

ISSN 1999-5458

Подписной индекс: 91824 в каталоге «Пресса России»

Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 1, т. 13, 2017

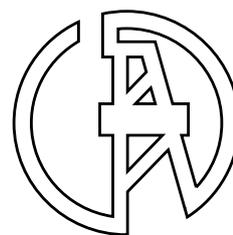


Electrical and data processing facilities and systems

№ 1, т. 13, 2017



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УГНТУ

№ 1, т. 13, 2017

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

Учредитель

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

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

Международный стандартный серийный номер ISSN 1999-5458.

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

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

Зам. главного редактора:

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

Члены редакционной коллегии:

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



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



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



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



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



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



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



П.И. Чередниченко — д-р техн. наук, проф. Черниговского государственного технологического университета (г. Чернигов, Украина)



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



Ответственный секретарь: А.А. Мухамадиев
Технический редактор: Н.Г. Трофимова

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, 2017.

Адрес редакции и издательства: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1
Тел.: (347) 243-16-19, ies.rusoil.net

Цена свободная. 12+

Подписано в печать 20.03.2017 г. Формат 60x84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,95.
Тираж 1 000 экз. Заказ № 79.

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

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

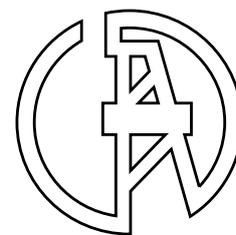
Материалы приводятся в авторской редакции.

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

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE PETROLEUM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY



USPTU

№ 1, v. 13, 2017

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:

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

Deputy editor-in-chief:

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

Members of an editorial board:

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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



P.I. Cherednichenko — Dr. Sci.Tech., Prof. of Chernigov State Technological University (Chernigov, Ukraine)



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



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



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



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



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



Assistant editor: A.A. Mukhamadiev

Technical editor: N.G. Trofimova

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.uges.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, 2017.

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

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

Price is free. **12+**

Publishing authorized on 20.03.2017. Paper format 60x84/8. Offset printing. 13,95 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 79.

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

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced without prior written consent of the Editors office of the «Bulletin USPTU. Science, education, economy. Series economy».

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>Хамидуллин И.Н., Ильин В.К., Сабитов Л.С., Стрелков Ю.М.</i> К вопросу о надежности воздушных линий электропередачи	5
<i>Гизатуллин Ф.А., Хакимьянов М.И.</i> Анализ режимов работы электроприводов штанговых скважинных насосных установок	11
<i>Шапиро С.В., Горбунов А.С., Насыров Р.А., Сафаргалин Ф.С.</i> Моделирование синхронно-асинхронного каскадного генератора в MATLAB	19
<i>Федосов А.В., Федосов В.А., Мухамадиев А.А.</i> Электротехнические испытания экспериментальной вакуумно-воздушной стиральной машины	26
<i>Пантина А.И., Белов О.А.</i> Контроль технического состояния судовых асинхронных двигателей на основе характеристик внешнего электромагнитного поля	32
<i>Саяхов И.Ф., Николаева А.Н.</i> Электромеханические приводы для управления адаптивными крыльями летательных аппаратов	37
<i>Стыскин А.В., Уразбахтина Н.Г.</i> Моделирование и анализ возможности самозапуска асинхронных двигателей собственных нужд	43

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Артюшенко В.М., Воловач В.И.</i> Использование амплитудной селекции доплеровского сигнала при измерении скорости движения протяженных объектов	
<i>Artyushenko V.M., Volovach V.I.</i> Applying of doppler signal amplitude selection for measuring of extended objects motion speed	50
<i>Ерофеев В.В., Игнатъев А.Г., Альмухаметов А.А., Шарафиев Р.Г., Ерофеев С.В.</i> Информационно-диагностический комплекс для оценки параметров технического состояния нефтегазопроводов	59
<i>Родионов А.С., Мухаметзянов Э.В., Курбангалиев А.М., Исламгулов Р.Р.</i> Программно-аппаратный комплекс для мониторинга показаний датчиков	66
<i>Карабельская И.В., Абызбаев И.И., Могучев А.И.</i> Моделирование методов исследования скважин в клиновидной среде с цилиндрическими включениями	72
<i>Зайнуллин А.Р., Багманов В.Х.</i> Метод подавления периодических спектральных полос пропускания на основе комбинированного фотонного СВЧ-фильтра в гибридных сетях связи	80

МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

<i>Ураксеев М.А., Закурдаева Т.А.</i> Математическая модель, чувствительность и статическая характеристика электрооптического прибора	86
<i>Муратишин А.М., Волков С.Ю., Холодова Е.М.</i> Разработка требований к специалистам по метрологии в наноиндустрии	93
<i>Денисова О.А., Абрамишвили Р.Л.</i> Жидкокристаллическая ячейка для индикации контроля и измерения уровня жидких сред	98

НАНОЭЛЕКТРОНИКА И КВАНТОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

<i>Доломатов М.Ю., Журавлева Н.А., Казаков М.А.</i> Имитационное моделирование систем с хаосом химического состава стохастическими методами	102
Об авторах	110

CONTENT

ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Khamidullin I.N., Ilyin V.K., Sabitov L.S., Strelkov Yu.M.</i> Reliability overhead power lines	5
<i>Gizatullin F.A., Khakimyanov M.I.</i> Operating mode analysis of the oilwells sucker rod pump units drives	11
<i>Shapiro S.V., Gorbynov A.S., Nasyrov R.A., Safargalin F.S.</i> Modeling of cascaded synchronous-asynchronous generator	19
<i>Fedosov A.V., Fedosov V.A., Mukhamadiev A.A.</i> Electrical tests of the experimental air vacuum-washing machine	26
<i>Pantina A.I., Belov O.A.</i> Technical state verification of marine induction motor on the characteristics of external electromagnetic field	32
<i>Sayakhov I.F., Nikolaeva A.N.</i> Electromechanical actuators to control adaptive compliant aircraft wings	37
<i>Styskin A.V., Urazbakhtina N.G.</i> Modeling and analysis of opportunities self induction motors own needs	43

DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Artyushenko V.M., Volovach V.I.</i> Applying of doppler signal amplitude selection for measuring of extended objects motion speed	50
<i>Erofeyev V.V., Ignatiev A.G., Almukhametov A.A., Sharafiyev R.G., Erofeyev S.V.</i> Information and diagnostic system for evaluation of technical condition parameters oil and gas pipelines	59
<i>Rodionov A.S., Mukhametzyanov E.V., Kurbangaliev A.M., Islamgulov R.R.</i> Computer appliance for monitoring readings from sensors	66
<i>Karabelskaya I.V., Abyzbaev I.I., Moguchev A.I.</i> Modeling methods of wells the wedge-shaped medium with cylindrical inclusion	72
<i>Zainullin A.R., Bagmanov V.Kh.</i> A method of elimination periodic spectral passbands based on combined photonic microwave filter in hybrid networks	80

METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES

<i>Urakseev M.A., Zakyrdaveva T.A.</i> Mathematical model, sensitivity and static characteristics of electro-optical device	86
<i>Muratshin A.M., Volkov S.Yu., Kholodova E.M.</i> Development of requirements for specialists on metrology in nanoindustry	93
<i>Denisova O.A., Abramishvili R.L.</i> Liquid crystal cells to indicate the monitoring and measuring the level of liquid media	98

NANOELECTRONICS AND QUANTUM DATA SYSTEMS

<i>Dolomatov M.Yu., Zhuravleva N.A., Kazakov M.A.</i> Simulation of systems with chaos of chemical composition using stochastic methods	102
---	-----

About the authors	110
--------------------------	-----



Хамидуллин И. Н.
Khamidullin I. N.

аспирант кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань, Российская Федерация



Ильин В. К.
Ilyin V. K.

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань, Российская Федерация



Сабитов Л. С.
Sabitov L. S.

кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань, Российская Федерация



Стрелков Ю. М.
Strelkov Yu. M.

руководитель проекта ООО «Инженерный центр «Энергопрогресс»»,
г. Казань, Российская Федерация

УДК 621.311.1

К ВОПРОСУ О НАДЕЖНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В современных условиях необходимо реализовывать наиболее эффективные мероприятия для обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей. В статье рассматривается вопрос оценки надежности функционирования воздушной линии электропередачи 6–10 кВ, являющейся наиболее подтверждаемым звеном электроснабжения потребителей.

Механическая часть воздушной линии состоит из четырех основных элементов: опоры, траверсы, изолятора и провода. Каждый из этих элементов имеет свою вероятность и тяжесть отказа. Для оценки эффективности вариантов реконструкции, повышающих надежность воздушной линии 6–10 кВ на стадии проектирования, необходимо определить алгоритм количественной оценки ее механической надежности.

Воздушную линию электропередачи ввиду её значительной протяженности необходимо рассматривать как систему, состоящую из участков линии, проходящих по территории с

разными климатическими условиями, рельефом местности и разными грунтами. Следовательно, одна и та же линия имеет разную надежность на отдельных участках. Поэтому, чтобы повысить надежность всей линии, можно в первую очередь повысить надежность участков линии, наиболее подверженных гололедно-ветровым воздействиям. В данной статье рассматриваются алгоритм оценки надежности воздушной линии ВЛ 6–10 кВ, варианты повышения надежности на стадии проектирования и выполняется анализ рассмотренных вариантов. Практическая ценность предложенной методики заключается в возможности ее использования электросетевыми организациями при проектировании воздушных линий 6–10 кВ с целью определения наиболее оптимального проекта.

В статье выполняется расчет безотказности воздушной линии при различных вариантах реконструкции с использованием деревянных, железобетонных, стальных многогранных опор, изолированных проводов марки СИП-3 и неизолированных проводов марки АС-70.

Ключевые слова: надежность, безотказность, воздушная линия электропередачи, проектирование, реконструкция, оценка вариантов.

RELIABILITY OVERHEAD POWER LINES

In modern conditions, it is necessary to implement the most effective measures to ensure uninterrupted power supply to consumers. The article considers the question of assessing the reliability of the operation of the 6–10 kV overhead transmission line, which is the most confirmed link in the electricity supply to consumers.

The mechanical part of the overhead line consists of four main elements: a support, a traverse, an insulator and a wire. Each of these elements has its own probability and severity of failure. To evaluate the effectiveness of reconstruction options that increase the reliability of the air line 6–10 kV at the design stage, it is necessary to determine the algorithm for quantifying its mechanical reliability.

The air power transmission line, because of its considerable length, must be considered as a system consisting of sections of the line passing through the territory with different climatic conditions, terrain and various soils. Consequently, the same line has different reliability in individual sections. Therefore, in order to increase the reliability of the entire line, it is possible first of all to increase the reliability of sections of the line most prone to ice-and-wind impacts. In this article, we examine the algorithm for estimating the reliability of 6–10 kV overhead lines, options for increasing reliability at the stage of procensing, and analyzing the options considered. The practical value of the proposed methodology lies in the possibility of its use by electric grid organizations in the design of 6–10 kV overhead lines in order to determine the most optimal.

The article calculates the reliability of air lines for various reconstruction options using wooden reinforced concrete, steel polyhedral supports, insulated wires of the SIP-3 brand and non-insulated wires of the AC-70 brand.

Key words: reliability, overhead power transmission line, design, evaluation of reconstruction options.

Частота отказов воздушной линии (ВЛ) как системы равна сумме частот отказов ее подсистем. В качестве подсистемы (составной части ВЛ) примем один анкерный пролет, так как отказы любого элемента ВЛ ограничиваются в рамках одного анкерного пролета, так как надежность системы электроснабжения определяется надежностью наиболее слабого элемента, определение уровня надежности ВЛ 6–10 кВ следует производить по результатам расчета надежности одного анкерного участка линии, имеющего наименьшую механическую надежность. Анкерный участок, в свою очередь, целесоо-

бразно рассматривать как отдельную систему, состоящую из единичных элементов.

В качестве модели всей линии можно рассматривать систему из n элементов (анкерных участков). Расчет надежности должен производиться для каждого анкерного участка ВЛ. Надежность линии будет определяться надежностью самого слабого анкерного участка.

Учитывая вышеизложенное, алгоритм расчета надежности ВЛ можно представить следующим образом.

На основании имеющихся данных о климатических и постоянных конструктивных

нагрузках (функция распределения) и прочностных характеристик производится N расчетов элементов ВЛ (промежуточные опоры, провода) для определения вероятности безотказности каждого. Далее определяется вероятность безотказной работы каждого из анкерных участков ВЛ. Надежность воздушной линии будет определяться анкерным участком с наименьшей вероятностью безотказной работы в наиболее экстремальных условиях.

Так, согласно [1], в наиболее экстремальных условиях функционирования при воздействии гололедно-ветровых нагрузок возможны три основных случая отказа ВЛ.

В первом случае — при отложении на проводах предельной толщины стенки гололеда (b'') — может произойти обрыв провода или разрушение повышенным тяжением провода элементов анкерной опоры.

Во втором случае — в безгололедном режиме предельная скорость ветра V'' может вызвать падение промежуточной опоры ВЛ.

В третьем случае падение промежуточной опоры на ВЛ может быть вызвано совместным действием гололедно-ветровой нагрузки Q'' , зависящим от величины толщин стенки гололеда и от скорости ветра в гололедном режиме.

Вероятность же отказа P_R ВЛ 6–10 кВ будет определяться как сумма вероятностей появления предельных гололедной, ветровой и гололедно-ветровой нагрузок [1]

$$P_R = P_b + P_v + P_Q. \quad (1)$$

Средний срок между отказами ВЛ:

$$t_R = \frac{1}{P_R}. \quad (2)$$

Величину t_R рекомендуется в обычных энергосистемах принимать равной не менее 40 лет.

При отложении на проводах предельной толщины стенки гололеда (b'') может произойти не только обрыв провода, но и разрушение опоры, так как имеет место жесткое закрепление наледью провода к опоре.

Высока вероятность отклонения опоры ВЛ также и вдоль оси под совместным действием гололедно-ветровой нагрузки. Перераспределение нагрузки может быть вызвано неравномерным отложением льда на смежных пролетах, а также разностью в длине самих пролетов.

