *Measurement*. 2012. No. 45(3). P. 276–283.
4. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Tutorial: Visual Odometry // *IEEE Robot Autom. Mag.* 2011. No. 18(4). P. 80–92.
5. Nistér D., Naroditsky O., Bergen J. Visual Odometry for Ground Vehicle Applications // *J Field Robot*. 2006. Vol. 23(1). P. 3–20.
6. Howard A. Real-Time Stereo Visual Odometry for Autonomous Ground Vehicles // *Anonymous 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2008. P. 3946–3952.
7. Cumani A. Feature Localization Refinement for Improved Visual Odometry Accuracy // *Int J Circuits Syst Signal Process*. 2011. No. 5(2). P. 151–158.
8. Benseddik H., Djekoune O., Belhocine M. SIFT and SURF Performance Evaluation for Mobile Robot-Monocular Visual Odometry // *J Image Gr*. 2014. No. 2(1). P. 7.
9. Naroditsky O., Zhou X., Gallier J., Roumeliotis S., Daniilidis K. Two Efficient Solutions for Visual Odometry Using Directional Correspondence // *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. Apr. 2012. No. 34(4). P. 818–824.
10. Jiang Y., Xu Y., Liu Y. Performance Evaluation of Feature Detection and Matching in Stereo Visual Odometry // *Neurocomputing*. 2013. No. 120. P. 380–390.
11. Parra I., Sotelo M., Llorca D. Robust Visual Odometry for Vehicle Localization in

Так, комплексирование измерения скорости, получаемой с механического датчика, и скорости, получаемой по видеокамере, позволит избежать выбросов при возникновении кадров с неоднородностью, уменьшить ошибку при низком качестве изображения.

- Urban Environments // *Robotica*. 2010. Vol. 28(03). P. 441–452.
12. Gonzalez R., Rodriguez F., Guzman J. Combined Visual Odometry and Visual Compass for Off-Road Mobile Robots Localization // *Robotica*. 2012. No. 30(6). P. 865–878.
13. Lovegrove S., Davison A., Ibañez-Guzmán J. Accurate Visual Odometry from a Rear Parking Camera // *Proceedings of Anonymous IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. 2011. P. 788–793.
14. Yu Y., Pradalier C., Zong G. Appearance-Based Monocular Visual Odometry for Ground Vehicles // *IEEE/ASME International Conference on Anonymous Advanced Intelligent Mechatronics*. Piscataway. 2011. P. 862–867.
15. Nourani-Vatani N., Roberts J., Srinivasan M. Practical Visual Odometry for Car-Like Vehicles // *IEEE International Conference on Anonymous Robotics and Automation*. Piscataway. 2009. P. 3551–3557.
16. McManus C., Furgale P., Barfoot T. Towards Lighting-Invariant Visual Navigation: an Appearance-Based Approach Using Scanning Laser-Rangefinders // *Robot Auton Syst*. 2013. No. 61(8). P. 836–852.
17. Aqel M., Marhaban M., Iqbal M. Adaptive-Search Template Matching Technique Based on Vehicle Acceleration for Monocular Visual Odometry System // *IEEJ Trans Electr Electr Eng*. 2016. No. 11(6). P. 739–752.
18. Yoo J., Hwang S., Kim S. Scale-Invariant Template Matching Using Histogram of Dominant Gradients // *Pattern Recognit*. 2014. No. 47(9). P. 3006–3018.
19. Gonzalez R., Rodriguez F., Guzman J. Combined Visual Odometry and Visual Compass for Off-Road Mobile Robots Localization // *Robotica*. 2012. No. 30(6). P. 865–878.
20. Nourani-Vatani N., Borges P. Correlation-Based Visual Odometry for Ground Vehicles // *J Field Robot*. 2011. No. 28(5). P. 742–768.

References

1. Kreczmer B. *Objects Localization and Differentiation Using Ultrasonic Sensors*. West Palm Beach, INTECH Open Access Publisher, 2010.
2. Rone W., Ben-Tzvi P. Mapping, Localization and Motion Planning in Mobile Multi-Robotic Systems. *Robotica*, 2013, No. 31(1), pp. 1–23.
3. Sanchez A., Castro A.D., Elvira S. Autonomous Indoor Ultrasonic Positioning System Based on a Low-Cost Conditioning Circuit. *Measurement*, 2012, No. 45(3), pp. 276–283.
4. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Tutorial: Visual Odometry. *IEEE Robot Autom. Mag.*, 2011, No. 18(4), pp. 80–92.
5. Nistér D., Naroditsky O., Bergen J. Visual Odometry for Ground Vehicle Applications. *J Field Robot*, 2006, Vol. 23(1), pp. 3–20.
6. Howard A. Real-Time Stereo Visual Odometry for Autonomous Ground Vehicles. *Anonymous 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008, pp. 3946–3952.
7. Cumani A. Feature Localization Refinement for Improved Visual Odometry Accuracy. *Int J Circuits Syst Signal Process*, 2011, No. 5(2), pp. 151–158.
8. Benseddik H., Djekoune O., Belhocine M. SIFT and SURF Performance Evaluation for Mobile Robot-Monocular Visual Odometry. *J Image Gr.*, 2014, No. 2(1), pp. 7.
9. Naroditsky O., Zhou X., Gallier J., Roumeliotis S., Daniilidis K. Two Efficient Solutions for Visual Odometry Using Directional Correspondence. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell.*, Apr. 2012, No. 34(4), pp. 818–824.
10. Jiang Y., Xu Y., Liu Y. Performance Evaluation of Feature Detection and Matching in Stereo Visual Odometry. *Neurocomputing*, 2013, No. 120, pp. 380–390.
11. Parra I., Sotelo M., Llorca D. Robust Visual Odometry for Vehicle Localization in Urban Environments. *Robotica*, 2010, Vol. 28(03), pp. 441–452.
12. Gonzalez R., Rodriguez F., Guzman J. Combined Visual Odometry and Visual Compass for Off-Road Mobile Robots Localization. *Robotica*, 2012, No. 30(6), pp. 865–878.
13. Lovegrove S., Davison A., Ibañez-Guzmán J. Accurate Visual Odometry from a Rear Parking Camera. *Proceedings of Anonymous IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2011, pp. 788–793.
14. Yu Y., Pradalier C., Zong G. Appearance-Based Monocular Visual Odometry for Ground Vehicles. *IEEE/ASME International Conference on Anonymous Advanced Intelligent Mechatronics*. Piscataway, 2011, pp. 862–867.
15. Nourani-Vatani N., Roberts J., Srinivasan M. Practical Visual Odometry for Car-Like Vehicles. *IEEE International Conference on Anonymous Robotics and Automation*. Piscataway, 2009, pp. 3551–3557.
16. McManus C., Furgale P., Barfoot T. Towards Lighting-Invariant Visual Navigation: an Appearance-Based Approach Using Scanning Laser-Rangefinders. *Robot Auton Syst*, 2013, No. 61(8), pp. 836–852.
17. Aqel M., Marhaban M., Iqbal M. Adaptive-Search Template Matching Technique Based on Vehicle Acceleration for Monocular Visual Odometry System. *IEEJ Trans Electr Electr Eng*, 2016, No. 11(6), pp. 739–752.
18. Yoo J., Hwang S., Kim S. Scale-Invariant Template Matching Using Histogram of Dominant Gradients. *Pattern Recognit.*, 2014, No. 47(9), pp. 3006–3018.
19. Gonzalez R., Rodriguez F., Guzman J. Combined Visual Odometry and Visual Compass for Off-Road Mobile Robots Localization. *Robotica*, 2012, No. 30(6), pp. 865–878.
20. Nourani-Vatani N., Borges P. Correlation-Based Visual Odometry for Ground Vehicles. *J Field Robot*, 2011, No. 28(5), pp. 742–768.



Муравьева Е. А.
Muraveva E. A.

доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Автоматизированные технологические и информационные системы», ФГБОУ ВО «УГНТУ», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация



Григорьева Т. В.
Grigoreva T. V.

кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры «Информатика, математика и физика», ФГБОУ ВО «УГНТУ», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация



Валитов Д. Р.
Valitov D. R.

студент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», ФГБОУ ВО «УГНТУ», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

УДК 004.896

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-4-79-86

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ МИКРОКЛИМАТА ПРИ ХРАНЕНИИ МУКИ

В современном социально-экономическом и геополитическом развитии России на первый план выходит развитие сельского хозяйства и пищевой промышленности. Как следствие, многократно возрастают требования к качеству и безопасности готового продукта, что существенно влияет на его конкурентоспособность. Среди множества отраслей пищевой промышленности важнейшая роль принадлежит мукомольной. Её продукция является чрезвычайно востребованной населением нашей страны. А это значит, что к качеству этой готовой продукции предъявляются особые повышенные требования. Хранение муки является одним из важнейших этапов технологического процесса производства муки. Бестарное хранение муки в силосах представляет собой сложный технологический процесс, который в значительной степени подвержен воздействию окружающей среды (температура, давление, влажность и др.). Если не принимать соответствующих мер, то под влиянием указанных факторов технологические свойства муки будут изменяться и выходить за пределы допустимых значений.

На сегодняшний день нейронные сети могут решать широкий круг задач обработки и анализа данных — распознавание и классификация образов, прогнозирование и управление. Важной особенностью нейронных сетей является способность к обучению и обобщению накопленных знаний. Обученная на ограниченном множестве данных сеть в дальнейшем способна обобщать полученную информацию и обрабатывать данные, не использовавшиеся при ее обучении.

В данной статье представлена разработка интеллектуального комплекса для адаптивного управления параметрами микроклимата технологического оборудования для хранения муки и повышения эффективности управления технологическими процессами хранения муки путем использования интеллектуальных технологий. Показана модель параметров микроклимата в силосе с учетом множественных взаимосвязей между параметрами технологического процесса. Обоснована целесообразность использования для управления параметрами микроклимата интеллектуальных технологий путем применения нейросетевого

регулятора. Была разработана математическая модель объекта управления с учетом присущих ему внутренних связей между параметрами технологического режима и внешними возмущающими факторами. Обработка результатов исследований производилась с применением программного обеспечения «MatLab».

Ключевые слова: хранение, мука, микроклимат, разработка, нейронная сеть, параметры, построение, обучение, температура, влажность.

DEVELOPMENT OF INTELLECTUAL COMPLEX FOR ADAPTIVE MANAGEMENT OF MICROCLIMATE PARAMETERS OF FLOUR STORAGE PROCESSES

In the modern socio-economic and geopolitical development of Russia, the development of agriculture and food industry comes to the fore. As a result, the requirements to the quality and safety of the finished product increase many times, which significantly affects its competitiveness. Among the many branches of the food industry, the most important role belongs to the milling. Its products are extremely popular among the population of our country. This means that the quality of the finished product has special requirements. Storage of flour is one of the most important stages of the technological process of flour production. Bulk storage of flour in silos is a complex technological process, which is largely affected by the environment (temperature, pressure, humidity, etc.). If you do not take appropriate measures, then under the influence of these factors, the technological properties of flour will change and go beyond the permissible values.

Today, neural networks can solve a wide range of data processing and analysis tasks — pattern recognition and classification, prediction and management. An important feature of neural networks is the ability to learn and generalize the accumulated knowledge. Trained on a limited set of data, the network is then able to generalize the information received and process data not used in its training.

This article presents the development of an intelligent complex for adaptive control of microclimate parameters of flour storage processes and improving the efficiency of management of technological processes of flour storage through the use of intelligent technologies. The model of microclimate parameters in the silo is shown, taking into account multiple relationships between the process parameters. The expediency of using intelligent control technologies based on the development of a neural network controller for automation of microclimate parameters control is substantiated. A mathematical model of the control object was developed taking into account the inherent internal relationships between the parameters of the technological regime and external perturbing factors. Processing of research results was carried out using the software «MatLab».

Key words: storage, flour, microclimate, development, neural network, parameters, construction, training, temperature, humidity.

Введение

Для хранения муки необходимо, чтобы внутри промышленного помещения соблюдались параметры микроклимата. Микроклимат в производственных помещениях определяется температурой воздуха, относительной влажностью, скоростью движения воздуха, барометрическим давлением и интенсивностью теплового излучения от нагретых поверхностей.

Для поддержания стабильности технологического процесса хранения целесообразно управлять именно параметрами микроклимата в силосе. На основании многочислен-

ных исследований была разработана нейронная сеть, которая применяется для регулирования основных параметров микроклимата: температура воздуха в технологическом помещении, влажность воздуха, концентрация углекислого газа в воздухе (рисунок 1).

Внутри технологического помещения температура должна поддерживаться в диапазоне от 5 °С до 15 °С, содержание углекислого газа приблизительно 500–700 ppm и влажность воздуха на уровне 60–70 %.

Процесс силосования представляет собой исключительно биологический способ консервирования кормовых растений.

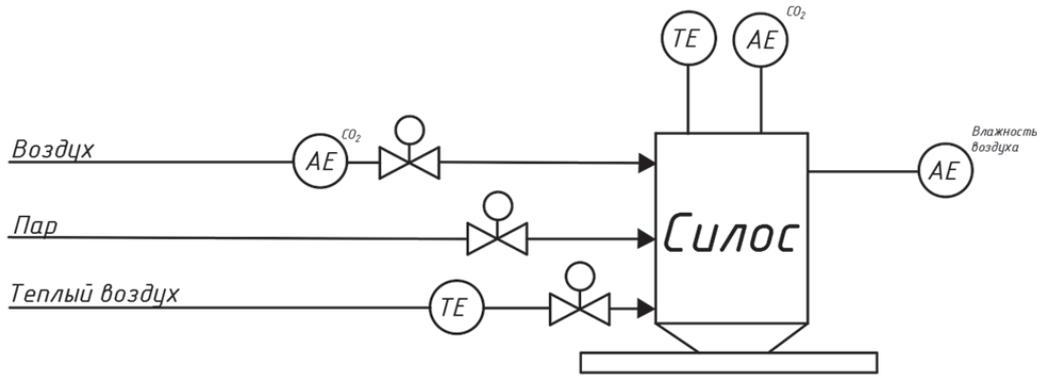


Рисунок 1. Функциональная схема автоматизации силоса

Технологический процесс хранения муки осуществляется с помощью оператора, который следит за параметрами микроклимата с помощью датчиков, и на основе этих данных осуществляет управление микроклиматом. Стандартные ПИД-регуляторы не могут решить данную задачу, так как не могут учесть нелинейность и взаимное влияние друг на друга параметров микроклимата.

На сегодняшний день наиболее перспективным представляется использование нейросетевых регуляторов для управления параметрами микроклимата. Создание такой системы позволит: улучшить адаптационные способности регулятора, повысить качество управления и, следовательно, качественные показатели технологического процесса [1].

Разработка нейронной сети

Необходимо разработать искусственную нейронную сеть (ИНС) для управления параметрами микроклимата в технологическом помещении для хранения муки.

Разработка ИНС производилась в среде Matlab R2015b. При решении задачи использовался пакет Matlab Neural Network Toolbox.

Процесс построения нейросетевой модели можно условно разделить на 5 основных этапов.

Первым этапом построения нейросетевой модели является тщательный отбор входных данных.

На втором этапе осуществляется преобразование исходных данных и выбираются способы представления информации.

Третий этап заключается в конструировании ИНС.

Четвертый этап связан с обучением сети, которое может проводиться на основе конструктивного или деструктивного подхода.

На пятом этапе проводится тестирование полученной модели ИНС на независимой выборке примеров [2–5].

Основные закономерности процесса и определение входных и выходных данных

Для решения задачи с помощью нейронной сети необходимо собрать данные для обучения. На выходной параметр степень открытия клапана F влияют входные параметры по приведенным ниже зависимостям. Выходные данные рассчитали по формулам

$$F_1 = 100 - \frac{T_1}{5} \cdot \frac{T_2}{5}, \quad (1)$$

где F_1 — степень открытия клапана на подачу тепла;

T_1, T_2 — температура внутри помещения 1 и снаружи 2.

$$F_2 = 100 - \frac{M}{2}, \quad (2)$$

где F_2 — степень открытия клапана на подачу пара;

M — влажность воздуха внутри помещения.

$$F_3 = 100 - \frac{CO_2(1)}{250} \cdot \frac{CO_2(2)}{250}, \quad (3)$$

где F_3 — степень открытия клапана на подачу свежего пара;

$CO_2(1)$, $CO_2(2)$ — содержание углекислого газа внутри технологического помещения 1 и снаружи 2.

Далее подготовим данные для обучения нейронной сети.

На вход нейронной сети будут подаваться 5 значений:

1. Температура воздуха внутри помещения;
2. Температура воздуха снаружи;
3. Влажность воздуха внутри помещения;
4. Содержание углекислого газа внутри помещения;

5. Содержание углекислого газа снаружи.

6. На выходе нейронная сеть должна рассчитать:

7. F_1 — процент открытия клапана на подачу тепла;
8. F_2 — процент открытия клапана на подачу пара;
9. F_3 — процент открытия клапана на подачу свежего воздуха.

Обработка и подготовка данных

Используя вышеперечисленные формулы (1)–(3), создадим таблицу 1 с обучающим набором данных. Она состоит из 1000 примеров.

Таблица 1. Обучающий набор данных

№	Вход					Выход		
	T1, °C	T2, °C	M, %	CO ₂ 1, ppm	CO ₂ 2, ppm	1 клапан, %	2 клапан, %	3 клапан, %
1	42	41	46	773	846	32	77	83
2	45	32	45	782	977	43	77	80
3	50	26	46	822	916	48	77	80
4	29	34	48	755	952	60	76	81
5	33	25	41	763	907	66	80	82
6	30	45	41	736	952	46	80	81
7	31	29	50	805	972	64	75	79
8	38	33	48	755	945	50	76	81
9	34	28	45	744	924	61	77	82
...
990	31	27	41	804	967	67	79	79
991	30	43	42	730	977	48	79	81
992	43	36	46	798	984	37	77	79
993	29	46	42	835	912	46	79	80
994	38	42	41	733	955	37	79	81
995	44	46	46	728	982	20	77	81
996	43	45	45	744	909	23	78	82
997	47	29	46	780	985	45	77	80
998	36	42	46	742	968	39	77	81
999	45	48	46	709	916	52	80	79
1000	32	26	40	747	907	68	80	82

Выбор типа и архитектуры нейросети

Наша сеть будет состоять из 2-х слоев — скрытый слой и выходной.

Первый шаг — это выбор структуры нейронной сети. Будет использована двухслойная однонаправленная сеть с сигмоидальной функцией:

(net = fitnet(hiddenLayerSize, trainFcn)).

Далее необходимо выбрать количество нейронов в скрытом слое. В данном случае экспериментально установлено необходимое число нейронов в скрытом слое, равное 48.

Обучение сети будет производиться по модифицированному алгоритму обратного распространения ошибки: trainFcn = 'trainbr'.

Затем выбираем параметры обучения сети, такие как максимальное количество эпох, количество эпох между показами и параметр достижения цели. Данные параметры нужно выбирать экспериментально, руководствуясь при этом критерием завершения обучения [6–8].

Задаем максимальное количество эпох (epochs) обучения, которое определяет число

эпох (интервал времени), по прошествии которых обучение будет прекращено:

```
net.trainParam.epochs = 1000.
```

Выберем количество эпох между показами равным пяти:

```
net.trainParam.show = 5.
```

Задаем параметр достижения цели или попадания — значение отклонения, при котором обучение будет считаться законченным:

```
net.trainParam.goal = 0.0001.
```

Далее разделим данные на набор для обучения (Training), проверочный набор (Validation) и тестовое множество (Testing):

```
net.divideParam.trainRatio = 60/100;
```

```
net.divideParam.valRatio = 35/100;
```

```
net.divideParam.testRatio = 5/100.
```

Построение и обучение нейронной сети в Matlab

Далее реализуем и обучим нейронную сеть в Matlab. Для этого используем команду `uiopen`.

С помощью команды `nnstart` будет реализован вход во вкладку «Обучение нейронной сети» [9].

На рисунке 2 показана выбранная структура искусственной нейронной сети. На вход нейронной сети поступает сигнал x , в нашем случае это температура воздуха внутри помещения, температура воздуха снаружи, влажность воздуха внутри помещения, содержание углекислого газа внутри помещения, содержание углекислого газа снаружи. Сумматор «+» умножает каждый вход b_i на вес w_i и суммирует взвешенные входы. Затем значение проходит через функцию активации соответствующего слоя и рассчитывается выход: открытие клапана на подачу пара, открытие клапана на подачу тепла, открытие клапана на подачу свежего воздуха.

В окне процесса обучения сети, нажав на кнопку Performance, можно увидеть график обучения сети, показывающий поведение ошибки обучения (рисунок 3).