Учитывая вышесказанное, можно утверждать, что в данном случае возможны два варианта отказа ВЛ: разрушение опоры или обрыв провода, поэтому целесообразно ввести в формулу (1) еще одно слагаемое, характеризующее вероятность разрушения опоры при отложении гололеда на проводах P_{bl} :

$$P_R = P_b(P_{bl}) + P_v + P_Q. \quad (3)$$

Предельная нагрузка на провода b'' при отложении на проводах предельной толщины стенки гололеда определяется по выражению:

$$b'' = -\frac{d}{2} + \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + \frac{S \cdot l \cdot \theta}{v \cdot \pi} \cdot \left[\sigma_T'' \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 4 \cdot \varepsilon'}{l^2} + \left(\frac{\gamma_3}{\sigma_3}\right)} - \gamma_1 \right]}, \quad (4)$$

где d — диаметр провода, мм;

S — сечение провода, мм²;

π — удельный вес льда, равный 9 мН/см³,

l — длина пролета ВЛ, м;

γ_3 — удельная нагрузка от веса провода, покрытого гололедом; Н/м·мм²·10⁻³;

γ_1 — удельная нагрузка от веса провода Н/м·мм²·10⁻³;

σ_3 — напряжение в проводе при расчетной толщине стенки гололеда без ветра, МПа;

$\sigma_T'' = 0,99^{T-10} \cdot \sigma_T$ — предельная величина напряжения в проводе после эксплуатации в течении T лет, МПа;

$\varepsilon' = \varepsilon_T - \varepsilon_3$ — относительное удлинение провода при изменении напряжения в проводе от σ_3 до σ_T , определяемое по характеристике первоначального растяжения.

Введенная предельная нагрузка на опору b'' будет определяться как разница между предельной прочностью опоры M_T'' и результирующим расчетным моментом в зависимости от веса провода и льда на проводе (рисунок 1):

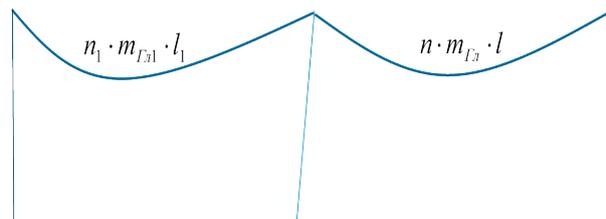


Рисунок 1. Схема расчета предельной нагрузки M_T'' на опору при отложении на проводах предельной толщины стенки гололеда

$$b_l^n = M_T^n - (n \cdot m_{Tn} \cdot l + n \cdot m_n \cdot l - (n_l \cdot m_{Tn_l} \cdot l_l + n_l \cdot m_{n_l} \cdot l_l)). \quad (5)$$

Так как $n=n_l$,

$$b_l^n = M_T^n - n \cdot ((m_{Tn} + m_n) \cdot l - (m_{Tn_l} + m_{n_l}) \cdot l_l), \quad (6)$$

где m_{Tn} — расчетный единичный изгибающий момент от веса гололеда на проводе длиной 1 м, действующий вдоль оси ВЛ (Н);

m_n — расчетный единичный изгибающий момент провода длиной 1 м, (Н).

Предельная нагрузка при в безгололедном режиме от предельной скорости ветра [1]:

$$V^n = \sqrt{\frac{1,6 \cdot (M_T^n - M_G)}{n \cdot l \cdot C_x^n \cdot d \cdot \alpha_w \cdot H \cdot 10^{-3} + 0,5 \beta \cdot C_x^o \cdot F_{H3} \cdot H}}, \quad (7)$$

где M_G — расчетный изгибающий момент от веса стойки, веса траверсы, изоляторов, проводов, при отклонении опоры от вертикального положения, определяется по формуле

$$M_G = g \cdot \gamma_f [0,4 \cdot G_1 \cdot f^n + G_2 \cdot f_2^n], \quad (8)$$

где γ_f — коэффициент надежности по весовой нагрузке, принимаемый

- 1,05 — для проводов, тросов, изоляторов и металлических опор,

- 1,1 — для железобетонных и деревянных опор;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения;

G_1 — масса надземной части стойки опоры, кг;

G_2 — масса траверс-изоляторов, проводов, кг;

f^n — прогиб вершины стойки опоры поперек ВЛ при загрузке ее до M_T^n , м;

$$f^n = f \cdot \frac{M_T^n}{M_{CT}} \quad (9)$$

f — горизонтальное перемещение вершины стойки опоры, соответствующее расчетному изгибающему моменту M_{CT} действующему поперек линии, м;

M_T^n — первоначальный предельный изгибающий момент стойки в расчетном сечении (до эксплуатации стоек на ВЛ), Н·м;

$$f_2^n = f_2 \cdot \frac{M_T^n}{M_{CT}}, \quad (10)$$

где отклонение центра тяжести проводов

$$f_2 = f \cdot \frac{H_2}{H-h}, \quad (11)$$

H_2 — средняя высота подвески проводов на опоре, м;

H — высота надземной части опоры, м;

α_w — коэффициент, учитывающий неравномерность ветрового давления по пролету;

C_x^o — аэродинамический коэффициент лобового сопротивления стойки;

C_x^o — аэродинамический коэффициент лобового сопротивления проводов.

Расчет предельной нагрузки Q_{II} при совместном действии гололедно-ветровой нагрузки Q_{II} , зависящий от величины толщин стенки гололеда и от скорости ветра в гололедном режиме:

$$Q_{II}^n = \frac{(M_T^n - M_G - n \cdot m_T \cdot l) \cdot C_x^n \cdot (10 + 2 \cdot b_3)}{n \cdot l \cdot C_x^n \cdot (10 + 2_3) \cdot \alpha_{wT} \cdot H_2 + 0,5 \cdot \beta \cdot C_x^o \cdot F_{H3} \cdot 10^3}, \quad (12)$$

F_{H3} — площадь проекции надземной части конструкции опоры на плоскость, перпендикулярную ветровому потоку, вычисленная по наружному габариту;

α_{wT} — коэффициент, учитывающий неравномерность ветрового давления по пролету ВЛ в гололедном режиме.

Введенные в алгоритм составляющие, характеризующие отклонение опоры ВЛ и вдоль линии, позволяют более точно описать систему и определить ее надежность.

Вероятность появления каждой из вышеописанных предельных нагрузок b^{II} , v^{II} , Q^{II} может быть определена на основании материалов по подготовке региональных карт климатических нагрузок. Для определения максимальных климатических нагрузок можно использовать первое распределение Гумбеля [2]

$$P_x = \left(\frac{\alpha_i}{x} \right)^{\beta_i}, \quad (13)$$

$$t_x = \left(\frac{x}{\alpha_i} \right)^{\beta_i}. \quad (14)$$

Рассмотрим следующие варианты реконструкции ВЛ 6–10 кВ и сравним их надежность:

вариант № 1 — реконструкция ВЛ 6–10 кВ с использованием железобетонных опор повышенной прочности и провода АС;

вариант № 2 — реконструкция ВЛ 6–10 кВ с использованием железобетонных опор и провода на СИП-3;

вариант № 3 — реконструкция ВЛ 6–10 кВ с использованием железобетонных опор и провода на АС;

вариант № 4 — реконструкция ВЛ 6–10 кВ с использованием железобетонных опор и провода на СИП-3;

вариант № 5 — реконструкция ВЛ 6–10 кВ с использованием стандартных стальных многогранных опор и провода СИП-3;

вариант № 6 — реконструкция ВЛ 6–10 кВ с использованием деревянных опор и провода СИП-3.

Расчеты проведем для III района по гололеду с нормативной толщиной стенки гололеда $b_3 = 20$ мм и III району по ветру с нормативным ветровым давлением $W_0 = 650$ Па согласно [2]. Данные климатические районы характерны для большей части центральных регионов РФ. Технические характеристики (таблица 1) выбираются согласно [3, 4].

Как показывают расчеты, наиболее надежной (безотказной) будет вариант реконструкции № 6, предполагающий использование стальных многогранных опор и провод СИП-3. Однако выбор оптимального варианта реконструкции не должен основываться исключительно на критерии надежности ВЛ 6–10 кВ.

Для определения оптимального варианта реконструкции, повышающей надежность ВЛ 6–10 кВ, необходимо определить экономические показатели каждого из вариантов средств и мероприятий. Для данных решения данной задачи целесообразно применить показатель рентабельности вариантов.

Обобщение многокритериальной оценки к однокритериальной необходимо производить путем определения «обобщенного критерия — K_0 » [5, 6]. Данный критерий позволяет производить оценку различных вариантов по величине K_0 , определив наиболее оптимальный. При любых значениях частных критериев обобщенный критерий должен стремиться к максимальному значению. Вид функций K_0 определяется исходя из задачи обеспечения надежности ВЛ 6–10 и оценки вклада каждого частного критерия в общий в виде суммы или в виде произведения. В данном случае значение общего критерия было определено по выражению:

$$K_0 = \alpha_1 \frac{K_{nj}}{K_{n\max}} + \alpha_2 \frac{K_{эj}}{K_{э\max}} \rightarrow \max, \quad (15)$$

где α_1 — вклад критерия надежности в общий критерий;

K_{nj} — значение критерия надежности, отн. ед.;

α_2 — вклад критерия экономичности в общий критерий;

$K_{эj}$ — значение критерия экономичности, отн. ед.;

j — число вариантов реализации.

Рассмотрим три случая.

1 случай. Частные критерии равнозначны: $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,5$. Этот случай характеризует потребность в обеспечении оптимальной надежности ВЛ 6–10 кВ без больших капитальных затрат.

2 случай. Наиболее значимый критерий экономичности: $\alpha_1 = 0,2$, $\alpha_2 = 0,8$. Данный вариант определяет наименее затратный вариант повышения надежности ВЛ 6–10 кВ.

3 случай. Наиболее значимы критерий надежности: $\alpha_1 = 0,8$, $\alpha_2 = 0,2$.

Данный вариант определяет реализацию наиболее надежной ВЛ 6–10 кВ с максимумом капитальных затрат.

Выбор соотношения критериев — вопрос произвольный и зависит от конкретных целей проектирования и строительства ВЛ 6–10 кВ. Электросетевая компания при выборе варианта определяет требуемый уровень надежности и целесообразный уровень капитальных затрат для обеспечения данного уровня надежности.

Вывод

Методика, предложенная в статье, позволяет количественно оценить надежность ВЛ 6–10 кВ на стадии проектирования и выполнить сравнение различных вариантов реконструкции с целью определения наиболее оптимального.

Таблица 1. Расчет безотказности вариантов реконструкции ВЛ 6–10 кВ

№	$b^II, \text{мм}$	$V^II, \text{м/с}$	$Q^II, \text{Н/м}$	t_b	P_b	t_v	P_v	t_Q	P_Q	$T_x, \text{лет}$	P_x
1	29,37	48,61	33,44	94,31	0,011	81,84	0,012	86,08	0,011	0,034	29,65
2	53,06	46,62	33,27	84,34	0,012	94,18	0,011	86,76	0,011	0,033	30,04
3	29,37	40,64	22,74	94,31	0,011	46,13	0,022	49,82	0,019	0,051	19,51
4	53,06	38,97	22,57	84,34	0,012	53,10	0,019	50,40	0,019	0,049	20,22
5	29,37	85,85	64,56	84,34	0,012	558,98	0,002	213,65	0,004	0,018	55,61
6	29,37	83,88	49,81	84,34	0,012	512,01	0,002	146,48	0,006	0,020	49,58

Список литературы

1. Ударов В.М. Методические указания по количественной оценке механической надежности действующих воздушных линий напряжением 0,38-10 кВ при гололедно-ветровых нагрузках // Руководящие материалы по проектированию электрических сетей. М.: ОАО «РОСЭП», 2014. С. 91–97.
2. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. М.: Мир, 1977. 451 с.
3. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. СПб.: УВСИЗ, 2005. С. 291–295.
4. Ударов В.М. Стальные многогранные опоры ВЛ 6-10 кВ. Рабочие чертежи / ОАО РОСЭП. 2002. 17 с.
5. Ударов В.М. Железобетонные опоры ВЛ 6-10 кВ. Рабочие чертежи / Сельэнергопроект. 1989. С. 5–10.
6. Лебедева Ю.В. Выбор концепции развития воздушных линий электропередачи 110–220 кВ, подверженных экстремальным метеорологическим воздействиям: дисс. ... канд. техн. наук. Саратов, 2011. 93 с.

References

1. Udarov V.M. Metodicheskie ukazaniya po kolichestvennoj ocenke mehanicheskoj nadezhnosti dejstvujushhijh vozdushnyh linij naprjazheniem 0,38-10 kV pri gololedno-etrovyh nagruzkah // Rukovodjashhie materialy po proektirovaniju jelektricheskijh setej. M.: OAO «ROSJeP», 2014. S. 91–97.
2. Gumbel' Je. Statistika jekstremal'nyh znachenij. M.: Mir, 1977. 451 s.
3. Pravila ustrojstva jelektroustanovok (PUJe). 7-e izd. SPb.: UVSIZ, 2005. S. 291–295.
4. Udarov V.M. Stal'nye mnogogrannye opory VL 6-10 kV. Rabochie chertezhi / OAO ROSJeP. 2002.17 s.
5. Udarov V.M. Zhelezobetonnye opory VL 6-10 kV. Rabochie chertezhi / Sel'jenergoproekt. 1989. S. 5–10.
6. Lebedeva Ju.V. Vybor koncepcii razvitija vozdushnyh linij jelektroperedachi 110–220 kV, podverzhennyh jekstremal'nym meteorologicheskim vozdeystvijam: dis. ... kand. tehn. nauk. Saratov, 2011. 93 s.



Гизатуллин Ф. А.
Gizatullin F. A.

*доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Электромеханика»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический
университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Хакимьянов М. И.
Khakimyanov M. I.

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

УДК 681.586.326

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ШТАНГОВЫХ СКВАЖИННЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

В статье рассматриваются особенности режимов работы электроприводов штанговых скважинных насосных установок. Технологические процессы скважинной добычи нефти являются достаточно энергоемкими. Это объясняется, в том числе, большим количеством нефтедобывающих скважин, многие из которых эксплуатируются в неэффективных режимах со значительными дополнительными потерями энергии.

Электроприводы штанговых глубинных установок работают в тяжелых режимах эксплуатации из-за того, что электродвигатели выбираются с большим запасом по мощности, а нагрузка является непостоянной и имеет циклически изменяющийся характер. Непостоянство нагрузки внутри каждого цикла качания приводит к изменениям всех характеристик электродвигателя, в том числе к изменению КПД и коэффициента мощности $\cos \varphi$.

Авторы исследуют изменение КПД и коэффициента мощности $\cos \varphi$ приводного электродвигателя установки штангового глубинного насоса внутри цикла качания, чтобы оценить режим работы электропривода с точки зрения энергоэффективности.

Были взяты измеренные ваттметрограммы приводов насосных установок, и расчетным путем получены графики изменения КПД и коэффициента мощности внутри одного цикла качания.

В результате проведенных исследований было установлено, что из-за изменения нагрузки внутри каждого цикла качания штанговой глубинной насосной установки КПД и коэффициент мощности могут изменяться в широких пределах — от 0,1 до 0,9 и от 0,08 до 0,8 соответственно. При этом средние значения этих параметров имеют достаточно низкие значения, что приводит к значительным потерям энергии, а также отрицательно влияет на работу электродвигателя и электрической сети.

Предлагается ряд технических решений для повышения энергетических характеристик приводов штанговых глубинных насосных установок: тщательная настройка уравновешивающих грузов, установка электродвигателей меньшей мощности, замена асинхронных электрических двигателей на вентильные, а также балансирных приводов на цепные, использование частотно-регулируемого привода.

Ключевые слова: штанговый глубинный насос, нефтяная скважина, электропривод, асинхронный электродвигатель, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, энергоэффективность, ваттметрограмма, циклическая нагрузка, сбалансированность привода.

OPERATING MODE ANALYSIS OF THE OILWELLS SUCKER ROD PUMP UNITS DRIVES

This article is about modes of operation of electric drives of downhole sucker rod pumps. Downhole oil production processes are very energy intensive. Oil fields contain a lot of oil wells, many of them operate in inefficient modes with significant additional losses.

Sucker rod pump units electric drives operate in harsh conditions for several reasons. Electric motors are selected with large power margin. Load is unstable and has a cyclic behavior. This leads to motor performance variations, including changes in the efficiency and $\cos \varphi$.

Authors study changes of efficiency and $\cos \varphi$ of the sucker rod pump unit motor. Using this information authors estimate drive efficiency.

Authors analyzed wattmeter charts of pump unit drives and graphs of efficiency and $\cos \varphi$.

Studies showed that variations of load could cause $\cos \varphi$ and efficiency significant changes — 0.1 to 0.9 and 0.08 to 0.8, respectively. Thus average values of these parameters are quite low. This causes significant energy loss and adversely affects operation of a motor and the mains.

Authors propose technical solutions to improve energy performance of a pump unit drives: counterweight balancing, reducing of electric motor power, replacing induction motors with permanent magnet motors, replacing balancer drives with chain drives, using of variable frequency drives.

Key words: sucker rod pump, oil well, electric drive, induction motor, efficiency, power factor, energy efficiency, wattmeter card, cycling load, drive balance.

Добыча углеводородного сырья является одной из важнейших отраслей промышленности в структуре экономики России. Данная отрасль обеспечивает значительную часть валютных поступлений в экономику страны, однако является также одной из самых энергозатратных: так, до 5 % всей вырабатываемой в стране электроэнергии потребляется нефтедобывающими предприятиями [1–3].

Следует отметить, что среди всех технологических процессов нефтедобычи самым энергоемким является скважинная механизированная добыча. Это объясняется тем, что хотя электроприводы скважинных насосов имеют небольшую мощность, количество скважин велико, они рассредоточены на больших расстояниях, многие из них работают в неэффективных режимах со значительными дополнительными потерями [4, 5].

Схема установки скважинного штангового глубинного насоса (ШГН) приведена на рисунке 1. Установка состоит из станции управления 1, электродвигателя (ЭД) 2, редуктора 3, кривошипно-шатунного механизма 4, балансира 5, колонны штанг 6 и глубинного насоса 7.

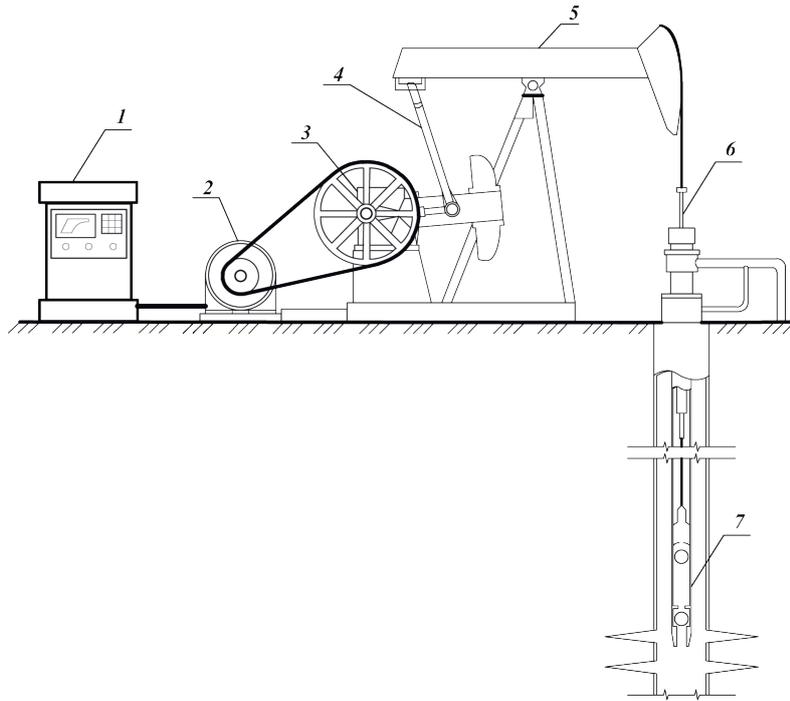
Для привода установок ШГН обычно используются асинхронные трехфазные ЭД напряжением 0,4 кВ с повышенным пусковым моментом благодаря выполнению корот-

козамкнутой обмотки с глубокими пазами или двойной беличьей клеткой, с синхронной частотой вращения 500-1500 об./мин. Мощность приводных ЭД составляет от 7,5 до 55 кВт, но наиболее широко используются ЭД мощностью 22 и 30 кВт [6–8].

Несмотря на то что установки ШГН обеспечивают при эксплуатации скважин наиболее низкие значения удельного потребления электроэнергии по сравнению с другими типами погружных насосов, их электроприводы работают в тяжелых режимах [9-11]. Это обусловлено следующими факторами:

- из-за необходимости обеспечения большого пускового момента ЭД выбираются с запасом мощности, из-за чего после пуска они работают в недогруженном режиме [12];
- нагрузка ЭД является непостоянной, имеет циклический характер (рисунок 2) [13–15].

Циклический характер нагрузки обусловлен принципом действия и кинематической схемой установки ШГН — в первую половину периода происходит подъем колонны штанг вместе со скважинной жидкостью, во вторую половину — спуск колонны одновременно с подъемом вверх противовесов системы уравновешивания. Во время подъема противовесов запасается потенциальная



1 — станция управления; 2 — электродвигатель; 3 — редуктор; 4 — кривошипно-шатунный механизм; 5 — балансир; 6 — колонна штанг; 7 — глубинный насос

Рисунок 1. Схема установки скважинного штангового глубинного насоса

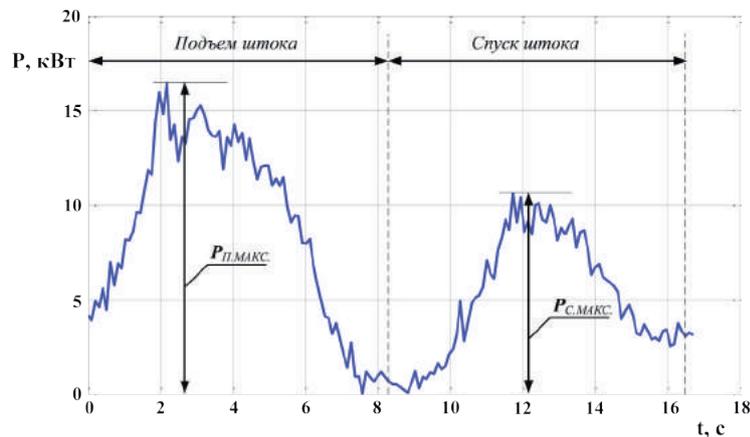


Рисунок 2. График нагрузки ЭД установки ШГН за цикл качания

энергия, которая помогает в следующем цикле качания подъему жидкости [16].

При идеальном уравнивании установки ШГН пиковые значения потребляемой из сети мощности в первую ($P_{П.МАКС.}$) и вторую ($P_{С.МАКС.}$) половины периода будут совпадать, но график нагрузки все равно не будет равномерным. На практике до 90-95 % установок ШГН уравновешены неудовлетворительно [17, 18].

Непостоянство нагрузки внутри каждого цикла качания приводит к изменениям всех характеристик ЭД, в том числе к изменению КПД и коэффициента мощности $\cos \varphi$.

В статье решается задача оценки режима работы электропривода на основе исследования изменения КПД и коэффициента мощности $\cos \varphi$ приводного ЭД установки ШГН внутри цикла качания.

Для оценки влияния нагрузки на значения КПД и коэффициента мощности $\cos \varphi$ были использованы типовые для асинхронных ЭД зависимости этих параметров (таблица 1) от коэффициента загрузки β :

$$\beta = \frac{P}{P_{НОМ.} / \eta_{НОМ.}}, \quad (1)$$

где P — значение потребляемой мощности в анализируемый момент времени; $P_{НОМ.}$ —

номинальная мощность ЭД; $\eta_{НОМ.}$ — номинальный КПД ЭД.

Расчеты выполнялись для оцифрованных ваттметрограмм (графиков изменения мощности за цикл качания) двух установок ШГН. В обоих случаях были установлены ЭД с номинальной мощностью $P_{НОМ.} = 30$ кВт.

Полученные графики изменения мощности, КПД и коэффициента мощности $\cos \varphi$ за цикл качания для установок ШГН № 1 и 2 представлены на рисунках 3 и 4.

Как видно из графиков для установки ШГН № 1 (рисунок 3), ЭД установки сильно недогружен — среднее значение мощности составляет всего 6,97 кВт, а максимальное — 15,56 кВт. При этом минимальное значение мощности опускается практически до нуля. Неравенство пиковых значений нагрузки при подъеме и спуске колонны штанг свидетельствует о недостаточной сбалансированности установки.

В течение одного цикла качания КПД ЭД меняется от 0,11 до 0,90, среднее значение за цикл составляет 0,75. Коэффициент мощности $\cos \varphi$ за цикл качания меняется от 0,08 до 0,81, среднее значение — 0,49.

Из ваттметрограммы установки ШГН № 2 (рисунок 4) очевидно, что установка несбалансирована — первый пик нагрузки полностью отсутствует. Это означает, что масса противовесов слишком велика, энергия ЭД тратится только на подъем уравнивающих грузов во вторую половину цикла качания, а подъем скважинной жидкости полностью происходит за счет накопленной в них потенциальной энергии.

Потребляемая мощность изменяется от 1,61 до 6,92 кВт, среднее значение мощности составляет 3,52 кВт, что свидетельствует о чрезвычайно низкой нагрузке ЭД.

КПД ЭД изменяется от 0,57 до 0,83, среднее значение за цикл качания составляет 0,70. Коэффициент мощности $\cos \varphi$ за цикл качания меняется от 0,21 до 0,53, среднее значение — 0,34.

Таким образом, обе установки ШГН в недостаточной степени уравновешены, их ЭД недогружены, в результате чего КПД и коэффициент мощности $\cos \varphi$ имеют пониженные значения. Значительное изменение этих параметров внутри каждого цикла качания отрицательно влияет и на работу ЭД, и сети.

Таблица 1. Типовые зависимости КПД и $\cos \varphi$ от коэффициента загрузки β для асинхронных ЭД

β	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,5
КПД	0	0,70	0,82	0,87	0,89	0,90	0,91	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,85
$\cos \varphi$	0,07	0,31	0,50	0,62	0,73	0,80	0,84	0,86	0,87	0,89	0,89	0,88	0,87

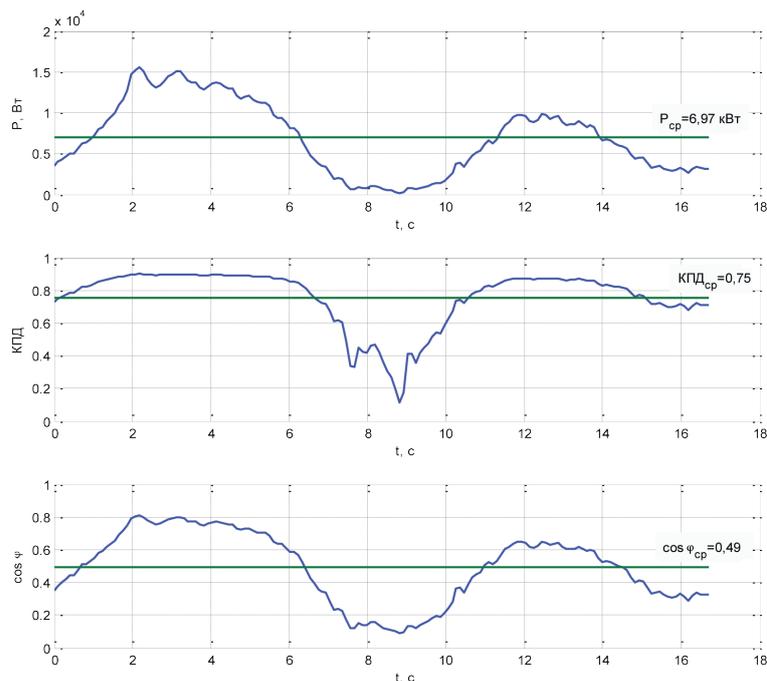


Рисунок 3. Графики изменения мощности, КПД и $\cos \varphi$ за цикл качания установки ШГН № 1

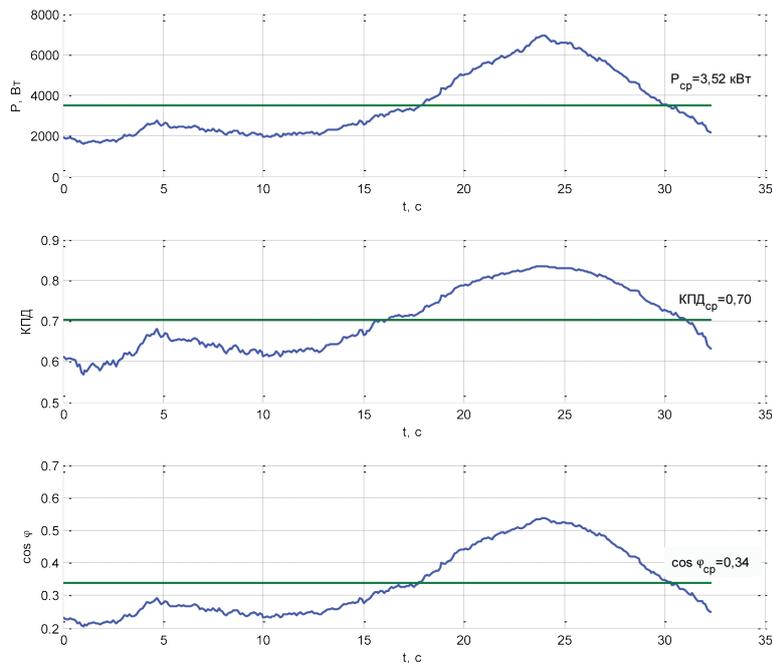


Рисунок 4. Графики изменения мощности, КПД и $\cos \varphi$ за цикл качания установки ШГН № 2

Для улучшения энергетических характеристик электроприводов данных установок требуется произвести их уравнивание, а также целесообразно установить ЭД меньшей мощности (при этом требуется проверка по условиям пуска, особенно в зимних условиях). С этой точки зрения перспективным направлением является использование для приводов установок ШГН вентильных двигателей, обладающих высокой перегрузочной способностью, что позволит повысить загрузку ЭД, а также более высокими значениями КПД по сравнению с асинхронными ЭД [16, 17].