Из графиков рисунка 3 видно, что обучающее множество уменьшается и доходит до минимальной ошибки, а тестовое множество продолжает расти, за 1000 эпох итоговая среднеквадратичная погрешность достигла

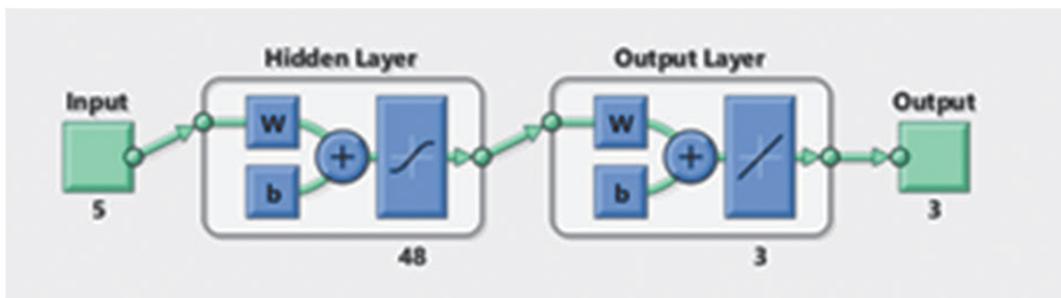


Рисунок 2. Структура нейронной сети

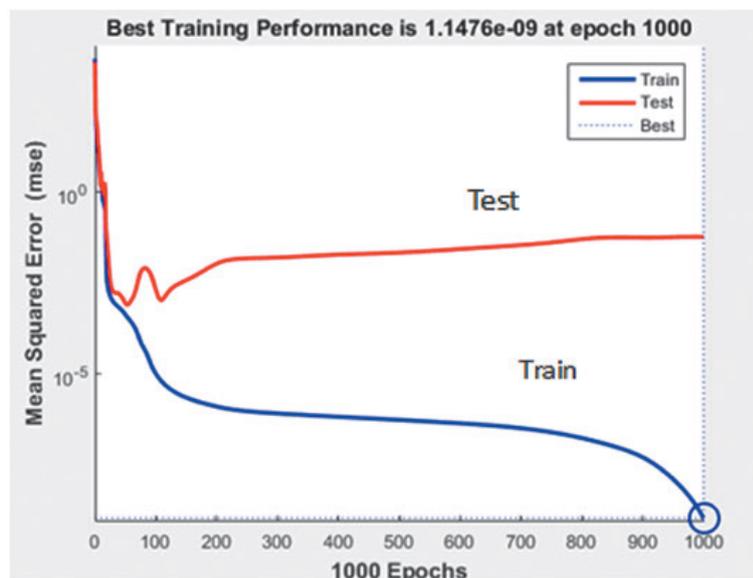


Рисунок 3. Средняя квадратичная ошибка

значения $1,1476 \cdot 10^{-9}$ и является небольшой, это указывает на идеальное обучение нашей сети управления параметрами микроклимата.

Еще одним инструментом оценки результата обучения нейронной сети может быть построение функций регрессии результатов (рисунок 4).

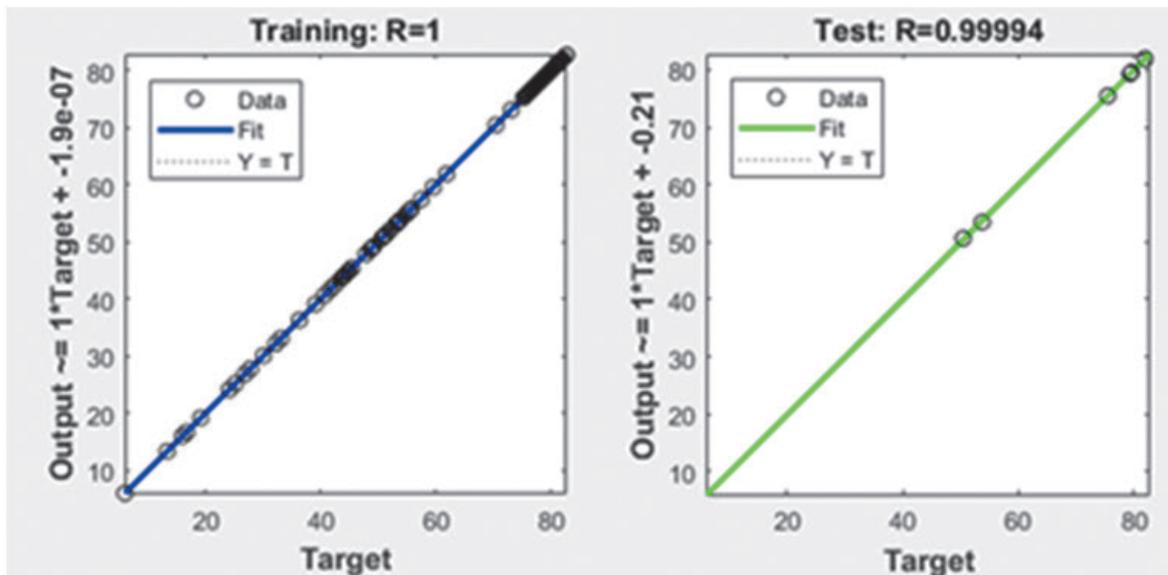


Рисунок 4. Графики линейной регрессии результатов обучения

Коэффициент корреляции R равен 0,9162 и 1, что говорит о сильной связи между переменными, а это свидетельствует о высокой точности построенной нейронной сети.

Перейдем к графикам состояния обучения, изображенным на рисунке 5. На первом графике видно, что чем ближе значение коэффициента градиента расположено к нулю, тем точнее будет проводиться обучение и тестирование нейронной сети. На графике «val fail» показано изменение ошибки на контрольном множестве. Величина этой ошибки указывает на точность настройки модели на обучающем множестве. График «mu» показывает изменение параметра обучения μ

методом байесовской регуляризации, и чем выше данное значение μ , тем точнее будет проходить обучение сети.

Проверка нейронной сети

Для тестирования нейронной сети подадим на вход 5 значений с помощью команды `sim(net, [T1; T2; M; CO21; CO22])` (таблица 2).

После выполнения команды, получено 3 значения (52,0152; 80,1235; 79,2584). Близость полученных значений к заданному результату (52; 80; 79) свидетельствует о применимости сети. В дальнейшем ее можно использовать для управления параметрами микроклимата.

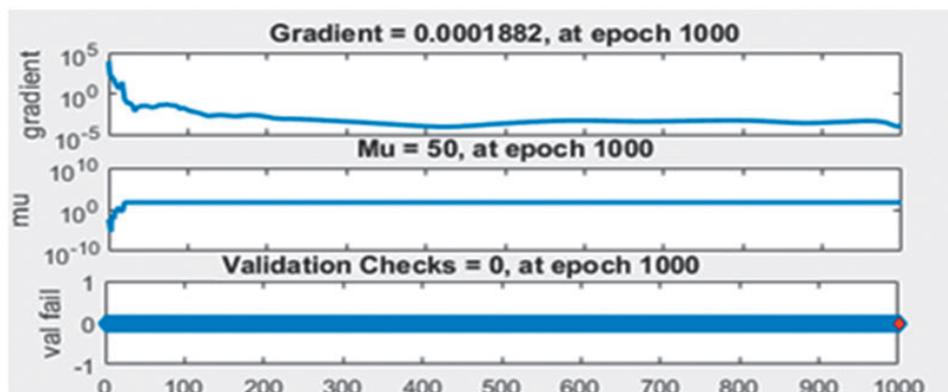


Рисунок 5. Графики обучения сети

Таблица 2. Проверочные данные

Вход					Выход		
T ₁ , °C	T ₂ , °C	M, %	CO ₂ ₁ , ppm	CO ₂ ₂ , ppm	1 клапан, %	2 клапан, %	3 клапан, %
45	28	46	709	916	52	80	79

Вывод

В ходе исследования получены следующие основные результаты: обоснована целесообразность разработки интеллектуального комплекса для управления параметрами микроклимата процесса бестарного хранения муки, реализуемого на базе нейронной сети. Представлена модель для управления параметрами микроклимата в силосе с учетом множественных взаимосвязей между параметрами технологического процесса и управляющими сигналами.

Список литературы

1. Благовещенская М.М., Шкапов П.М., Шаверин А.В. Разработка интеллектуального комплекса для адаптивного управления параметрами микроклимата процессов хранения муки / Московский государственный университет пищевых производств. 2018. 24 с.
2. Муравьева Е.А. Системы искусственного интеллекта: учеб. пособие. Ч. 2. 2017. 168 с.
3. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: учеб. пособие. 2018. 1104 с.
4. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети в MATLAB / Диалог-МИФИ. 2012. 496 с.
5. Соловьев К.А., Муравьева Е.А., Султанов Р.Г. Адаптация нечеткого регулятора // Нефтегазовое дело. 2014. Т. 12, № 3. С. 123–128.
6. Прядко П.В., Муравьева Е.А. Система управления сушильной печью для цеолитсодержащих катализаторов на основе 5-мерного нечеткого регулятора с интервальной неопределенностью // 63-я науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. 2012. С. 358.
7. Габитов Р.Ф., Каяшев А.И., Муравьева Е.А. Управление печью прокалики цеолитсодержащих катализаторов крекинга нефтепродуктов методом плавающего горизонта с использованием нейросетевой модели // Автоматизация, телемеханизация и

Показана целесообразность использования систем автоматического управления параметрами микроклимата с учетом взаимного влияния параметров объекта управления.

Разработаны технические решения по внедрению в автоматизированную систему управления технологическим процессом бестарного хранения муки интеллектуального комплекса адаптивного управления параметрами микроклимата на базе нейронной сети.

связь в нефтяной промышленности. 2010. № 12. С. 12–19.

8. Соловьев К.А., Муравьева Е.А. Эталонная модель для системы управления технологическим процессом на базе нечеткого регулятора второго порядка // Современные проблемы науки и образования в техническом вузе: матер. II Междунар. науч.-практ. конф. 2015. С. 61–66.

9. Соловьев К.А., Муравьева Е.А. Синтез эталонной модели для системы управления технологическим процессом на базе нечеткого регулятора второго порядка // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 10. С. 42–46.

References

1. Blagoveshchenskaya M.M., Shkapov P.M., Shaverin A.V. *Razrabotka intellektual'nogo kompleksa dlya adaptivnogo upravleniya parametrami mikroklimate protsessov khraneniya muki*. Moskovskii gosudarstvennyi universitet pishchevykh proizvodstv [Development of Intellectual Complex for Adaptive Control of Microclimate Parameters of Flour Storage Processes. Moscow State University of Food Production]. 2018. 24 p. [in Russian].
2. Murav'eva E.A. *Sistemy iskusstvennogo intellekta: ucheb. posobie* [Artificial Intelligence Systems: Tutorial]. Ch. 2. 2017. 168 p. [in Russian].