Следует отметить, что большей стабильностью параметров внутри цикла качания обладают установки ШГН с цепными приводами, поэтому на многих месторождениях их устанавливают взамен балансирных приводов с целью повышения энергетической эффективности процессов добычи [21].

Одним из направлений повышения эффективности ШГН является использование частотно-регулируемого электропривода, что позволяет не только привести производительность насоса в соответствие с нефтеотдачей скважины, но также регулировать скорость вращения ЭД внутри цикла качания, обеспечивая более равномерное перемещение плунжера и выравнивание графика нагрузки ЭД [19].

Выводы

1. Основной причиной сравнительно невысокой эффективности электроприводов установок ШГН является низкая загрузка электродвигателей и недостаточная сбалансированность противовесов.

2. Непостоянство нагрузки внутри каждого цикла качания приводит к изменениям всех характеристик ЭД, в том числе к изменению КПД и коэффициента мощности $\cos \varphi$, которые могут изменяться в широких пределах, при этом средние значения за цикл, как правило, очень низки. Значительное изменение этих параметров внутри каждого цикла качания отрицательно влияет и на работу ЭД и на сеть.

3. Для улучшения энергетических характеристик электроприводов установок ШГН необходимо точное уравнивание противовесов, а также снижение мощности электродвигателей. Кроме того, во многих случаях целесообразна замена балансирных приводов на цепные, которые обеспечивают более высокую стабильность параметров внутри цикла качания.

4. Перспективным направлением является использование для приводов установок ШГН вентильных двигателей, обладающих более высокими значениями КПД по сравнению с асинхронными ЭД и высокой перегрузочной способностью, что позволит повысить загрузку электродвигателей при меньшей установленной мощности.

Работа выполнена в рамках проекта 8.1277.2017/ПЧ «Исследования, разработка и внедрение перспективных электромехани-

ческих преобразователей для автономных объектов с гибридной силовой установкой».

Список литературы

1. Ивановский В.Н. Энергетика добычи нефти: основные направления оптимизации энергопотребления // Инженерная практика. 2011. № 6. С. 18–26.

2. Хакимьянов М.И., Ковшов В.Д., Чикишев А.М., Максимов Н.С., Почуев А.И. Контроллеры автоматизации установок штанговых глубинных насосов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2007. № 1. С. 44–56. URL: http://ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_3.pdf.

3. Хакимьянов М.И., Пачин М.Г. Функциональные возможности современного контроллера автоматизации штанговых глубиннонасосных установок // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 2. С. 19–34. URL: http://ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_5.pdf.

4. Хакимьянов М.И. Системы управления электроприводами скважинных насосов: монография. Уфа: РИЦ УГНТУ, 2014. 114 с.

5. Бубнов М.В., Зюзев А.М. Средства диагностики оборудования установок штанговых глубинных насосов // Тр. Первой науч.-техн. конф. молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2016. С. 175–178.

6. Хакимьянов М.И., Светлакова С.В., Гузев Б.В., Соловьев Я.Ю., Музалев И.В. Сравнительный анализ возможностей отечественных и импортных систем автоматизации скважин, эксплуатируемых ШГН // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2008. № 2. С. 16–26. URL: http://ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_4.pdf.

7. Хакимьянов М.И., Пачин М.Г. Методика обработки динамограмм в информационно-измерительных системах управления штанговыми глубинными насосами // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16. № 6 (51). С. 32–36.

8. Логинов С.Е., Сальнов А.С., Тубис Я.Б. Электроприводы для насосов, применяемых в

нефтедобывающей промышленности // Электротехника. 2001. № 4. С. 41–43.

9. Хакимьянов М.И. Удельный расход электроэнергии при механизированной добыче нефти штанговыми глубинно-насосными установками // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2014. Т. 18. № 1 (62). С. 124–130.

10. Хакимьянов М.И., Сираев Р.М., Крылов А.О. Исследование влияния на энергопотребление скважинных насосов технологических и эксплуатационных параметров // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. Т. 11. № 1. С. 15–20.

11. Тимофеев А.О., Ясовеев В.Х. Анализ корреляции между скважинной динамограммой и энергией, потребляемой электродвигателем станка-качалки // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12. № 2. С. 85–89.

12. Зюзев А.М., Метельков В.П. Оценка теплового ресурса электродвигателя штанговой глубинной насосной установки // Научные труды SWorld. 2012. Т. 5. № 2. С. 59–62.

13. Хакимьянов М.И., Пачин М.Г. Анализ динамограмм в контроллерах систем автоматизации штанговых глубинно-насосных установок // Датчики и системы. 2011. № 9. С. 38–40.

14. Садов В.Б. Оценка параметров нефтедобычи и управление насосной установкой с использованием динамограмм // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2013. Т. 13. № 2. С. 33–41.

15. Садов В.Б. К вопросу автоматического управления приводом глубинного штангового насоса // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2013. Т. 13. № 3. С. 46–53.

16. Хакимьянов М.И. Оптимизация режимов работы электроприводов в нефтедобывающей промышленности: монография. Уфа: РИЦ УГНТУ, 2013. 77 с.

17. Хакимьянов М.И., Пачин М.Г. Мониторинг состояния штанговых глубинно-насосных установок по результатам анализа ваттметрограмм // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 5. С. 26–36. URL: http://ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_7.pdf.

18. Хакимьянов М.И. Повышение энергетической эффективности скважинных насосов механизированной добычи нефти // Энергетик. 2016. № 5. С. 36–38.

19. Пачин М.Г., Лоскутников В.А. Результаты испытаний станции управления АО «ПНППК» для вентильных электродвигателей станков-качалок // Территория Нефтегаз. 2016. № 6. С. 78–84.

20. Артыкаева Э.М. Разработка решений по повышению эффективности нефтедобывающих штанговых насосных установок с применением вентильных электродвигателей // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. 2014. Т. 12. № 1. С. 274–281.

21. Тахаутдинов Ш.Ф., Ибрагимов Н.Г., Ахметвалиев Р.Н., Валовский В.М., Шамсутдинов И.Г., Валовский К.В., Федосеенко Н.В. Результаты и перспективы применения цепных приводов скважинных штанговых насосов в ОАО «Татнефть» // Нефтяное хозяйство. 2006. № 3. С. 68–71.

22. Хакимьянов М.И., Гузеев Б.В. Анализ использования частотно-регулируемого электропривода в нефтегазовой промышленности по результатам патентного поиска // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 4. С. 30–41. URL: http://ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_6.pdf.

References

1. Ivanovskiy V.N. Energetika dobychi nefiti: osnovnyye napravleniya optimizatsii energopotreblyeniya [Energy oil: main areas of energy optimization]. Inzhenernaya praktika. 2011, no. 6, pp. 18–26.

2. Khakimyanov M.I., Kovshov V.D., Chikishev A.M., Maksimov N.S., Pochuyev A.I. Kontrollery avtomatizatsii ustanovok shtangovykh glubinnnykh nasosov [Controllers for automation of sucker rod pump units]. Oil and Gas Business: electronic scientific journal. 2007,

no. 1, pp. 44–56. URL: http://ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_3.pdf.

3. Khakimyanov M.I., Pachin M.G. Funktsional'nyye vozmozhnosti sovremennogo kontrollera avtomatizatsii shtangovykh glubinnonasosnykh ustanovok [The functionality of modern automation controller of downhole sucker rod pump unit]. Oil and Gas Business: electronic scientific journal. 2011, no. 2, pp. 19–34. URL: http://ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_5.pdf.

4. Khakimyanov M.I. Sistemy upravleniya elektroprivodami skvazhinnykh nasosov [Control systems for electric drive of oil well pumps]: monograph. Ufa: USPTU, 2014. 114 p.

5. Bubnov M.V., Zyuzev A.M. Sredstva diagnostirovaniya oborudovaniya ustanovok shtangovykh glubinnnykh nasosov [Equipment diagnosis means sucker rod pumps]. Proceedings of the first scientific and technical conference of young scientists of the Ural Energy Institute. Ekaterinburg: Ural Federal University, 2016, pp. 175–178.

6. Khakimyanov M.I., Svetlakova S.V., Guzeev B.V., Solovyev Ya.Yu., Muzalev I.V. Sravnitel'nyy analiz vozmozhnostey otechestvennykh i importnykh sistem avtomatizatsii skvazhin, ekspluatiruyemykh SHGN [Comparative analysis of the possibilities of domestic and imported wells automation systems operated by SRP]. Oil and Gas Business: electronic scientific journal. 2008, no. 2, pp. 16–26. URL: http://ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_4.pdf.

7. Khakimyanov M.I., Pachin M.G. Metodika obrabotki dinamogramm v informatsionno-izmeritel'nykh sistemakh upravleniya shtangovymi glubinnymi nasosami [Methods of processing of the dynamometer cards in information and measuring systems of sucker rod pump control]. Vestnik UGATU. 2012, vol. 16, no. 6 (51), pp. 32–36.

8. Loginov S.Ye., Sal'nov A.S., Tubis Ya.B. Elektroprivody dlya nasosov, primenyayemykh v nefte dobyvayushchey promyshlennosti [Electric drives for pumps used in the petroleum industry]. Elektrotehnika. 2001, no. 4, pp. 41–43.

9. Khakimyanov M.I. Udel'nyy raskhod elektroenergii pri mekhanizirovannoy dobyche nefiti shtangovymi glubinnonasosnymi ustanovkami [Energy intensity in artificial lift of sucker rod pumping units]. Vestnik UGATU. 2014, vol. 18, no. 1 (62), pp. 124–130.

10. Khakimyanov M.I., Siraev R.M., Krylov A.O. Issledovaniye vliyaniya na energopotrebleniye skvazhinnykh nasosov tekhnologicheskikh i ekspluatatsionnykh parametrov [Research of influence energy consumption for well pumps technological and operational parameters]. *Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i systemy*. 2015, vol. 11, no. 1, pp. 15–20.
11. Timofeev A.O., Yasoveev V.Kh. Analiz korrelyatsii mezhdru skvazhinnoy dinamogrammy i energiyey, potrebyayemoy elektrodvigatelem stanka-kachalki [An analysis of the correlation between the downhole dynamometer card and the energy consumed by the motor of the pumping unit]. *Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i systemy*. 2016, vol. 12, no. 2, pp. 85–89.
12. Zyuzev A.M., Metel'kov V.P. Otsenka teplovogo resursa elektrodvigatelya shtangovoy glubinnoy nasosnoy ustanovki [Evaluation of the thermal motor resource sucker rod pumping unit]. *Proceedings SWorld*. 2012, vol. 5, no. 2, pp. 59–62.
13. Khakimyanov M.I., Pachin M.G. Analiz dinamogramm v kontrollerakh sistem avtomatizatsii shtangovykh glubinnonasosnykh ustanovok [Analysis of dynamometer cards in controllers of sucker rod pump unit automation systems]. *Datchiki i sistemy*. 2011, no. 9, pp. 38–40.
14. Sadv V.B. Otsenka parametrov nefte dobychi i upravleniye nasosnoy ustanovkoy s ispol'zovaniyem dinamogramm [Parameter estimation of an oil extracting and pump installation control with use of dynamometer cards]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika*. 2013, vol. 13, no. 2, pp. 33–41.
15. Sadv V.B. K voprosu avtomaticheskogo upravleniya privodom glubinnogo shtangovogo nasosa [On the question of sucker rod pumps automatic drive control]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika*. 2013, vol. 13, no. 3, pp. 46–53.
16. Khakimyanov M.I. Optimizatsiya rezhimov raboty elektropriwodov v nefte dobyvayushchey promyshlennosti [Optimization drive mode in the oil industry]: monograph. Ufa: USPTU, 2013. 77 p.
17. Khakimyanov M.I., Pachin M.G. Monitoring sostoyaniya shtangovykh glubinnonasosnykh ustanovok po rezul'tatam analiza vattmetrogramm [Monitoring of the state of sucker rod pump units as a result of the analysis wattmeter cards]. *Oil and Gas Business: electronic scientific journal*. 2011, no. 5, pp. 26–36. URL: http://ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_7.pdf.
18. Khakimyanov M.I. Povysheniye energeticheskoy effektivnosti skvazhinnykh nasosov mekhanizirovannoy dobychi nefi [Increasing the energy efficiency downhole pump of artificial lift]. *Energetik*. 2016, no. 5, pp. 36–38.
19. Pachin M.G., Loskutnikov V.A. Rezul'taty ispytaniy stantsii upravleniya AO «PNPPK» dlya ventil'nykh elektrodvigatelye stankov-kachalok [Test results of the control station of JSC «PNPPK» for permanent magnet motors of pumping units]. *Territoriya Neftegaz*. 2016, no. 6, pp. 78–84.
20. Artykayeva E.M. Razrabotka resheniy po povysheniyu effektivnosti nefte dobyvayushchikh shtangovykh nasosnykh ustanovok s primeneniye ventil'nykh elektrodvigatelye [Development of solutions to improve the efficiency of oil-producing sucker rod pumping units with permanent magnet motors]. *Uchenyye zapiski Al'met'yevskogo gosudarstvennogo neftyanogo instituta*. 2014, vol. 12, no. 1, pp. 274–281.
21. Takhautdinov Sh.F., Ibragimov N.G., Akhmetvaliyev R.N., Valovskiy V.M., Shamsutdinov I.G., Valovskiy K.V., Fedoseyenko N.V. Rezul'taty i perspektivy primeneniya tsepnykh privodov kvazhinnykh shtangovykh nasosov v OAO «Tatneft» [Results and prospects of chain drives application of sucker rod pumps in OJSC «Tatneft»]. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2006, no. 3, pp. 68–71.
22. Khakimyanov M.I., Guzeyev B.V. Analiz ispol'zovaniya chastotno-reguliruyemogo elektropriroda v nefte gazovoy promyshlennosti po rezul'tatam patentnogo poiska [Analysis of the use of variable frequency drive in the oil and gas industry as a result of a patent search]. *Oil and Gas Business: electronic scientific journal*. 2011, no. 4, pp. 30–41. URL: http://ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_6.pdf.



Шapiro С. В.
Shapiro S. V.

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры медицинской
физики, ФГБОУ ВО «Башкирский
государственный медицинский
университет»,
г. Уфа, Российская Федерация



Горбунов А. С.
Gorbunov A. S.

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



Насыров Р. А.
Nasyrov R. A.

магистрант кафедры
«Электромеханика», ФГБОУ
ВО «Уфимский государственный
авиационный технический
университет»,
г. Уфа, Российская Федерация



Сафаргалин Ф. С.
Safargalin F. S.

магистрант кафедры
«Электромеханика», ФГБОУ
ВО «Уфимский государственный
авиационный технический
университет»,
г. Уфа, Российская Федерация

УДК 621.313

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННО-АСИНХРОННОГО КАСКАДНОГО ГЕНЕРАТОРА В MATLAB

Приводятся описание и результаты исследования компьютерной модели (в пакете MATLAB) синхронно-асинхронного каскадного генератора. Для определённости выбран восьмиступенчатый каскадный генератор с числом оборотов вала 187,5 об./мин и выходной частотой 50 Гц. При этом учитывается, что тихоходные генераторы выгоднее делать каскадными, а не многополюсными; это достаточно подробно обосновано в литературе. Модель первой ступени каскада синхронного генератора с выходной частотой 6,25 Гц в MATLAB выполняется двухфазной. Точно также в виде двухфазной модели в MATLAB описывается асинхронный преобразователь частоты (асинхронная машина в режиме тормоза). В статье даются схемы замещения как синхронного генератора (1 ступени каскада), так и асинхронного преобразователя (остальных 7 ступеней каскада). При исследовании каскада учитывалось, что в пакете MATLAB нет программы по синхронизации скоростей вращения ротора разных машин. Кроме этого, промышленная сеть практически бесконечной мощности, на которую работает каскадный генератор, в MATLAB отсутствует, поэтому при разработке модели сеть была заменена синхронной машиной мощностью 1320 кВт. В результате исследова-

дования модели было установлено, что первую ступень каскада (обращенный синхронный генератор) необходимо выполнить с расчетной мощностью в два раза больше, чем расчетная мощность всех остальных ступеней.

Ключевые слова: трехфазный генератор переменного тока, моделирование синхронно-асинхронного каскадного генератора.

MODELING OF CASCADED SYNCHRONOUS-ASYNCHRONOUS GENERATOR

Provides a description and the results of the study of computer model (in package MATLAB) synchronous-asynchronous cascade generator. For definiteness selected eight steps cascade generator with 187.5 shaft speed rpm and the output frequency 50 Hz. Taking into account that slow the generators profitable do cascade and not multiline; this reasonably sufficient detail in the literature of the first stage of the cascade model of synchronous generator with an output frequency of 6.25 Hz MATLAB performs a two-phase. Likewise, in the form of a two-phase models in MATLAB describes asynchronous frequency converter (asynchronous machine in brake mode). The article gives the equivalent circuit as synchronous generator (of the first step of the cascade) and asynchronous converter (the rest of the 7 steps of the cascade). In the study took into account the cascade that there is no program to synchronize different rotor speeds cars. In addition, the industrial network of almost infinite power which operates cascade generator in MATLAB, so when designing a model, this network was replaced by synchronous machine capacity 1320 kVt. As a result of the research of the model, it was found that the first stage of the cascade (the call synchronous generator) with TDP twice more, than all other TDP levels.

Key words: three phase AC generator, modeling of cascaded synchronous-asynchronous generator.

В научных источниках [1–3] показано, что тихоходные генераторы электрического тока могут с успехом быть заменены: вместо многополюсных синхронных машин можно применять каскадные синхронно-асинхронные. При этом расход активных материалов (обмоточного провода и электротехнической стали) и потери каскадного генератора оказываются практически такими же, как у многополюсной машины.

В то же время каскадный генератор обладает целым рядом преимуществ перед многополюсным:

1) статоры промежуточных ступеней каскада можно выполнить с встречным вращением (т.е. вращающимися навстречу вращению ротора), что позволяет существенно уменьшить расход активных материалов [4];

2) обмотки роторов ступеней каскада можно выполнять короткозамкнутыми, практически такими же, как у асинхронных двигателей [5];

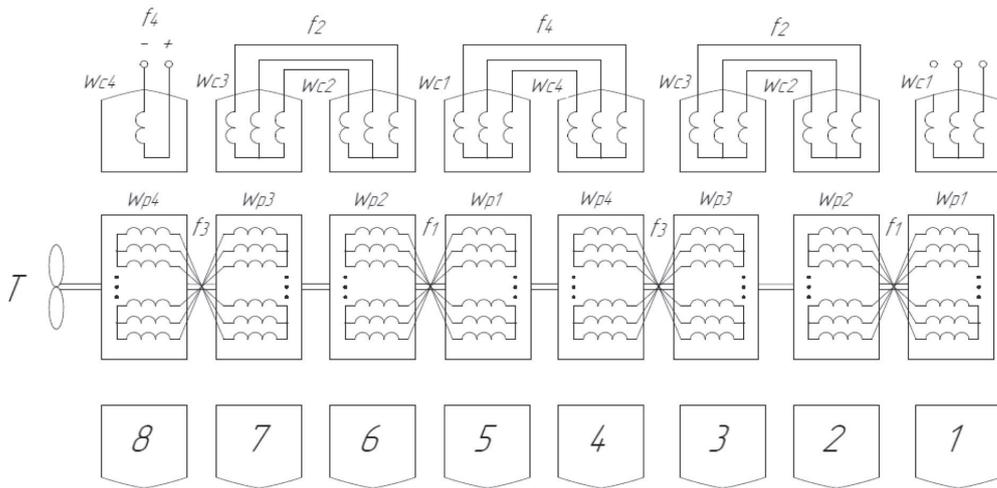
3) встречное вращение статоров промежуточных ступеней каскада можно использовать для регулирования частоты генератора, а также для создания комбинированных систем привода, в частности, в ветродизельных электростанциях.

Для всестороннего изучения статических и динамических процессов в каскадных генераторах целесообразно воспользоваться компьютерными моделями электрических машин, имеющимися в программе MATLAB. Для определённости на кафедре электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета выбран каскадный генератор с выходной частотой 50 Гц и скоростью вращения ротора 187,5 об./мин. Этот генератор состоит из обращённого синхронного четырехполюсного генератора и семи четырехполюсных асинхронных преобразователей (рисунок 1).

1. Описание схемы

Синхронно-асинхронный генератор представляет собой каскад из 8 электромашинных агрегатов практически одинаковых габаритов, расположенных на одном валу. Этот вал приводится в движение гидро- или ветротурбиной.

Последовательность фаз многофазной обмотки ротора агрегата 7, обратная по отношению к последовательности фаз обмотки ротора агрегата 8. Благодаря этому магнитное



1–7 — асинхронный преобразователь; 8 — синхронный генератор; Т — гидро- или ветротурбина; $w_{(p1...8)}$ — роторные обмотки; $w_{(c1...8)}$ — статорные обмотки

Рисунок 1. Схема каскадного синхронно-асинхронного генератора

поле ротора агрегата 7 вращается в ту же сторону, что и сам ротор. Наведенная в трёхфазной обмотке статора седьмой ступени ЭДС подается на входные клеммы статорной обмотки агрегата 6. При этом вновь последовательность фаз меняется на противоположную. Поэтому магнитное поле, создаваемое обмоткой статора, вращается в направлении, противоположном направлению вращения ротора агрегата 6. Благодаря этому в роторной обмотке ступени 6 каскада увеличивается частота наводимой ЭДС и вырабатывается мощность.

Далее на остальных ступенях каскада процесс повторяет либо то, что происходит на агрегате 7 (ступени с нечетными номерами — 5, 3, 1), либо то, что происходит в агрегате 6 (с четными номерами — 4, 2).

Статорная обмотка ступени каскада с номером 1 является одновременно выходной обмоткой генератора, подключенной к нагрузке или промышленной сети.

2. Компьютерная модель восьмиступенчатого каскадного генератора

Первая проблема, с которой мы столкнулись при моделировании каскадного генератора в пакете *MATLAB* [6], заключалась в том, что обрешенной синхронной машины в этом пакете нет. Пришлось использовать модель обычной синхронной машины с трёхфазной якорной обмоткой (рисунок 2).

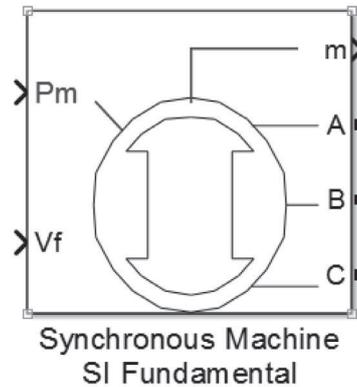


Рисунок 2. Пиктограмма синхронной машины

В блоке *Synchronous Machine SI Fundamental* параметры машины задаются в системе относительных единиц. Схема замещения синхронной машины в системе координат, связанной с ротором ($q-d$ оси), использованная при создании модели, показана на рисунке 3.

Все параметры ротора и его переменные приведены к статору. Индексы переменных и параметров обозначают следующее: d, q — проекции переменных на оси d и q ; R, s — параметры ротора и статора; L, m — параметры индуктивности рассеяния и цепи намагничивания, f, k — переменные цепи возбуждения и демпферной обмотки.

Приведенные на рисунке 3 схемы замещения описываются системой дифференциальных уравнений [7];

$$\begin{aligned}
 u_d &= R_s \cdot i_d + \frac{\partial}{\partial t} \varphi_d - \omega_R \cdot \varphi_q & \varphi_d &= L_d \cdot i_d + L_{md} \cdot (i'_{fd} + i'_{kd}) \\
 u_q &= R_s \cdot i_q + \frac{\partial}{\partial t} \varphi_q - \omega_R \cdot \varphi_d & \varphi_q &= L_q \cdot i_q + L_{mq} \cdot i'_{kq} \\
 u'_{fd} &= R'_{fd} \cdot i'_{fd} + \frac{\partial}{\partial t} \varphi'_{fd} & \varphi'_{fd} &= L'_{fd} \cdot i'_{fd} + L_{md} \cdot (i_d + i'_{kd}) \\
 u'_{kd} &= R'_{kd} \cdot i'_{kd} + \frac{\partial}{\partial t} \varphi'_{kd} & \varphi'_{kd} &= L'_{kd} \cdot i'_{kd} + L_{md} \cdot (i_d + i'_{fd}) \\
 u'_{kq1} &= R'_{kq1} \cdot i'_{kq1} + \frac{\partial}{\partial t} \varphi'_{kq1} & \varphi'_{kq1} &= L'_{kq1} \cdot i'_{kq1} + L_{mq} \cdot i_q \\
 u'_{kq2} &= R'_{kq2} \cdot i'_{kq2} + \frac{\partial}{\partial t} \varphi'_{kq2} & \varphi'_{kq2} &= L'_{kq2} \cdot i'_{kq2} + L_{mq} \cdot i_q
 \end{aligned}$$

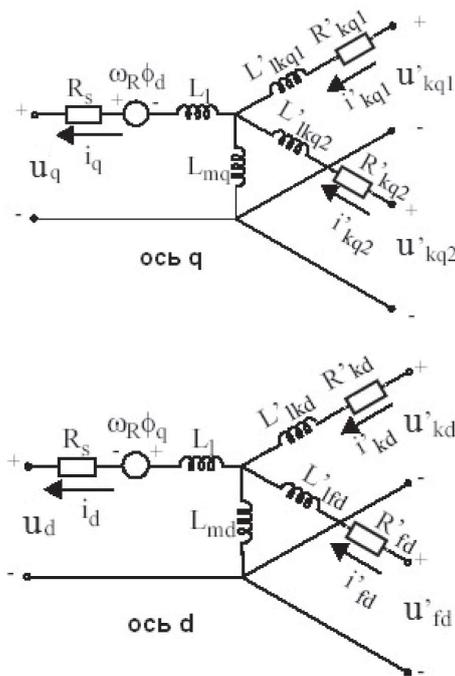


Рисунок 3. Схема замещения синхронной машины в системе координат, связанной с ротором

На рисунке 4 приведена пиктограмма асинхронного преобразователя.

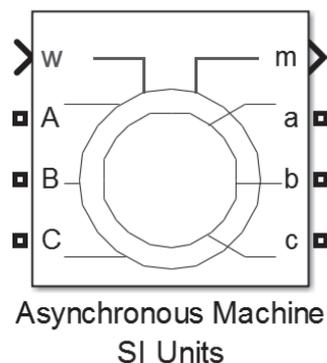


Рисунок 4. Пиктограмма асинхронной машины

Все электрические переменные и параметры преобразователя приведены к статору. Исходные уравнения электрической части машины записаны для двухфазной (dq —

оси) системы координат. На рисунке 5 приведена схема замещения машины. Индексы переменных и параметров обозначают следующее: d, q — проекции переменных на оси d и q ; r и s — индексы, обозначающие параметры или переменные ротора и статора; L_s — индуктивность рассеяния; L_m — индуктивность цепи намагничивания.

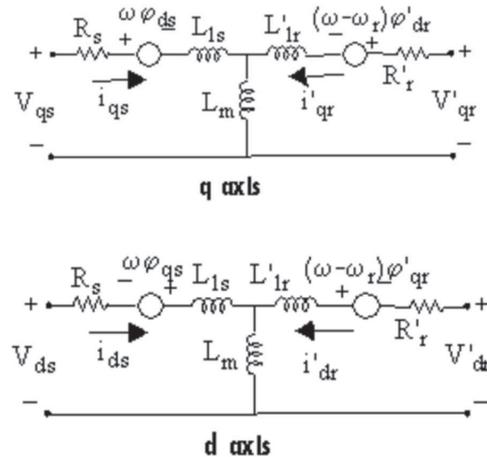


Рисунок 5. Схема замещения асинхронной машины

$$\begin{aligned}
 u_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + \frac{\partial}{\partial t} \varphi_{qs} + \omega \cdot \varphi_{ds} & \varphi_{ds} &= L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i'_{dr} \\
 u_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} + \frac{\partial}{\partial t} \varphi_{ds} - \omega \cdot \varphi_{qs} & \varphi_{qs} &= L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{qr} \\
 u'_{qr} &= R'_r \cdot i'_{qr} + \frac{\partial}{\partial t} \varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \cdot \varphi'_{dr} & \varphi'_{dr} &= L'_r \cdot i'_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \\
 u'_{dr} &= R'_r \cdot i'_{dr} + \frac{\partial}{\partial t} \varphi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \cdot \varphi'_{qr} & \varphi'_{qr} &= L'_r \cdot i'_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \\
 T_e &= 1,5 \cdot p \cdot (\varphi_{ds} \cdot i_{qs} - \varphi_{qs} \cdot i_{ds}) \\
 L_s &= L_{ls} + L_m \\
 L'_r &= L'_{lr} + L_m
 \end{aligned}$$

Механическая часть машины описывается двумя уравнениями:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} \theta_m &= \frac{1}{2 \cdot H} \cdot (T_e - F \cdot \omega_m - T_m), \\
 \frac{\partial}{\partial t} \theta_m &= \omega_m,
 \end{aligned}$$

На рисунке 6 дана полная схема модели восьмиступенчатого каскадного генератора в пакете *MATLAB*.