3. Khaikin S. *Neironnye seti: polnyi kurs: ucheb. posobie* [Neural Networks: a Complete Course. Textbook]. 2018. 1104 p. [in Russian].
4. Medvedev V.S., Potemkin V.G. *Neironnye seti v MATLAB* [Neural Networks in MATLAB]. Dialog-MIFI. 2012. 496 p. [in Russian].
5. Solov'ev K.A., Murav'eva E.A., Sultanov R.G. Adaptatsiya nechetkogo regul'yatora [Adaptation of Fuzzy Controller]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2014, Vol. 12, No. 3, pp. 123–128. [in Russian].
6. Pryadko P.V., Murav'eva E.A. Sistema upravleniya sushil'noi pech'yu dlya tseolitsoderzhashchikh katalizatorov na osnove 5-mer-nogo nechetkogo regul'yatora s interval'noi neopredelennost'yu [Control System of Drying Furnace for Zeolite-Containing Catalysts Based on 5-Dimensional Fuzzy Regulator with Interval Uncertainty]. *63-ya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchennykh UGNTU* [63rd Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists of USPTU]. 2012, pp. 358. [in Russian].
7. Solov'ev K.A., Murav'eva E.A. Etalonnaya model' dlya sistemy upravleniya tekhnologicheskim protsessom na baze nechetkogo regul'yatora vtorogo poryadka [Reference Model for the Control System of Technological Process on the Basis of Fuzzy Second-Order Regulator]. *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya v tekhnicheskoy vuzze»*. [Materials of the International Scientific and Practical Conference «Modern Problems of Science and Education in a Technical University»]. 2015, p. 61–66. [in Russian].
8. Solov'ev K.A., Murav'eva E.A. Sintez etalonnnoi modeli dlya sistemy upravleniya tekhnologicheskim protsessom na baze nechetkogo regul'yatora vtorogo poryadka [Synthesis of Reference Model for the Process Control System Based on the Second Order Fuzzy Controller]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie — Aerospace Instrument-Making Journal*, 2015, No. 10, pp. 42–46. [in Russian].
9. Gabitov R.F., Kayashev A.I., Murav'eva E.A. Upravlenie pech'yu prokalki tseolitsoderzhashchikh katalizatorov krekinga nefteproduktov metodom plavayushchego gorizonta s ispol'zovaniem neirosetevoi modeli [Oven Control Calcination of Zeolite Cracking Catalysts of Petroleum Products Method Floating Horizon Using Neural Network Models]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoi promyshlennosti — Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry*, 2010, No. 12, pp. 12–19. [in Russian].



Бордюг А. С.
Bordyug A. S.

кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

УДК 621.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-4-87-92

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВОЙ АВТОМАТИКИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОЖАРОВ В МАШИННОМ ОТДЕЛЕНИИ

В условиях пожара участник аварийной пожарной партии на судне может подвергаться воздействию широкого диапазона температур и теплового потока. Тепловая энергия, генерируемая в результате пожара в судовом помещении или трюме, зависит от многих факторов: типа горючего вещества, количества горючего вещества, его геометрии и расположения, наличия кислорода, размера и расположения вентиляционных отверстий для выпуска продуктов горения и воздуха, размера и формы отсека, а возможно и ветра. В качестве отправной точки исследуется исходная информация о пожаре в помещении машинного отделения.

Ключевые слова: пожар, термометр сопротивления, тепловой поток, измерение, температура.

APPLICATION OF ELEMENTS OF MARINE AUTOMATION IN SIMULATION OF FIRE IN THE ENGINE ROOM

In a fire condition, a member of an emergency fire brigade on a ship may be influenced by a wide range of temperatures and heat flux. The thermal energy generated by a fire in a ship's space or hold depends on many factors: the type of combustible substance, the amount of combustible substance, its geometry and location, the presence of oxygen, the size and location of the vents for the release of combustion products and air, the size and shape of the compartment and possible wind. As a starting point, the background information about the fire in the engine room is examined.

Key words: fire, resistance thermometer, heat flux, measurement, temperature.

Основные определения

Существует несколько терминов, используемых для характеристики тепловой среды — тепло, температура, скорость тепловыделения, тепловой поток.

Тепло является формой энергии, характеризующейся молекулярной активностью в материале. Добавление тепла к материалу увеличивает движение молекул внутри материала и приводит к повышению температуры. Повышенный теплообмен может привести к изменению или разрыву связей молекул, что приводит к химическим изменениям и изменению состояния материала. Теплота измеряется в джоулях (Дж).

Температура – это мера теплоты (молекулярная активность) внутри материала. Чаще всего используются две температурные шкалы — по Фаренгейту (°F) и по Цельсию (°C). На практике применяется список температур, которые могут быть связаны с условиями роста пожара, и описывают специфическую реакцию человека на эти тепловые условия (таблица 1 [1]). Одной из ключевых температур является температура 55 °C, когда кожа человека получит ожог второй степени.

Скорость тепловыделения является мерой мощности огня – скорость, с которой энергия вырабатывается горящим топливом.

Единицей измерения, обычно используемой при расчете, является ватт (W). Ватт эквивалентен джоулю в секунду.

Тепловой поток — это скорость передачи тепла на единицу площади поверхности. Тепловой поток может быть измерен в киловаттах на квадратный метр (кВт/м²). В случае с пожарным, работающим в жаркой среде, тепловой поток будет количеством энергии, попадающей на поверхность средств индивидуальной защиты или другого оборудования. [1]. Ключевые показатели теплового потока (таблица 2) включают стандартное значение 1 кВт/м² для солнца в ясный день и значение 10 кВт/м², которое вызывает ожог кожи второй степени примерно за 10 с.

В Руководстве по противопожарной защите есть глава, посвященная динамике роста пожара. Это обеспечивает качественное описание пожара, развивающегося от установленного пламени до перехода к вспышке [2]. В статье приведены ссылки на источники для нескольких алгебраических математических соотношений для количественной оценки различных аспектов пожара в камере, таких как температура шлейфа [3] и минимальная скорость тепловыделения, необходимая для вспышки с применением вентиляции [4]. Большинство этих соотношений не учитывают время. Условия предполагаются квазистационарными или стационар-

ными. Условия срабатывания для вспышки даны как температура верхнего слоя 600 °C и поток теплового излучения приблизительно 20 кВт/м² на невоспламеняемых видах горючего вещества в судовом помещении на уровне палубы или выше [5–7]. Изменение условий от предварительной вспышки к последующей вспышке может произойти в течение нескольких секунд [8, 9].

Эксперимент в закрытом помещении (имитация пожара в машинном отделении)

Все тепловые и дымовые условия были вызваны пожаром при минимально доступной вентиляции в закрытом помещении (имитация пожара в машинном отделении). План помещения и расположение приборов показаны на рисунке 1. Огонь был зажжен в помещении (1) в задней части сооружения, при этом дверь в помещение (2) была открыта, что позволяло газовой смеси проходить через коридор, который имел вентиляционное отверстие. Поскольку огонь развивался, вентиляция в помещении ограничилась. Пожар в спальне достиг развитого состояния. Затем вентиляционный канал помещения (1) был открыт, и тепловая опасность увеличилась на всем пути теплового потока от помещения (1) до вытяжной вентиляции в коридоре.

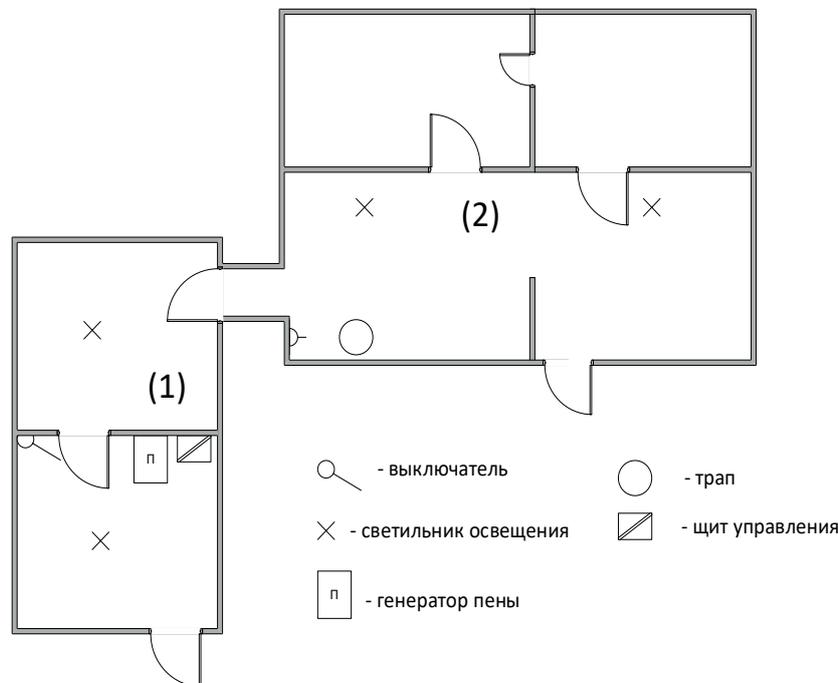
После того как вентиляция была открыта, дополнительный кислород подавался на

Таблица 1. Температуры, обычно испытываемые во время операций пожаротушения, и информация о реакции человека на эти температуры

Температура °C (°F)	Ощущение членом аварийной партии
37,0 °C (98,6 °F)	Средняя нормальная человеческая оральная температура тела
38 °C (101 °F)	Типичная температура тела работающего пожарного
43 °C (109 °F)	Температура тела человека, которая может привести к смерти
44 °C (111 °F)	Температура кожи человека, при которой происходит ощущение боли
48 °C (118 °F)	Температура, вызывающая ожоги первой степени
54 °C (130 °F)	Температура воды, вызывающая ожоги с 30-секундной выдержкой
55 °C (131 °F)	Температура кожи человека с пузырями и ожогами второй степени
62 °C (140 °F)	Температура сгорания человеческой ткани
72 °C (162 °F)	Температура, при которой ткани мгновенно разрушаются
100 °C (212 °F)	Температура, когда вода кипит и производит пар
250 °C (482 °F)	Температура начала обугливания натурального хлопка
> 300 °C (> 572 °F)	Температура, при которой современные синтетические защитные ткани одежды начинают обугливаться
> 400 °C (> 752 °F)	Температура газов в начале пожара
1000 °C (1832 °F)	Температура в помещении, охваченном огнем

Таблица 2. Список уровней теплового потока, обычно возникающих во время противопожарных операций, и информация о реакции человека на уровни теплового потока

Уровень теплового потока, кВт/м ²	Эквивалентность (воздействие)
1	Типичный ясный дневной солнечный поток на поверхности земли с прямой солнечной радиацией; солнечный ожог может произойти примерно через 20–30 мин.
2.5	Типичное воздействие на пожарного и его рабочая среда.
4.5	Незащищенная кожа человека получит ожог второй степени примерно через 30 с.
6.4	Незащищенная кожа человека испытывает боль при воздействии в течение 8 с и появление волдырей через 18 с при ожогах второй степени.
10	Незащищенная кожа человека получит ожог второй степени примерно через 10 с.
13	Древесина воспламеняется при воздействии пламени.
16	Незащищенная кожа человека испытывает внезапную боль и образование пузырей после 5-секундного воздействия и появление ожога второй степени.
20	Незащищенная кожа человека получит ожог второй степени менее чем за 4 с.
80	Незащищенная кожа человека сразу же получит ожог второй степени.
84	Значение, применяемое для оценки теплозащитной одежды пожарных.
170	Максимальный уровень теплового потока, измеренный при пожаре после вспышки внутри горячей комнаты.