Первый из агрегатов *Synchronous Machine SI* — явнополюсный синхронный генератор с числом пар полюсов $p=2$, частотой $f=50$ Гц, частота вращения $n=187$ об./мин ($\omega=19,63$ рад/с). Обмотка возбуждения, на вход которого подается постоянное напряжение 19,3 В, расположена на роторе. Входные

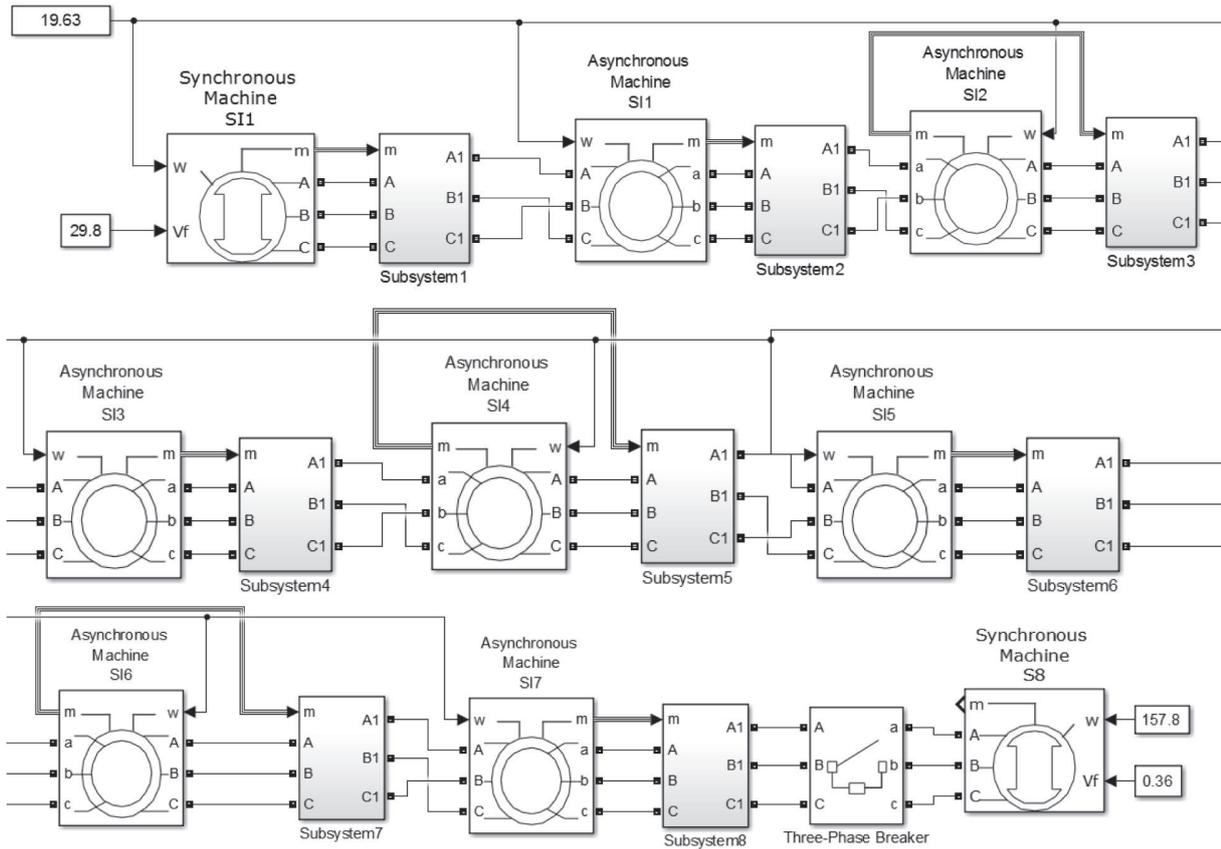


Рисунок 6. Математическая модель синхронно-асинхронного каскада

концы обмотки статора подключаются к следующему агрегату 2. Второй агрегат *Asynchronous Machine SI* — асинхронный преобразователь частоты с фазным ротором, с числом пар полюсов $p = 2$, частотой $f = 50$ Гц, частота вращения $n = 187$ об./мин ($\omega = 19,63$ рад/с). В качестве нагрузки вместо сети бесконечной мощности установлена синхронная машина мощностью в несколько тысяч кВА, т.е. на 3–4 порядка больше мощности нашего генератора. Мы вынуждены были сделать это, так как в *MATLAB*е не было модели сети бесконечной мощности. Кроме того, необходимо учесть, что обмотки статора и ротора асинхронного преобразователя в пакете *MATLAB* выполнены одинаковыми, т.е. с одинаковыми числом витков и обмоточным коэффициентом.

Измерительная часть модели осуществляется блоком-подсистемой *Subsystem* (рисунок 7). Блоки *Subsystem 1, ..., Subsystem 7* идентичны друг другу. В блоках *Subsystem* измеряются линейные выходные напряжения агрегатов между фазами с помощью блока *Voltage Measurement*, затем выводятся на осциллограф *Scope 2*. Резисторы R1 и R2

служат в качестве шунта, так как в программе *MATLAB Simulink* блоки *Synchronous Machine SI*, *Asynchronous Machine SI* и последующие электрические машины моделируются как источник тока.

3. Исследование каскадного генератора с помощью компьютерной модели

На рисунке 8 даны осциллограммы линейных выходных напряжений всех ступеней каскадного генератора, полученные на модели, представленной на рисунке 6.

Исходя из [1], частота f_k , напряжение U_{mk} , где k — номер ступени каскада, должны расти согласно формулам:

$$f_k = \frac{50 \cdot (9 - k)}{8}; \quad U_{mk} = 400 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot (9 - k)}{8}. \quad (1)$$

Если формула для определения f_k выполняется в модели практически точно, то для определения U_{mk} формула справедлива только, если пренебречь падением напряжения на активных сопротивлениях обмоток ротора и статора и их индуктивных сопротивлениях рассеяния (рисунки 3 и 5), а также индуктивных сопротивлениях продольной и

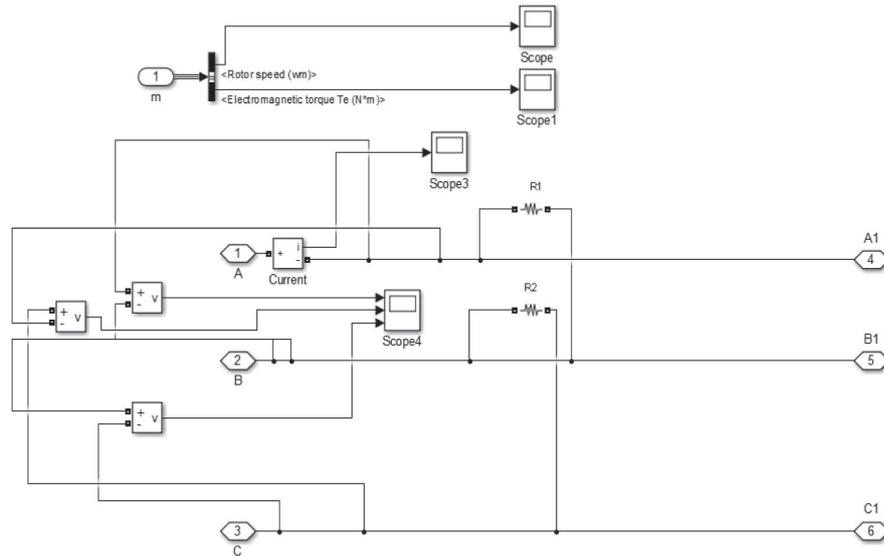
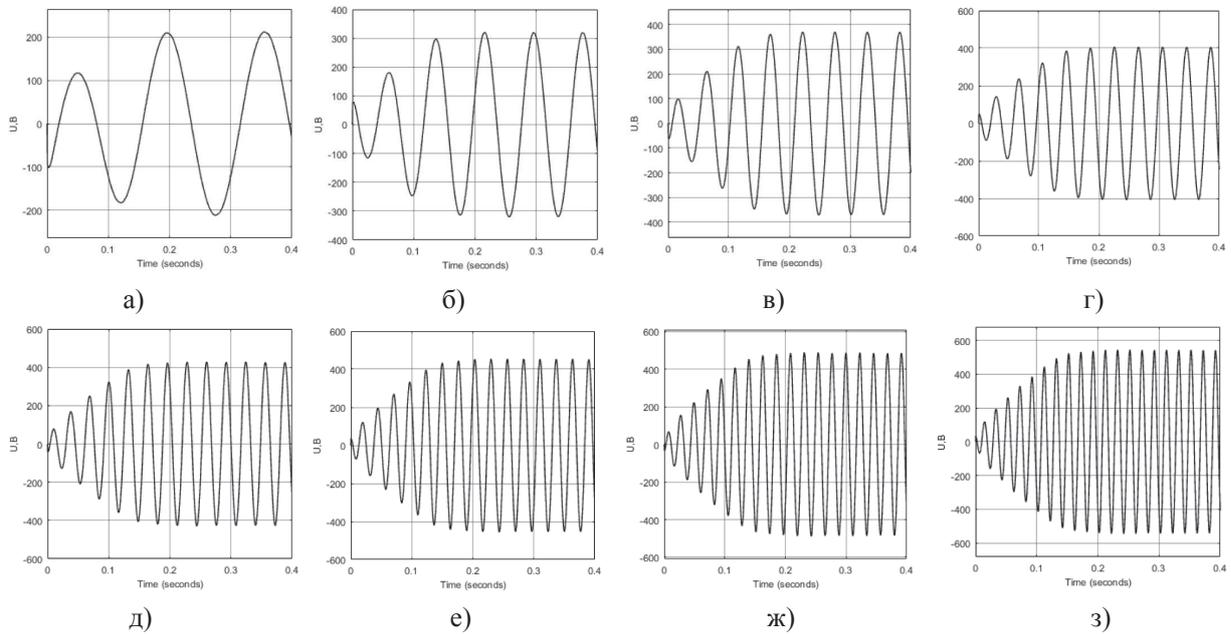


Рисунок 7. Блок Subsystem



а) осциллограмма ступени 8 (синхронный генератор); б) осциллограмма ступени 7; в)–з) осциллограммы ступеней 6–1; ступени 1–7 — асинхронные преобразователи

Рисунок 8. Осциллограммы напряжений блока Synchronous Machine SI

поперечной реакцией якоря синхронного генератора. Данные f_k и U_{mk} , полученные из осциллограмм (рисунок 8) и рассчитанные по формулам (1), сведены в таблицу 1.

В таблице 1 T — период колебаний выходного напряжения каждой ступени каскада, определённый из осциллограмм (рисунок 8)

$$T = 1/f.$$

Таблица 1. Данные по осциллограммам

№ ступени каскада	1	2	3	4	5	6	7	8
$f_{k, \text{расч.}}, \text{Гц}$	50	43,75	37,5	31,25	25	18,75	12,5	6,25
$T_{k, \text{модели}}, \text{мс}$	20	22,5	26,5	30,5	40	54	80	160
$f_{k, \text{модели}}, \text{Гц}$	50	43,7	37,5	31,3	25	18,8	12,5	6,25
$U_{mk}, \text{В}$	569	508	457	414	370	312	172	144

Как видим, напряжение на выходе 8 ступени (синхронного генератора) в 2 раза больше, чем рассчитанное по формуле (1). Поэтому синхронную ступень каскада приходится рассчитывать на мощность в 2 раза большую, чем все остальные ступени каскада.

Список литературы

1. Шапиро С.В., Кулинич В.А. Каскадный синхронно-асинхронный генератор // Электротехника. № 1. 2002. С. 25–28.
2. Патент № 17363 Российская Федерация, МПК 7 G 01 B 13/00. Синхронный тихоходный генератор / Шапиро С.В., Кулинич В.А.; заявитель и патентообладатель Уфимский технологический институт сервиса (RU). № 200018870/20; заявл. 17.01.2000. опубл. 27.03.01.
3. Шапиро С.В., Исмагилов Ф.Р., Терегулов Т.Р., Полихач Е.А., Кузнецов А.Ю. Каскадный бесконтактный четырехступенчатый генератор // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. № 3, Т. 9. С. 49–51.
4. Патент № 2453971 Российская Федерация, МПК 7 G 01 B 13/00. Каскадный синхронно-асинхронный генератор / Шапиро С.В., заявитель и патентообладатель Уфимский государственный университет экономики и сервиса (RU). 2011-112-57; заявл. 4.04.11; опубл. Бюл. № 17 от 2012.
5. Патент № 2536167 Российская Федерация, МПК 7 G 01 B 13/00. Короткозамкнутый ротор каскадной синхронно-асинхронной электромеханической системы / Шапиро С.В.; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный университет экономики и сервиса (RU). № 2013-112-57; заявл. 4.10.12; опубл. Бюл. № 35 от 20 декабря 2014.
6. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. Санкт-Петербург: ДМК Пресс, 2008. 288 с.
7. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов: в 2 т. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 652 с.

Вывод

В результате исследования компьютерной модели (в пакете *MATLAB*) синхронно-асинхронного каскадного генератора было установлено, что первую ступень каскада (обращенный синхронный генератор) необходимо выполнить с расчетной мощностью в два раза больше, чем расчетная мощность всех остальных ступеней.