**Рисунок 1.** План помещения для имитации пожара в машинном отделении

пламя, и скорость тепловыделения увеличилась с приблизительно 1,5 до 14 МВт менее чем за 60 с. Скорость тепловыделения оставалась постоянной между 12 и 13 МВт в течение почти 180 с, пока не началось его подавление. Наряду с увеличением скорости тепловыделения, тепловой поток и скорость выделения газа увеличивались по всей вытяжной части пути потока от помещения (1) до вытяжной вентиляции в коридоре.

Рисунки 2 и 3 показывают измерения от платиновых термометров Pt100 сопротивлений, расположенных в центре помещения (1), в помещении (2) в двух точках, и в коридоре. Другими словами, термометры сопротивлений расположены вдоль вытяжной части пути теплового потока из помещения (1) через вентиляционное отверстие в коридоре. Каждый термометр сопротивлений располагался на 0,03 м ниже потолка, а затем

термометры сопротивлений устанавливались с интервалами приблизительно 0,3 м, пока

они не оказались на 2,13 м ниже потолка или на 0,3 м над полом.

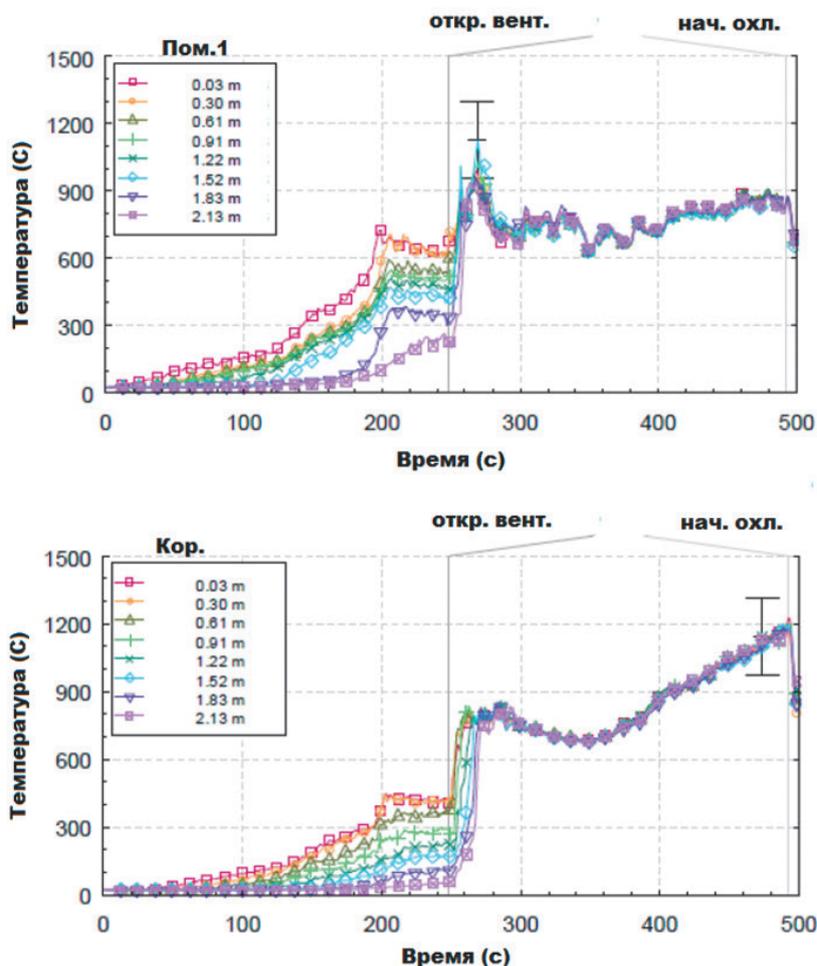


Рисунок 2. Графики температуры эксперимента в закрытом помещении (1) и коридоре

В течение первых 200 с данные показывают градиент температуры в помещении (1) в диапазоне от 700 °С около потолка до 100 °С на 0,3 м над полом. Когда начало открываться вентиляционное отверстие, температура около потолка охлаждалась почти на 100 °С, в то время как температура остальной части теплового слоя увеличивалась. Через 250 с после полного открытия вентиляции комната перешла из термически стратифицированной среды в постпроходную среду, в которой температуры на всех уровнях были одинаковыми и превышали 600 °С. Это состояние продолжалось до тех пор, пока огонь не был подавлен. Измерения от термометров сопротив-

лений в помещении (1) следовали тенденции, аналогичной данным в помещении (2), пока дверной проем коридора не начал гореть. Горение двери и изменение вентиляции и, следовательно, теплового потока из-за образовавшегося отверстия между помещением (1) и помещением (2) соответствовали постоянному повышению температуры, начиная с 360 с. Когда дверь в закрытое помещение (2) сгорела, кислород вытек из «закрытого» помещения (2) и, продвигаясь в помещение (2), образовал вспышку, при которой температуры от потолка до пола становятся почти равными при значениях примерно 600 °С вплоть до подавления огня.

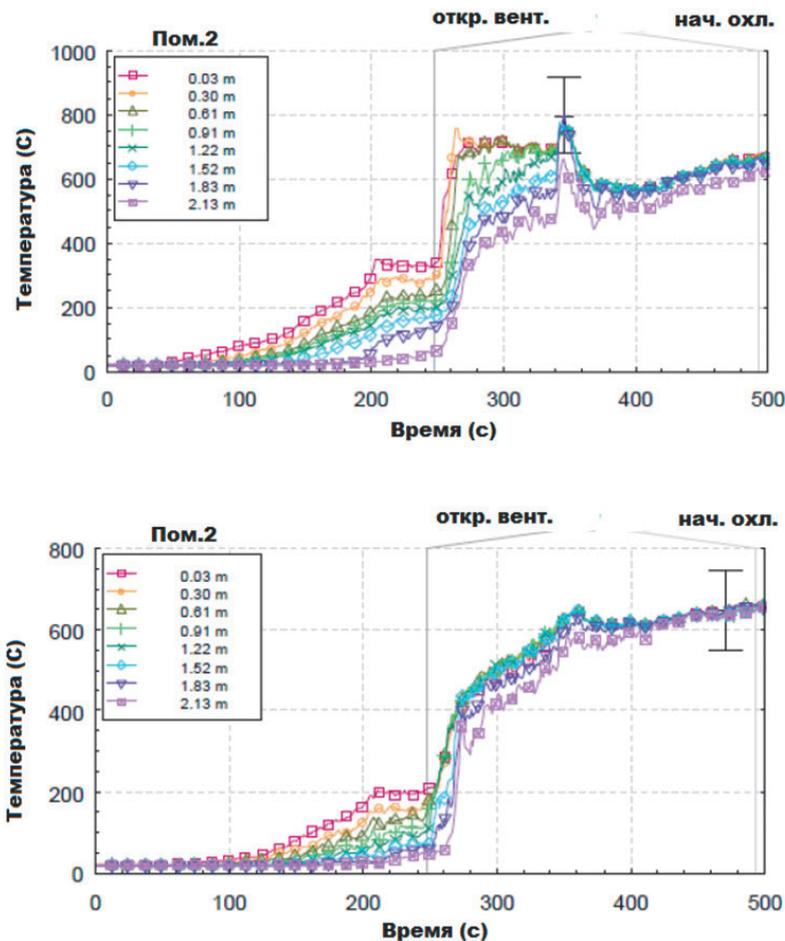


Рисунок 3. Графики температуры эксперимента в закрытом помещении (2) в двух точках

До момента включения вентиляции пиковые температуры в помещении (1) варьировались от приблизительно 200 °С около потолка до менее чем 100 °С на высоте 0,9 м над полом и ниже. Через 30 с после открытия вентиляции температура повысилась до более чем 400 °С от потолка до уровня пола. Поскольку огонь продолжал гореть, равномерная температура в помещении (1) превысила 600 °С, что соответствует условиям пожара после вспышки.

Список литературы

1. Кодекс международных стандартов и рекомендуемой практики расследования аварии или инцидента на море (Кодекс расследования аварий). Резолюция ИМО MSC.255(84). СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2008. 64 с.
2. Международный кодекс по системам пожарной безопасности. Поправки

Выводы

Данный эксперимент продемонстрировал зависимость быстрого изменения условий пожара вдали от противопожарного отсека с применением вентиляционных каналов. Пожарные на судне должны знать о тепловом потоке и понимать, что повышенная скорость и турбулентность токсичных газов сокращают безопасное время работы.

(Бюллетень №30 к МК СОЛАС-74). СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2011. 60 с.

3. Общие правила плавания и стоянки судов в морских портах РФ и на подходах к ним (вступили в силу 18 мая 2010 г.) (рус/англ.). СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2010. 108 с.

4. Международный кодекс по системам пожарной безопасности. Резолюция КБМ ИМО 98(73). Обязательный по МК СОЛАС-74. СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2004. 128 с.

5. Международный кодекс применения процедур испытания на огнестойкость (Резолюция КБМ ИМО 61(67)). СПб.: ООО «МОРСАР», 2004. 128 с.

6. Приложение VI к МАРПОЛ 73/78. Правила предотвращения загрязнения атмосферы с судов. СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2004. 80 с.

7. Руководство ИМО по разработке судовых планов чрезвычайных мер по борьбе с загрязнением моря нефтью и (или) вредными жидкими веществами Резолюция ИМО МЕРС.85(44). СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2001. 76 с.

8. Руководство по расследованию человеческих факторов в авариях и инцидентах на море. Резолюция ИМО А.884(21). СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2000. 128 с.

9. Бордюг А.С., Железняк А.А., Чёрный С.Г. Проверка надежности электронной системы управления дизель-генераторного агрегата морских судов // Транспорт России: проблемы и перспективы: Материалы международной-научно-практической конференции. 2019. С. 344–347.

References

1. *Kodeks mezhdunarodnykh standartov i rekomenduemoi praktiki rassledovaniya avarii ili intsidenta na more (Kodeks rassledovaniya avarii). Rezolyutsiya IMO MSC.255(84)* [Code of International Standards and Recommended Practice for the Investigation of an Accident or Incident at Sea (Code of Accident Investigation). IMO Resolution MSC.255 (84)]. Saint-Petersburg, ZAO «TsNIIMF», 2008. 64 p. [in Russian].

2. *Mezhdunarodnyi kodeks po sistemam pozharnoi bezopasnosti. Popravki (Byulleten' №30 k MK SOLAS-74)* [International Code for Fire Safety Systems. Amendments (Bulletin No. 30 to MK SOLAS-74)]. Saint-Petersburg, ZAO «TsNIIMF», 2011. 60 p. [in Russian].