References

1. Shapiro S.V., Kulinich V.A. Kaskadnyj sinhronno-asinhronnyj generator // Jelektrotehnika. 2002, № 1, pp. 25–28.
2. Patent № 17363 Rossijskaja Federacija, MPK 7 G 01 B 13/00. Sinhronnyj tihohodnyj generator / Shapiro S.V., Kulinich V.A.; zjavitel' i patentoobladatel' Ufimskij tehnologičeskij institut servisa (RU). № 200018870/20; zjavl. 17.01.2000; opubl. 27.03.01.
3. Shapiro S.V., Ismagilov F.R., Teregulov T.R., Polihach E.A., Kuznecov A.Ju. Kaskadnyj beskontaktnyj chetyrehstupenchatyj generator Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2013. № 3, T. 9. 2013. pp. 49–51.
4. Patent № 2453971 Rossijskaja Federacija, MPK 7 G 01 B 13/00. Kaskadnyj sinhronno-asinhronnyj generator / Shapiro S.V.; zjavitel' i patentoobladatel' Ufimskij gosudarstvennyj universitet jekonomiki i servisa (RU). № 2011-112-57; zjavl. 4.04.11; opubl. bjul. № 17 ot 2012.
5. Patent № 2536167 Rossijskaja Federacija, MPK 7 G 01 B 13/00. Korotkozamknutyj rotor kaskadnoj sinhronno-asinhronnoj jelektromehaničeskoj sistemy / Shapiro S.V.; zjavitel' i patentoobladatel' Ufimskij gosudarstvennyj universitet jekonomiki i servisa (RU). № 2013-112-57; zjavl. 4.10.12; opubl. Bjul. № 35 ot 20 dekabrja 2014 g.
6. Chernyh I.V. Modelirovanie jelektrotehnicheskikh ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink. Sankt-Peterburg: DMK Press, 2008. 288 s.
7. Ivanov-Smolenskij A.V. Jelektricheskie mashiny: Uchebnyk dlja vuzov: v 2 t. 2 izd., pererab. i dop. M.: Izd-vo MJEI, 2004. 652 s.



Федосов А. В.
Fedosov A. V.

кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



Федосов В. А.
Fedosov V. A.

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



Мухамадиев А. А.
Mukhamadiev A. A.

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

УДК 648.234-83

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ВАКУУМНО-ВОЗДУШНОЙ СТИРАЛЬНОЙ МАШИНЫ

Тема совершенствования стиральной техники является актуальной, поскольку все новые повышенные требования предъявляются к товарам массового спроса. К наиболее востребованным относятся стиральные машины.

Одним из перспективных направлений в бытовом электроприборостроении является разработка бытовых стиральных машин, базирующихся на нетрадиционном способе стирки, обеспечивающем возможность обработки широкой гаммы текстильных изделий, изготовленных из тканей, содержащих синтетические, искусственные и смешанные волокна [1, 2].

Для исследования потребительских показателей качества, определения энергетических параметров была разработана и изготовлена экспериментальная установка вакуумно-воздушной стиральной машины.

Проведенные исследования показали перспективность вакуумно-воздушного способа стирки различных по составу тканей.

Результаты эксперимента показали, что к основным факторам, влияющим на показатели качества, относятся циклическое кипение под вакуумом, перемешивание текстильных изделий посредством подачи атмосферного или сжатого воздуха в бак стиральной машины, изменение температурных параметров, времени стирки и воздействие поверхностно-активных веществ.

Было установлено что, в сравнении с активаторным и барабанным вакуумно-воздушный способ стирки имеет целый ряд достоинств: экономия электроэнергии, экономия синтетических моющих средств, улучшенный водный модуль.

Все перечисленные достоинства вакуумно-воздушного способа стирки выявлены опытным путем в результате проведения эксперимента.

Ключевые слова: электротехнические испытания, стиральная машина, вакуумно-воздушный способ стирки.

ELECTRICAL TESTS OF THE EXPERIMENTAL AIR VACUUM-WASHING MACHINE

The theme of improving the washing equipment is relevant because the new higher requirements for consumer goods. The most popular and important to include washing machines.

One of the promising trends in the domestic electrical instrument is the development of household washing machines that are based on non-conventional washing method, providing the ability to process a wide range of textile products made of fabrics containing synthetic, synthetic and mixed fibers.

To study consumer quality indicators, the definition of energy parameters has been developed and manufactured experimental setup vacuum air the washing machine.

Studies have shown the promise of a vacuum-air method of washing fabrics of different composition.

Results of experimentation showed that the main factors affecting the quality indicators are cyclical boiling under vacuum, mixing textiles by supplying atmospheric or compressed air into the tank of the washing machine, change the temperature settings, the washing time and the effect of surface-active agents (surfactants).

It has been found that, in comparison with the activator and the drum, the air-vacuum washing method has a number merits: energy savings, savings of synthetic detergents, improved the water module.

All of the advantages of vacuum air wash method identified empirically as a result of experimentation.

Key words: electrical tests, washing machine, air-vacuum washing method.

Совершенствование бытовых стиральных машин связано с решением вопросов функциональной универсальности, заключающейся в возможности качественной обработки широкого ассортимента текстильных материалов. Этим требованиям в значительной степени удовлетворяет вакуумно-воздушный способ стирки, при котором текстильные изделия в течение определенного времени подвергаются адиабатному кипячению.

Процесс кипения обрабатываемых текстильных изделий достигается за счет вакуумирования, при этом на первичный пограничный слой в момент смачивания стираемых текстильных изделий моющим раствором существенное влияние оказывает образование и отрыв парогазовых пузырей при создании вакуума в баке стиральной машины. Посредством вакуума на загрязнении образуются пузырьки воздуха и паровоздушные пузырьки, которые отрываются от поверхности ткани. Всплывающие пузырьки создают в своей кормовой части зону пониженного давления, куда устремляется моющий раствор, создавая вблизи нитей ткани турбулизацию, увеличивая при этом коэффициент массоотдачи.

Изменяя степень вакуумирования в баке стиральной машины можно осуществлять стирку текстильных изделий при различных температурах и при неизменно большом количестве паровоздушных пузырьков.

Для интенсификации процесса массообмена в баке стиральной машины необходимо периодически осуществлять перемешивание обрабатываемых текстильных изделий. Перемешивание может осуществляться за счет подачи атмосферного или сжатого воздуха через специальные насадки (сопла), расположенные в донной части стирального бака.

Таким образом, вакуумно-воздушный способ стирки можно представить как ряд последовательных циклов кипячения обрабатываемых текстильных изделий под вакуумом и перемешивания посредством подачи атмосферного или сжатого воздуха в стиральный бак.

Основными конструктивно-технологическими факторами вакуумно-воздушного способа стирки являются степень и скорость вакуумирования, температура моющего раствора, загрузочная масса текстильных изделий, водный и объемный модули, геометрические характеристики стирального бака и

воздухоподающих сопел, продолжительность и последовательность включения сопел в работу, время обработки.

Вакуумно-воздушный способ стирки позволяет в широком диапазоне варьировать уровень пневмогидродинамического воздействия на обрабатываемые изделия.

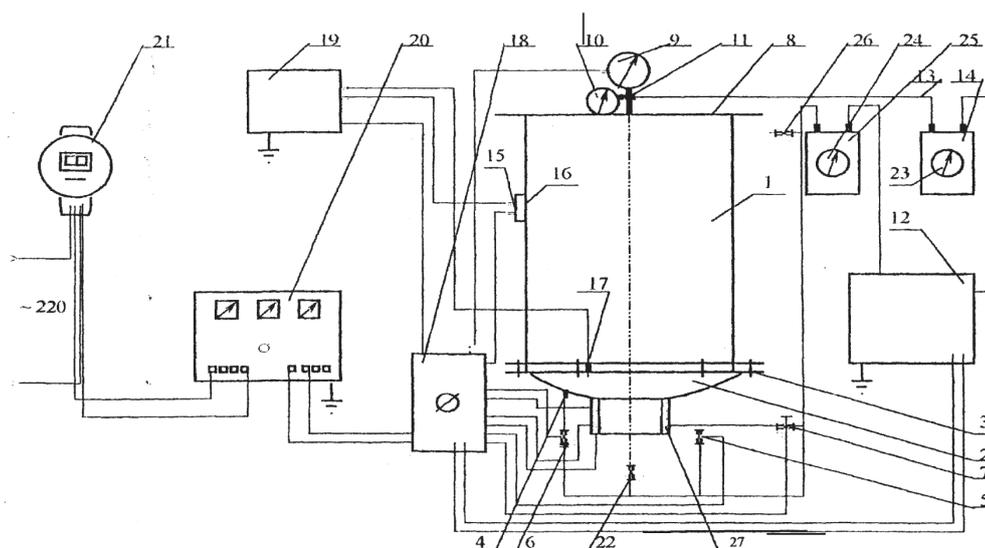
Исследования процесса стирки проводились на экспериментальной установке, принципиальная схема которой представлена на рисунке 1.

Установка представляет собой модель вакуумно-воздушной стиральной машины. Она состоит из следующих конструктивных элементов: бака 1, представляющего собой полый вертикальный цилиндр, изготовленный из толстостенного прозрачного кварцевого стекла; днища бака 2; фланца 3; индукционного электронагревателя 27, мощность которого можно изменять в ходе эксперимента, изменяя число витков индуктора; сопла 4 для подачи атмосферного или сжатого воздуха в бак вакуумно-воздушной стиральной машины изготовлены из медных трубок различного диаметра (от 1 до 15 мм) и соединены с электромагнитными клапанами 5, 6, 7 типа КЭН-3. Пропускная способность сопел зависит от их диаметра.

Сопла расположены под углом 120° , что позволяет перемешивать текстильные изделия в трех плоскостях при их циклическом включении в работу в определенной последовательности. Центральное сопло используется для подачи воздуха в бак стиральной машины, обеспечивая циркуляцию моющего раствора в период стирки, а также для слива моющего раствора.

Стандартное крепление основания к обечайке бака стиральной машины, выполненное в виде фланцев, соединенных шпильками, позволяет менять в ходе эксперимента любые элементы конструкции бака стиральной машины, т.е. цилиндрический бак, днище бака, сопла, датчики температуры, давления и уровня.

Для контроля электрических параметров в экспериментальной установке использованы современные электрические, электроизмерительные, контролирующие и другие приборы, позволяющие с высокой точностью определять потребляемый ток, потребляемую мощность, устанавливать необходимое номинальное напряжение, контролировать температуру моющего раствора, поддерживать в нужном диапазоне давление внутри стирального бака, управлять работой ваку-



1 — бак; 2 — днище бака; 3 — фланец; 4 — сопла; 5, 6, 7, 22, 26 — клапаны; 8 — крышка; 9 — контактный мановакуумметр; 10 — термометр; 11 — муфта; 12 — вакуумный насос; 13 — трубопровод; 14, 25 — ресиверы; 15, 16, 17 — терморпара; 18 — командоаппарат; 19 — потенциометр КСП-4; 20 — электроизмерительный прибор К-505; 21 — счетчик электроэнергии; 23 — мановакуумметр; 24 — манометр; 27 — электронагреватель

Рисунок 1. Принципиальная схема экспериментальной установки, основанной на вакуумно-воздушном способе стирки

умного насоса, осуществлять переключение электромагнитных клапанов и другие функции. Измерительный комплект К-505, используемый для замера электрических параметров, относится к прецизионным приборам с зеркальной шкалой класса точности 0,5, что гарантирует высокую точность измерения. Все нагрузочные данные достоверно характеризуются этим измерительным комплектом. Нагрев моющего раствора в стиральном баке осуществляется индукционным или тэновым нагревателем, визуально контролируется термометром. Температура моющего раствора фиксируется на диаграммной ленте в виде температурного поля двенадцатиточечным прибором КСП-4. Датчиком температуры в данной схеме служат термопары.

Вакуумирование бака и создание в нем заданного разряжения осуществляется вакуумным насосом ЗНВР-1ДУХЛ4,2. Параметры вакуумирования задаются электроконтактным вакуумметром, непосредственно соединенным с командоаппаратом, который в свою очередь управляет включением и отключением вакуумного насоса. Как показали испытания, время вакуумирования бака с моющим раствором и бельем длится несколько секунд, после чего начинается интенсивное кипение, и как результат переход загрязнений с поверхности белья в моющий раствор.

Учитывая сложность процесса, а также отсутствие априорной информации по вакуумной обработке текстильных изделий, особое внимание при исследовании было обращено на определение водного модуля, одного из главных показателей стиральных машин, определяющих их экономичность. Исследовалось также влияние объемного модуля на процесс обработки. В процессе исследования грузочная масса изменялась от 0,50 до 3,00 кг с интервалом в 0,25 кг. Водный модуль изменялся от 3 дм³/кг до 20 дм³/кг.

Результаты исследований показаны на рисунке 2.

Анализ результатов показывает, что водный модуль оказывает существенное влияние на процесс вакуумно-воздушной

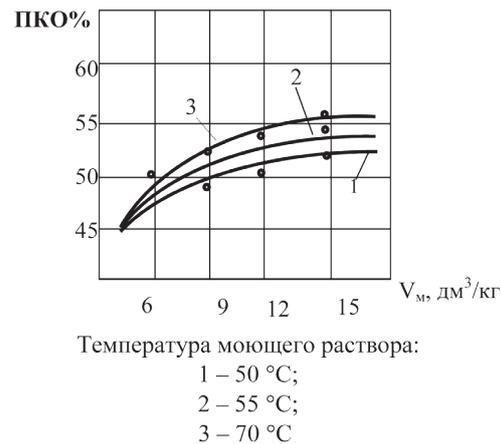


Рисунок 2. Влияние водного модуля на показатель качества отстирывания

обработки текстильных изделий. С увеличением водного модуля от 6 до 15 дм³/кг качество отстирывания повышается (рисунок 2). Это объясняется улучшением массообмена в баке. Перемешивание текстильных изделий осуществляется в основном в вертикальных плоскостях.

На рисунке 2 изображены три кривые изменения показателя качества отстирывания (ПКО) в зависимости от водного модуля при различных температурах стирки.

Все показанные на рисунке 2 кривые отображают единообразную зависимость: ПКО растет с увеличением водного модуля до определенной величины (12-14 дм³/кг), далее кривые выполаживаются, и ПКО практически не меняется с изменением водного модуля, что соответствует теоретическим зависимостям.

Интенсификация процесса обработки текстильных изделий осуществляется путем периодической подачи воздуха в стиральный бак. Причем подачу воздуха необходимо осуществлять через сопла, расположенные в донной части стирального бака.

В процессе экспериментов исследовались различные варианты расположения сопел в донной части бака.

Анализ процесса стирки и полученные результаты показывают, что определяющими факторами являются угловое расстояние a и диаметр отверстия сопла d . По данным С.С. Кутателадзе [3], при истечении газа в жидкость из сопла при его диаметре более 5 мм наблюдается дробление одиноч-

ного пузыря, поэтому диаметр сопла целесообразно принимать равным 5 мм.

Были определены области рациональных значений исследуемых факторов [4, 5]. Для вакуумно-воздушных стиральных машин рациональными являются:

$n = 4$ (при этом необходимо расположение 4-го отверстия в центре бака);

$\alpha = 120^\circ$ (обеспечивается интенсивное перемешивание в баке);

$d = 5\text{--}8$ мм;

$D_2 = 0,6\text{--}0,8D_1$

Исследовались также различные варианты циклограмм работы вакуумно-воздушной стиральной машины. Структура циклограмм принималась следующая: вакуумирование (время t_1) — включение подачи воздуха через воздухоподающее сопло (продолжительность включения t_2) — вакуумирование (время t_1) и т.д.