3. *Obshchie pravila plavaniya i stoyanki sudov v morskikh portakh RF i na podkhodakh k nim (vstupili v silu 18 maya 2010 g.) (rus/ angl.)* [General Rules for Navigation and Anchorage of Ships in the Seaports of the Russian Federation and on the Approaches to Them (Entered into Force on May 18, 2010) (Russian/English)]. Saint-Petersburg, ZAO «TsNIIMF», 2010. 108 p. [in Russian].

4. *Mezhdunarodnyi kodeks po sistemam pozharnoi bezopasnosti. Rezolyutsiya KBM IMO 98(73). Obyazatel'nyi po MK SOLAS-74* [International Code for Fire Safety Systems. IMO MSC Resolution 98 (73). Mandatory According to MK SOLAS-74]. Saint-Petersburg, ZAO «TsNIIMF», 2004. 128 p. [in Russian].

5. *Mezhdunarodnyi kodeks primeneniya protsedur ispytaniya na ognestoikost' (Rezolyutsiya KBM IMO 61(67))* [International Code of Application of Fire Test Procedures (IMO MSC Resolution 61 (67))]. Saint-Petersburg, ООО «MORSAR», 2004. 128 p. [in Russian].

6. *Prilozhenie VI k MARPOL 73/78. Pravila predotvrashcheniya zagryazneniya atmosfery s sudov* [Annex VI to MARPOL 73/78. Rules for the Prevention of Air Pollution from Ships]. Saint-Petersburg, ZAO TsNIIMF, 2004. 80 p. [in Russian].

7. *Rukovodstvo IMO po razrabotke sudovykh planov chrezvychainykh mer po bor'be s zagryazneniem morya nef'tyu i (ili) vrednymi zhidkimi veshchestvami Rezolyutsiya IMO MERS.85(44)* [IMO guidelines for the development of shipboard emergency plans to combat marine pollution by oil and (or) noxious liquid substances IMO Resolution MEPC.85 (44)]. Saint-Petersburg, ZAO «TsNIIMF», 2001. 76 s. [in Russian].

8. *Rukovodstvo po rassledovaniyu chelovecheskikh faktorov v avariakh i intsidentakh na more. Rezolyutsiya IMO A.884(21)* [Guidelines for the Investigation of Human Factors in Accidents and Incidents at Sea. IMO Resolution A.884 (21)]. Saint-Petersburg, ZAO «TsNIIMF», 2000. 128 s. [in Russian].

9. Bordyug A.S., Zheleznyak A.A., Chernyi S.G. Proverka nadezhnosti elektronnoi sistemy upravleniya dizel'-generatornogo agregata morskikh sudov [Verification of the Reliability of the Electronic Control System of the Diesel-Generator Set of Sea Vessels]. *Materialy mezhdunarodnoi-nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport Rossii: problemy i perspektivy»* [Proceedings of the International Scientific-Practical Conference «Transport of Russia: Problems and Prospects»]. 2019, pp. 344–347. [in Russian].

ОБ АВТОРАХ

Абуталипов Урал Маратович

кандидат технических наук, начальник отдела новых технологий добычи нефти и газа, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

Бордюг Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

Валитов Денис Русланович

студент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Горшенин Александр Иванович

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Григорьева Тамара Владимировна

кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры «Информатика, математика и физика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Жиленков Антон Александрович

кандидат технических наук, заведующий кафедрой киберфизических систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Карпенков Андрей Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Робототехника и комплексная автоматизация», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева», г. Ковров, Российская Федерация

Кириллов Роман Вячеславович

инженер кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», начальник лаборатории неразрушающего контроля, ООО НИЦ «Энергодиагностика», г. Уфа, Российская Федерация

Китабов Андрей Николаевич

кандидат технических наук, главный специалист отдела новых технологий добычи нефти и газа, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

Комиссаров Денис Русланович

аспирант 2-го курса по направлению подготовки «Электро- и теплотехника», инженер кафедры «Электрооборудование судов и автоматизации производства», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

Куручкин Леонид Михайлович

кандидат технических наук, доцент высшей школы прикладной математики и вычислительной физики, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Куручкин Михаил Александрович

кандидат технических наук, доцент, доцент высшей школы прикладной математики и вычислительной физики, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Латыпов Булат Фиделевич

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Мартынов Олег Владимирович

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Робототехника и комплексная автоматизация», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева», г. Ковров, Российская Федерация

Муравьева Елена Александровна

доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Автоматизированные технологические и информационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Мухаметшин Андрей Валерьевич

инженер кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», начальник научно-исследовательской лаборатории, ООО НИЦ «Энергодиагностика», г. Уфа, Российская Федерация

Рогожников Алексей Олегович

курсант кафедры «Энергетические установки и электрооборудование судов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Камчатский государственный технический университет», г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

Роот Дмитрий Ильич

курсант кафедры «Энергетические установки и электрооборудование судов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Камчатский государственный технический университет», г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

Толстова Людмила Александровна

доцент кафедры «Энергетические установки и электрооборудование судов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Камчатский государственный технический университет», г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

Хазиева Регина Тагировна

кандидат технических наук, заместитель заведующего кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Хакимьянов Марат Ильгизович

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Чернышев Александр Сергеевич

научный сотрудник Сектора численного моделирования, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе» Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Чуватов Михаил Владимирович

ведущий программист, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Шарипов Артур Ильдарович

специалист отдела новых технологий добычи нефти и газа, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Abutalipov Ural M.

Cand. Sci. Tech., Head of New Technologies for Oil and Gas Production Department, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation

Bordyug Aleksandr S.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electrical Equipment for Ships and Production Automation Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kerch State Maritime Technological University», Kerch, Russian Federation

Chernyshev Aleksandr S.

Researcher of Numerical Modeling Sector, Federal State Budgetary Institution of Science «Ioffe Institute of Physics and Technology», St. Petersburg, Russian Federation

Chuvatov Mikhail V.

Leading Programmer, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University», St. Petersburg, Russian Federation

Gorshenin Aleksandr I.

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

Grigoreva Tamara V.

Cand. Sci. Ped., Associated Professor, Assistant Professor of Informatics, Mathematics and Physics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

Karpenkov Andrey S.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Robotics and Integrated Automation Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «The Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev», Kovrov, Russian Federation

Khazieva Regina T.

Cand. Sci. Tech., Deputy 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

Khakimyanov Marat I.

Dr. Sci. Tech., Associate 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

Kirillov Roman V.

Engineer of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Head of the Laboratory for Non-Destructive Testing, Research Center «Energodiagnostika» LLC, Ufa, Russian Federation

Kitabov Andrey N.

Cand. Sci. Tech., Chief Specialist of New Technologies for Oil and Gas Production Department, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation

Komissarov Denis R.

2nd Year Postgraduate Student in the Direction of Training «Electrical and Heat Engineering», Engineer of Electrical Equipment for Ships and Production Automation Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kerch State Maritime Technological University», Kerch, Russian Federation

Kurochkin Leonid M.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of the Higher School of Applied Mathematics and Computational Physics, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University», St. Petersburg, Russian Federation

Kurochkin Mikhail A.

Cand. Sci. Tech., Associate professor, Assistant Professor of the Higher School of Applied Mathematics and Computational Physics Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University», St. Petersburg, Russian Federation

Latypov Bulat F.

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

Martynov Oleg V.

Cand. of physical and Mathematical Sci., Associate Professor, Assistant Professor of Robotics and Integrated Automation Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «The Kovrov State Technological Academy Named after V.A. Degtyarev», Kovrov, Russian Federation

Muhametshin Andrey V.

Engineer of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Head of the Research Laboratory, Research Center «Energodiagnostika» LLC, Ufa, Russian Federation

Muraveva Elena A.

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Automated Technological and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

Rogozhnikov Aleksey O.

Cadet of the Department «Power Plants and Electrical Equipment of Ships», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kamchatka State Technical University», Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

Root Dmitry I.

Cadet of the Department «Power Plants and Electrical Equipment of Ships», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kamchatka State Technical University», Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

Sharipov Artur I.

Specialist of New Technologies for Oil and Gas Production Department, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation

Tolstova Lyudmila A.

Assistant Professor of the Department «Power Plants and Electrical Equipment of Ships», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kamchatka State Technical University», Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

Valitov Denis R.

Student of Automated Technological and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

Zhilentov Anton A.

Cand. Sci. Tech., Head of the Department of Cybernetic Systems, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University», St. Petersburg, Russian Federation

СПИСОК СТАТЕЙ, ИЗДАННЫХ В 2020 ГОДУ

- Агуреев А.В., Губарев Д.Е., Кочубей А.С., Зикий А.Н.* Два фильтра бегущей волны, № 3, с. 83–93.
- Андрианов А.В., Зикий А.Н., Кочубей А.С.* Широкополосный усилитель средней мощности дециметровых волн, № 1, с. 82–88.
- Бордюг А.С.* Применение циклического тестирования аппаратного обеспечения морских систем управления, № 3, с. 77–82.
- Бордюг А.С.* Применение элементов судовой автоматики при моделировании пожаров в машинном отделении, № 4, с. 87–92.
- Важдаев К.В., Ураксеев М.А., Мартяшева В.А.* Автоматизированная многофункциональная система контроля утечки газа с использованием беспроводной технологии, № 1, с. 97–105.
- Гаитов Р.З., Мухамадиев А.А.* Информационно-измерительная и управляющая система мониторинга пчелосемей, № 2, с. 112–119.
- Губарев Д.Е., Зикий А.Н., Кочубей А.С.* Входное устройство приёмника сантиметрового диапазона, № 2, с. 79–85.
- Гусев Р.А., Бухаров Д.С.* К вопросу о разработке программного обеспечения для мониторинга и анализа работы дистанционной защиты, № 1, с. 40–46.
- Дебиев М.В., Эльмурзаев А.А.* Развитие возобновляемых источников энергии в Чеченской Республике, № 1, с. 16–23.
- Дегтярев А.В., Козаченко Л.Н., Соболев А.С., Антипенко И.В.* Кинематическая модель процесса маневрирования судна в условиях информационно сложной ситуации, № 3, с. 100–105.
- Доломатов М.Ю., Коледин О.С., Ковалева Э.А., Ахтямова К.Р.* Прогноз цетановых чисел алканов по топологическим характеристикам молекул, № 2, с. 127–133.
- Доломатов М.Ю., Шуткова С.А., Бахтизин Р.З., Доломатова М.М.* Исследование молекулярной и электронной структуры нанокластеров молекулярных димеров нефтяных асфальтенов «континентального» типа, № 1, с. 118–124.
- Дорфман Б.С., Балахонцев В.Е., Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Гусаков Д.В., Бекузин В.И.* Виртуальный стенд для испытаний элементов системы электроснабжения летательных аппаратов, № 1, с. 5–15.
- Жиленков А.А., Черный С.Г.* Существование и достижимость консенсуса как проблема обеспечения надёжности в распределённых приложениях и киберфизических системах, № 2, с. 92–104.
- Зламан П.Н., Андрианов А.В., Зикий А.Н.* Экспериментальное исследование микросхемы LTC5553 в режиме умножения частоты с направленным ответвителем, № 1, с. 106–111.
- Иванова О.В., Короткова Л.Н., Фаттахов М.М., Халиков Р.М.* Надёжное управление качеством функционирования электротехнического оборудования в 3D аддитивных технологиях, № 3, с. 43–49.
- Иванова О.В., Халиков Р.М., Короткова Л.Н.* Рациональное управление качеством функционирования электротехнической аппаратуры технологической схемы производства сжиженного газа, № 1, с. 24–29.
- Карагодин В.В., Горин В.А., Хомич И.В.* Алгоритм численного нахождения оптимального по быстродействию управления нелинейными объектами, № 2, с. 66–72.
- Китабов А.Н., Абуталипов У.М., Шарипов А.И., Хакимьянов М.И.* Оценка погрешности определения потребления электроэнергии при эксплуатации штанговой скважинной насосной установки, № 4, с. 5–17.
- Комиссаров Д.Р.* Микроконтроллеры в системе контроля заряда и разряда аккумулятора в необитаемых подводных аппаратах, № 2, с. 45–53.
- Комиссаров Д.Р., Бордюг А.С.* Применение никель-цинковых батарей в аварийной электроэнергетической системе пассажирского судна, № 4, с. 28–36.
- Косимов Б.И.* Применение метода конечных элементов для электромагнитного анализа крупногабаритного электродвигателя привода пылеуловителя, № 2, с. 13–27.

Куручкин Л.М., Чернышев А.С., Куручкин М.А., Чуватов М.В., Жиленков А.А. Оценка согласованности дискретного и сплошнoсреднего подходов в рамках гибридной модели на примере транспортной сети региона, № 4, с. 56–67.

Ле Ван Тунг, Буй Чунг Кьен. Прямое управление током активного выпрямителя с повышением эффективности метода непосредственного управления моментом асинхронных двигателей, № 1, с. 54–61.

Ле Ван Тунг, До Чи Тхань. Исследование прямого управления мощностью преобразователя частоты со многими двигателями с использованием прямого управления моментом, № 2, с. 35–44.

Лихачев Е.А., Зайцева А.А., Клименко О.В., Керасирова А.А. Встроенная система контроля САУ–37, № 1, с. 112–117.

Лосев Ф.А., Сушков В.В. Оценка устойчивости объектов нефтяных месторождений при различных несимметричных провалах напряжения, № 2, с. 5–12.

Мартынов О.В., Карпенков А.С. Определение скорости подвижного объекта на основе динамического отслеживания участков дорожного покрытия по данным видеопотока, № 4, с. 68–78.

Марченко А.А., Труднев С.Ю. Исследование процесса нагружения асинхронного электродвигателя в режиме генераторного торможения, № 3, с. 6–13.

Муравьева Е.А., Григорьева Т.В., Валитов Д.Р. Разработка интеллектуального комплекса для адаптивного управления параметрами микроклимата при хранении муки, № 4, с. 128.

Муравьева Е.А., Квириг М.Д. Разработка адаптивного нечеткого управления в среде Matlab Simulink, № 3, с. 63–69.

Муравьева Е.А., Шарипов М.И., Кубряк А.И. Разработка метода управления процессом добычи на нефтегазовых месторождениях с использованием искусственного интеллекта, № 1, с. 62–68.

Муравьева Е.А., Юрасов А.О. Применение нейронных сетей, имитирующих ПИД-регулятор для управления деаэратором, № 2, с. 59–65.

Попов А.А., Овсянкин А.К. Разработка программного средства для расчета ректификационной установки, № 2, с. 73–78.

Решетняк С.Н. Анализ методов построения прогнозных моделей электропотребления в условиях высокопроизводительных угольных шахт, № 2, с. 28–34.

Родионов А.С., Валиев Р.Р., Воробьев А.В. Чат-бот для обучения персонала в нефтегазовом производстве, № 2, с. 86–91.

Роот Д.И., Рогожников А.О., Толстова Л.А. Совершенствование судового энергетического комплекса путем модернизации его элементов, № 4, с. 66.

Салихов Р.Б., Зиннатулина А.А., Павлов А.В. Система контроля содержания аммиака в воздухе на агропромышленных комплексах, № 2, с. 120–126.

Самаров Е.К. Двумерное дискретное преобразование Габора и его применение для подавления шума в цифровых изображениях, № 1, с. 69–72.

Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Д.Р. Исследование электромагнитного поля управляемого магнитоэлектрического демпфера, № 3, с. 28–35.

Соловьев А.В., Кретюк Д.А. К вопросу обоснования требуемой степени резервирования технических систем, обеспечивающих функционирование объекта, № 1, с. 30–39.

Солодилова Н.З., Ахметжанов Ф.М., Крымский В.Г., Будеева О.Н. Основы разработки аппаратного и программного обеспечения интеллектуальной одежды. Часть 1. Анализ особенностей аппаратного обеспечения подсистем сенсоров и исполнительных элементов, № 3, с. 50–62.

Степнова Е.И., Киселев С.К. Адаптивный интерфейс бортовой информационно-управляющей системы летательного аппарата, № 2, с. 105–111.

Федосеева Е.А., Крупеня Д.В., Булатов В.Р. Анализ применения тепловых насосов в мире, № 2, с. 54–58.

Феоктистов Е.А., Феоктистов Н.А. Микропроцессорное управление электролизного генератора для сварки и пайки ювелирных изделий, № 3, с. 70–76.

Хазиева Р.Т., Васильев П.И., Купцов Д.В. Исследование стабилизационных свойств двухсекционного многофункционального интегрированного электромагнитного компонента, № 3, с. 36–42.

Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Латыпов Б.Ф. Математическое моделирование режимов работы резонансного инвертора, № 4, с. 18–27.

Хазиева Р.Т., Мухаметшин А.В., Горшенин А.И. Исследование и разработка схемы измерения переменного тока при испытании изоляции, № 4, с. 46–55.

Хлебцов А.П., Зайнутдинова Л.Х., Шилин А.Н. Развитие методов и устройств диагностики силового электрооборудования трансформаторных подстанций, № 3, с. 14–27.

Шуваева А.О., Меньшенин И.С. Разработка и испытание устройства катодной защиты с автономным источником питания, № 1, с. 47–53.

Шулаева Е.А., Маштанов Н.М., Иванов А.Н. Многокритериальная оптимизация работы ртутного электролизера для получения каустической соды методом имитации отжига, № 1, с. 89–96.

Шулаева Е.А., Сатчихина Л.А. Математическое моделирование реактора-полимеризатора для процесса полимеризации поливинилхлорида суспензионным методом, № 3, с. 94–99.

Янбеков Э.Р. Цифровая аналитика геолого-технических мероприятий, № 1, с. 73–81.

LIST OF ARTICLES PUBLISHED IN 2020

- Agureev A.V., Gubarev D.E., Kochubey A.S., Zikiy A.N.* Two traveling wave filters, № 3, p. 83–93.
- Andrianov A.V., Zikiy A.N., Kochubey A.S.* Broadband medium power amplifier for decimeter waves, № 1, p. 82–88.
- Bordyug A.S.* Application of cyclic testing of marine control hardware, № 3, p. 77–82.
- Bordyug A.S.* Application of elements of marine automation in simulation of fire in the engine room, № 4, p. 87–92.
- Debiev M.V., Elmurzaev A.A.* Development of renewable sources energies of the Chechen Republic, № 1, p. 16–23.
- Degtyarev A.V., Kozachenko L.N., Sobolev A.S., Antipenko I.V.* Kinematic model of the process of ship maneuvering in the conditions of an informationally complex situation, № 3, p. 100–105.
- Dolomatov M.Yu., Koledin O.S., Kovaleva E.A., Akhtyamova K.R.* Prediction of cetanic numbers of alkanes on the topological characteristics of molecules, № 2, p. 127–133.
- Dolomatov M.Yu., Shutkova S.A., Bakhtizin R.Z., Dolomatova M.M.* Research of the molecular and electronic structure of nanoclusters of molecular dimers of «continental» type oil asphalts, № 1, p. 118–124.
- Dorfman B.S., Balahoncev V.E., Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Gusakov D.V., Bekuzin V.I.* Virtual test bench for testing elements of aircraft power supply system, № 1, p. 5–15.
- Fedoseeva E.A., Krupenya D.V., Bulatov V.R.* Analysis of the heat pump use in the world, № 2, p. 54–58.
- Feoktistov E.A., Feoktistov N.A.* Microprocessor control of electrolysis-water generator for welding and soldering jewel, № 3, p. 70–76.
- Gaitov R.Z., Mukhamadiev A.A.* Information-measuring and control system for monitoring bee colonies, № 2, p. 112–119.
- Gubarev D.E., Zikiy A.N., Kochubey A.S.* Input device of the centimeter range receiver, № 2, p. 79–85.
- Gusev R.A., Bukharov D.S.* Revisiting the development of a software for monitoring and analyzing of distance protection devices, № 1, p. 40–46.
- Haziyeva R.T., Vasiliev P.I., Kupcov D.V.* Research of the two-section multifunctional integrated electromagnetic component stabilization properties, № 3, p. 36–42.
- Ivanova O.V., Khalikov R.M., Korotkova L.N.* Rational management of quality of functioning of electrical technical equipment of technological scheme for producing liquefied gas, № 1, p. 24–29.
- Ivanova O.V., Korotkova L.N., Fattakhov M.M., Khalikov R.M.* Reliable quality management of electrical equipment functioning in 3D additive technologies, № 3, p. 43–59.
- Karagodin V.V., Gorin V.A., Khomich I.V.* Algorithm for numerical calculation optimum on speed management of nonlinear objects, № 2, p. 66–72.
- Khaziyeva R.T., Kirillov R.V., Latypov B.F.* Mathematical simulation of operating modes of a resonant inverter, № 4, p. 18–27.
- Khaziyeva R.T., Muhametshin A.V., Gorshenin A.I.* Research and development of the accurate measurement scheme for insulation tests, № 4, p. 46–55.
- Khlebtsov A.P., Zainutdinova L.Kh., Shilin A.N.* Development of methods and devices for diagnostics of power electrical equipment of transformer substations, № 3, p. 14–27.
- Kitabov A.N., Abutalipov U.M., Sharipov A.I., Khakimyanov M.I.* Estimation of error in determining electric power consumption during the operation of rod pumping unit, № 4, p. 5–17.
- Komissarov D.R.* Microcontrollers in the battery charge and discharge monitoring system for uninhabited underwater vehicles, № 2, p. 45–53.
- Komissarov D.R., Bordyug A.S.* Application of nickel-zinc batteries in the emergency power system of passenger ship, № 4, p. 28–36.
- Kosimov B.I.* Application of the finite element method for electromagnetic analysis of large-size pilger mill motor, № 2, p. 13–27.

- Kurochkin L.M., Chernyshev A.S., Kurochkin M.A., Kuvatov M.V., Zhilenkov A.A.* Assessment of the consistency of discrete and continuous-medium approaches in the hybrid model on the example of the regional transport network, № 4, p. 56–67.
- Le Van Tung, Bui Trung Kien.* Direct current control of the active rectifier with improve method direct torque control AC motor, № 1, p. 54–61.
- Le Van Tung, Do Chi Thanh.* Research on direct power control of frequency converter with many motors using direct torque control, № 2, p. 35–44.
- Likhachev E.A., Zaytseva A.A., Klimenko O.V., Kerasirova A.A.* Built-in ACS-37 control system, № 1, p. 112–117.
- Losev F.A., Sushkov V.V.* The stability assessment of oilfield objects at various asymmetrical voltage sags, № 2, p. 5–12.
- Marchenko A.A., Trudnev S.Yu.* Research of asynchronous motor loading process in generator braking mode, № 3, p. 6–13.
- Martynov O.V., Karpenkov A.S.* Calculation of velocity of a vehicle based on dynamic tracking of road pavements using video stream data, № 4, p. 68–78.
- Muraveva E.A., Grigoreva T.V., Valitov D.R.* Development of intellectual complex for adaptive management of microclimate parameters of flour storage processes, № 4, p. 79–86.
- Muraveva E.A., Kvirring M.D.* Engineering of adaptive fuzzy control in Matlab Simulink, № 3, p. 63–69.
- Muraveva E.A., Sharipov M.I., Kubryak A.I.* Development of a method for controlling the production process in oil and gas fields using neural networks, № 1, p. 62–68.
- Muraveva E.A., Yurasov A.O.* A neural network-based control system using PID controller to control the deaerator, № 2, p. 59–65.
- Popov A.A., Ovsyankin A.K.* Software development for calculation of rectification installation, № 2, p. 73–78.
- Reshetnyak S.N.* Analysis of methods for constructing predictive models of power consumption in high-performance coal mines, № 2, p. 28–34.
- Rodionov A.S., Valiev R.R., Vorobyev A.V.* Chat-bot for training personnel in oil and gas production, № 2, p. 86–91.
- Root D.I., Rogozhnikov A.O., Tolstova L.A.* Modernization of ship power complex by its elements modification, № 4, p. 66.
- Salikhov R.B., Zinnatulina A.A., Pavlov A.V.* Ammonia control system in agro-industrial complexes, № 2, p. 120–126.
- Samarov E.K.* Two-dimensional discrete Gabor transformation and its application to noise suppression in digital images, № 1, p. 69–72.
- Sattarov R.R., Garafutdinov D.R.* Study of the electromagnetic field of a controlled magnetoelectric damper, № 3, p. 28–35.
- Shulaeva E.A., Mashtanov N.M., Ivanov A.N.* Multi-criterial optimization of the work of a mercury electrolyzer for producing caustic soda by annealing simulations, № 1, p. 89–96.
- Shulaeva E.A., Satchikhina L.A.* Mathematical modeling of a polymerizer reactor for the polyvinyl chloride polymerization process by the suspension method, № 3, p. 94–99.
- Shuvaeva A.O., Menshenin I.S.* Development and testing of a cathodic protection device with an autonomous power source, № 1, p. 47–53.
- Solodilova N.Z., Akhmedzhanov F.M., Krymsky V.G., Budeeva O.N.* Fundamentals of the development of hardware and software for intelligent clothing. Part 1. Analysis of features of hardware for subsystems of sensors and actuators, № 3, p. 50–62.
- Soloviev A.V., Kretuk D.A.* To the issue of justification of the required degree of redundancy of technical systems ensuring object operation, № 1, p. 30–39.
- Stepnova E.I., Kiselev S.K.* Adaptive interface of the on-board information control system of the aircraft, № 2, p. 105–111.
- Vazhdaev K.V., Urakseev M.A., Martyasheva V.A.* Automated multifunctional gas leakage control system using wireless technology, № 1, p. 97–105.

Yanbekov E.R. Digital analytics of geological and engineering operations, № 1, p. 73–81.

Zhilentov A.A., Chernyi S.G. Existence and reach consensus as a problem of reliability in distributed applications and cyber-physical systems, № 2, p. 92–104.

Zlaman P.N., Andrianov A.V., Zikiy A.N. Experimental investigation of the LTC5553 microcircuit in the frequency multiplication mode with directional coupler, № 1, p. 106–111.

Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале:

1. Статьи, предоставляемые авторами в журнал, должны соответствовать профилю журнала, обладать новизной, интересовать широкий круг научной общественности.
2. Редакция принимает к публикации только открытые материалы на русском и английском языках (для иностранных авторов).
3. Поля — 2,5 см с каждой стороны; шрифт — Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал — полуторный; ссылки на литературу — в квадратных скобках. При наличии ссылок список литературы обязателен (в порядке цитирования, в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008).
4. В правом верхнем углу жирным курсивом: фамилия, имя, отчество авторов (обязательно полностью), ученая степень, ученое звание, должность, структурное подразделение (обязательно полностью), наименование организации (полностью), город, страна.
5. По центру, жирным шрифтом, заглавными буквами: название статьи, УДК в правом верхнем углу.
6. В конце статьи укажите почтовый адрес с указанием индекса, фамилию и инициалы получателя (по этому адресу будет выслан журнал), телефон (сотовый), e-mail контактного лица. Файл со статьей оформить: Фамилия И.О.doc (или docx). Отправлять по адресу: uor-ugaes@mail.ru.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельными файлами.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (240 слов, определяющих теоретическую ценность и практическую новизну статьи), ключевые слова (не менее 10), список литературы обязателен (не менее 5 источников) на русском и английском языках.
9. Автор дает согласие на воспроизведение на безвозмездной основе в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВО «УГНТУ» электронной версии своей статьи, опубликованной в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы».
10. Графический и табличный материал должен быть представлен в черно-белом варианте в приложении к WORD, например, Microsoft Graph, без использования сканирования; для диаграмм применять различную штриховку, размер шрифта 10 или 11 pt, математические формулы оформляются через редактор формул Microsoft Equation, а их нумерация проставляется с правой стороны. Таблицы, диаграммы, рисунки подписываются 12 шрифтом в правом верхнем углу.
11. Сокращение слов, имен и названий, как правило, не допускается. Разрешаются лишь общепринятые сокращения мер физических, химических и математических величин и терминов и т. д.
12. Поступившие в редакцию статьи в обязательном порядке будут проходить рецензирование. Рецензии отклоненных работ высылаются авторам и содержат аргументированный отказ от публикации. В рецензиях работ, отправленных на доработку, указываются замечания к статье.
13. Все статьи, поступившие в редакцию, в обязательном порядке проходят проверку в системе «Антиплагиат».
14. С аспирантов плата за публикацию не взимается. При отправлении статьи на электронный адрес также необходимо отправить отсканированную справку из аспирантуры, заверенную отделом кадров.

Памятка авторам

В статье настоятельно рекомендуется:

- НЕ использовать табуляцию (клавиша Tab);
- НЕ устанавливать свои стили абзацев (кроме принятых по умолчанию);
- НЕ расставлять автоматические списки (при нумерации строк и абзацев);
- НЕ ставить двойные, тройные и т. д. пробелы между словами.

Рекомендуется применять в статье только один тип кавычек («»).

Помнить о том, что необходимо различать дефис и тире. Тире выставляется сочетанием двух клавиш («Ctrl» + «-»).

Все цитаты в статье должны быть соотнесены со списком литературы, при прямом цитировании обязательно указывать номера страниц. Список литературы не следует смешивать с примечаниями, которые должны располагаться перед списком литературы.

Статьи, не соответствующие требованиям, отклоняются для доработки.

Requirements for the materials, provided for publication in the journal:

1. Articles provided by the authors in the Journal should match the profile of the magazine, be new, be interesting for a wide range of scientific community.
2. Revision accepted for publication only open materials in Russian and English (for foreign authors).
3. Fields — 2.5 cm on each side; font — Times New Roman, font size — 14, line spacing — one and a half; References in square brackets. If there is a list of literature references is required (in order of citation in accordance with GOST R 7.05-2008).
4. In the upper right corner in bold italics: surname, name, patronymic of the author (certainly in full), academic degree, academic rank, position, name of organization (in full), country, city.
5. Centered, bold capital letters: title of the article. UDC — in the upper right corner.
6. At the end of the article specify the e-mail address with ZIP code, name and initials of the recipient (the address will be sent to the magazine), telephone (mobile), e-mail of the contact person. Article File Contents: Surname N.P.doc (or docx). Send to the address: uop-ugaes@mail.ru.
7. Be sure to send color photos of the authors in separate files (at least 1 MB and not more than 5 MB).
8. To the article must be accompanied by the Russian and English languages: the article title, abstract (240 words, determine the theoretical value and practical novelty of the article), keywords (at least 10), references required (at least 5 sources).
9. Author agrees to play free of charge on the Internet at the website FSBEI HE «USPTU» electronic version of his article published in the journal «Electrical and data processing facilities and systems».
10. Graphical and table material should be presented in the annex to the WORD. For example, Microsoft Graph, without scanning; diagrams for applying a different shading, font size 10 or 11 pt, mathematical formulas should be made through the formula editor Microsoft Equation, and their numbers stamped on the right side. Table signed by the 12th print in the upper right corner, diagrams, drawings — at the bottom center.
11. Reductions of words of names usually are not permitted. Allowed only standard abbreviations measures, physical, chemical and mathematical quantities and terms, etc.
12. Received articles will necessarily be reviewed. Reviews of rejected papers are sent to the authors and contain a reasoned rejection of the publication. In reviews of works sent for revision, specify comments on the article.
13. All articles received by the editorial compulsorily tested in the «Anti-plagiarism».
14. Article volume with the summary and the list of references shouldn't exceed 12 pages.

Memo to authors

The article is highly recommended:

- NOT TO use the tab key (Tab);
- NOT TO place your paragraph styles (other than the defaults);
- NOT TO set automatic lists (with line numbers and paragraphs);
- NOT TO put double, triple and so. D. The spaces between words.

Recommended in the article is only one type of quotes («» or "").

Remember that it is necessary to distinguish hyphens and dashes. Dash is exhibited by a combination of two keys («Ctrl» + «-»).

All quotations in the article should be correlated with the list of literature, with direct quotations necessarily indicate page numbers. References should not be confused with the notes that must be placed before the bibliography.

Articles that do not meet the requirements will be rejected for revision.