Экспериментальные исследования позволили определить рациональную циклограмму работы машины: вакуумирование до — 0,02 МПа — подача атмосферного воздуха в течение 3 с первым соплом — вакуумирование до — 0,02 МПа — подача атмосферного воздуха в течение 3 с вторым соплом — вакуумирование до — 0,02 МПа — подача атмосферного воздуха в течение 3 с третьим соплом — вакуумирование до — 0,02 МПа — подача атмосферного воздуха в течение 3 с центральным соплом. При подаче атмосферного воздуха в бак стиральной машины происходит не только интенсивное перемешивание обрабатываемых текстильных изделий, но и насыщение моющего раствора кислородом воздуха. Кислород при этом оказывает очищающее и отбеливающее воздействие.

Список литературы

1. Федосов В.А., Челнынецев А.В. Интенсификация массообмена при подаче воздуха в бак вакуумно-воздушной стиральной машины // Наука сегодня: Теория и практика: сб. науч. тр. Междунар. заоч. науч.-практ. конф. 2015. Ч. II. С. 81–83.

Выводы

1. Проведенные экспериментальные исследования показали, что вакуумно-воздушный способ стирки текстильных изделий может быть реализован в конструкциях стиральных машин.

2. Исследовано влияние водного модуля на основные показатели качества вакуумно-воздушных стиральных машин: показатель качества отстирывания и показатель потери прочности ткани. Установлено, что рациональным значением водного модуля для ВВСМ является $V_m = 12\text{--}14$ дм³/кг.

3. Исследовано влияние температуры моющего раствора на процесс обработки в вакуумно-воздушных стиральных машинах. Установлено, что температура моющего раствора оказывает более сильное влияние на изменение ПКО, чем на изменение ППТ; так, при изменении температуры моющего раствора от 45 °С до 80 °С изменение значения ПКО составляет 11,2 %, а ППТ — 0,6 %.

4. Определено влияние геометрических характеристик воздухоподающих сопел на процесс обработки текстильных изделий в вакуумно-воздушных стиральных машинах.

Установлено, что для вакуумно-воздушных стиральных машин рациональными являются: $n = 4$ (при этом необходимо расположение 4-го отверстия в центре бака); $\alpha = 120^\circ$ (обеспечивается интенсивное перемешивание в баке); $d = 5\text{--}8$ мм; $D_2 = 0,6\text{--}0,8D_1$.

5. Испытания показали, что потребление электрической энергии в вакуумно-воздушных стиральных машинах меньше, чем в активаторных и барабанных стиральных машинах.

2. Федосов А.В., Федосов В.А., Шаймухаметов Э.Ф. Современные средства измерения, применяемые при проведении экспертизы промышленной безопасности технических устройств на опасных производственных объектах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12. № 1. С. 117–123.

3. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

4. Федорова А.Ф. Технология химической чистки и крашения: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Легпромбытиздат, 1990. 366 с.

5. Федосов А.В., Гайнуллина Л.А. Методы неразрушающего контроля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. Т. 11. № 2. С. 73–78.

References

1. Fedosov V.A., Chelnynceev A.V. Intensifikacija massoobmena pri podache vozduha v bak vakuumno-vozdushnoj stiral'noj mashiny // Nauka segodnja: Teorija i praktika: sb. nauch. tr. Mezhdunar. zaoch. nauch.-prakt. konf. 2015. Ch. II. S. 81–83.

2. Fedosov A.V., Fedosov V.A., Shajmuhametov Je.F. Sovremennye sredstva izmerenija, primenjaemye pri provedenii jekspertizy promyshlennoj bezopasnosti tehniceskikh ustrojstv na opasnyh proizvodstvennyh ob'ektah // Jelektrotehniceskije i informacionnye kompleksy i sistemy. 2016. T. 12. № 1. S. 117–123.

3. Kutateladze S.S. Osnovy teorii teploobmena. М.: Atomizdat, 1979. 416 s.

4. Fedorova A.F. Tehnologija himicheskoj chistki i krashenija: ucheb. dlja vuzov. 2-e izd., pererab. i dop. М.: Legprombytizdat, 1990. 366 s.

5. Fedosov A.V., Gajnullina L.A. Metody nerazrushajushhego kontrolja // Jelektrotehniceskije i informacionnye kompleksy i sistemy. 2015. T. 11. № 2. S. 73–78.



Пантина А. И.
Pantina A. I.

аспирант кафедры «Электро- и радиооборудование судов», заместитель декана по учебной и научной работе, ФГБОУ ВО «Камчатский государственный технический университет», г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация



Белов О. А.
Belov O. A.

кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электро- и радиооборудование судов», ФГБОУ ВО «Камчатский государственный технический университет», г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

УДК 621.82

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Эффективная эксплуатация современных судов во многом зависит от технического состояния и качества работы электрооборудования. Основным элементом электроприводов большинства судовых систем, устройств и технологических комплексов является асинхронный электродвигатель. Оценка технического состояния асинхронного двигателя и своевременное выявление скрытых дефектов и потенциальных неисправностей являются важной задачей его эксплуатации.

Существуют различные виды эксплуатационной диагностики судовых асинхронных электродвигателей, основанные на анализе формы и спектра электрического сигнала, оценке диаграммы звукового сигнала и вибродиагностическом контроле. Авторами статьи рассматривается метод использования характеристик внешнего электромагнитного поля работающего в различных режимах судового асинхронного электродвигателя. Физическая сущность данного метода заключается в синтезе характеристик внешнего электромагнитного поля и анализе мультипольного состава поля по дипольным, квадрупольным и октупольным составляющим магнитного поля.

Рассматривается реализация метода характеристик внешнего магнитного поля путем его непосредственного измерения в локальных точках на корпусе электродвигателя. По данным измерений формируется исходный «портрет» электродвигателя, и в дальнейшем осуществляется его контроль путем периодических измерений электромагнитного поля через заданный интервал времени. Данные замеров напряженности внешнего электромагнитного поля основных типов судовых двигателей мощностью в диапазоне от 2 до 8 кВт представлены в табличной форме. Результаты анализа этих данных позволяют сделать вывод о работоспособности данного метода и возможности его использования для прогнозирования технического состояния судовых асинхронных двигателей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, эксплуатация, техническое состояние, диагностика, дефект, неисправность, электромагнитное поле, напряженность, измерительное устройство.

TECHNICAL STATE VERIFICATION OF MARINE INDUCTION MOTOR ON THE CHARACTERISTICS OF EXTERNAL ELECTROMAGNETIC FIELD

The effective operation of modern ships depends on technical state and quality of electrical equipment run in many respects. Induction motor is the main element of electrical drive on the most of marine system, equipments and technological complex. The technical state estimation of induction motor and timely hidden bug identification is the main aim of its operation.

There are different types of operation diagnosis of marine induction motor based on shape and spectral electric signal analysis, beep graph estimation and vibration-based monitoring. In the article authors scrutinizes an application of marine induction motor working in various conditions on the characteristics of external electromagnetic field of method.

The physics of this methods consists in characteristic external magnetic field synthesis and analysis of multipole composition of a field by dipole, quadrupole, octopole components of magnetic field

Key words: induction motor, operation, technical state, diagnosis, bug, breakdown, electromagnetic field, measuring device.

Введение

В процессе эксплуатации в результате воздействия различных факторов, режимов и условий работы исходное техническое состояние электрооборудования непрерывно ухудшается, возрастает вероятность возникновения отказов и перехода объекта в «опасное состояние» [1].

Значительный износ электрооборудования приводит к дополнительным потерям энергии, снижению надежности функционирования, возрастанию его аварийности и отказов. Надежность оборудования определяется не только уровнем качества изготовления, но также зависит и от того, насколько научно обоснованы эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт.

В современных условиях эффективное функционирование судовых систем и устройств различного назначения непосредственно связано с техническим состоянием и надежностью работы асинхронных двигателей (АД), входящих в состав этих комплексов. Наряду с производственными и бытовыми задачами частью этих комплексов решаются задачи живучести и безопасности мореплавания судна. Следовательно, возникает необходимость качественного контроля технического состояния различных типов асинхронных двигателей.

В настоящее время развиваются несколько направлений методологии контроля технического состояния судовых асинхронных двигателей.

Основные виды диагностики асинхронного двигателя

Рассмотрим основные виды диагностики состояния судовых асинхронных двигателей.

Определение неисправностей по анализу формы электрического сигнала. Суть метода заключается в диагностировании механических неисправностей судовых асинхронных двигателей на основе изменения формы и величины тока статора.

Определение неисправностей по спектральному анализу сигнала тока. Данный метод основан на том, что неисправности в работе асинхронной машины приводят к изменениям магнитного потока, а, следовательно, и к изменению спектрограммы электрического тока.

Оценка неисправностей по анализу диаграммы звукового сигнала. Метод, основанный на исследовании акустических колебаний, включает в себя сравнение звукового сигнала, создаваемого неисправной машиной, с сигналом, создаваемым эталоном.

Вибродиагностический контроль основан на обнаружении изменений вибрационного состояния контролируемого объекта в процессе эксплуатации, причинами которых во многих случаях являются дефекты.

Все представленные методы диагностики технического состояния судовых асинхронных двигателей имеют свои достоинства и недостатки. Рассмотрим более подробно метод диагностирования асинхронных двигателей, основанный на синтезе измерений

характеристик их внешнего электромагнитного поля.

Использование характеристик внешнего электромагнитного поля

Одним из возможных способов диагностирования электромагнитной части асинхронных двигателей является способ, основанный на анализе результатов измерений характеристик их внешнего электромагнитного поля (ВЭМП) [1-7].

Известный способ диагностирования АД, использующий результаты измерения параметров ВЭМП [3], основан на сравнительном анализе мультипольного состава поля по дипольным, квадрупольным, октупольным и т.д. составляющим поля, параметры которых определяются с помощью сложного диагностического устройства, в структуру которого входит система датчиков, измеряющих значения магнитных напряженностей в ряде контрольных точек, размещенных на сферической поверхности, окружающей двигатель.

Поскольку характер дефекта АД в этой системе определяется по характеру изменения структур математических моделей ВЭМП, практическая реализация затруднительна, так как требует разработки сложного анализатора мультипольного состава, большого числа измерительных устройств с сетью многосекционных датчиков, специальной вычислительной аппаратуры и тщательной ее настройки для каждого диагностируемого АД.

Однако идея диагностирования АД с помощью анализа характеристик его ВЭМП оказывается целесообразной и реализуемой, если воспользоваться результатами непосредственного измерения напряженностей ВЭМП в локальных (фиксированных) точках на корпусе АД либо вблизи его (до 2 см от него) — в зоне лобовых частей, где значения напряженностей ВЭМП по сравнению с другими контрольными точками наиболее значительны и не подвержены экранирующему воздействию сердечника статора. В этом случае характер дефектов АД определяется непосредственно по изменениям напряженностей ВЭМП в зоне лобовых частей обмотки статора при небольшом числе контрольных точек, что существенно упрощает систему диагностирования и снижает объем вычисли-

тельных работ по определению технического состояния АД.

Исходный «портрет» (характер изменения) напряженностей ВЭМП каждого двигателя регистрируется перед началом эксплуатации для заданных режимов работы. В процессе эксплуатации АД через определенные интервалы времени регистрируются «портреты» в тех же точках и сравниваются с соответствующим «портретом» исходного режима. Если отличия в «портретах» не превосходят допустимых значений напряженностей ВЭМП (до 20 %), техническое состояние АД считается удовлетворительным.

Экспериментальные исследования, проведенные на ряде АД разных мощностей и частот вращения, подтверждают возможность использования в качестве диагностических параметров напряженностей ВЭМП, измеренных в фиксированных точках, расположенных на корпусе АД либо вблизи его — в зоне лобовых частей.

Установлено, что каждый эксплуатационный режим при изменении технического состояния АД характеризуется строго индивидуальным «портретом», при котором уровни низкочастотных (50 Гц) составляющих напряженностей ВЭМП существенно изменяются по сравнению с исходными.

Исследования показывают [1], что наиболее целесообразными «портретами» как исходными, так и при изменении нагрузки АД являются «портреты», зафиксированные в поперечной плоскости, перпендикулярной оси вращения АД, и определенные с помощью измерений в 6-8 точках, равномерно распределенных по окружности корпуса АД, либо в непосредственной близости, на расстоянии до 2 см [1].

В качестве измерительных устройств использовались специальные индуктивные датчики с большим числом витков (5000–10000 витков).

Экспериментальные исследования проводились на двигателях, имеющих специальные отпайки обмоток статора, что позволило имитировать следующие дефекты:

- обрыв фазы;
- короткое замыкание части витков фазы;
- межфазное замыкание обмотки статора;
- снижение сопротивления изоляции.

Результаты измерений напряженностей ВЭМП при возникновении дефектов свидетельствуют о существенных их изменениях по сравнению с исходными эксплуатационными режимами. Эти изменения в зависимости от характера имитируемых неисправностей отличаются от исходных на 40-200 % и позволяют по виду «портрета» достоверно оценить характер неисправностей и места их расположения. Результаты исследования приведены в таблице 1.

Проведенные исследования также подтверждают, что «портреты» ВЭМП являются устойчивыми диагностическими параметрами не только для оценки технического состояния АД в определенные моменты времени, но и могут быть успешно использованы для решения задач прогнозирования времени их безотказной работы.

Возможность решения задач прогнозирования обуславливается тем обстоятельством, что в большинстве случаев отказы являются

следствием постепенного накопления повреждений, старения и изнашивания изоляции.

Исследования отказов, проведенные на реальных объектах с более 5000 АД с высотами осей вращения от 90 до 250 мм [4], показывают, что между средней наработкой до отказа и величинами, характеризующими эксплуатационные факторы (температурой обмотки, частотой пусков и вибрационной скоростью) существует определенная функциональная зависимость, позволяющая при известных данных для конкретного эксплуатационного режима определить время наработки до отказа. Располагая зависимостями напряженностей ВЭМП в исходном состоянии и при наличии дефектов в функции времени наработки до отказа, можно определить вероятное оставшееся время безотказной работы по величинам изменения характеристик ВЭМП для любого расчетного времени.

Таблица 1. Данные замеров внешнего электромагнитного поля исследуемых электродвигателей (поперечный «портрет»)

Напряжение на измерительной катушке в контрольных точках ($U_k \cdot 10^{-2}$ В)	Основные технические характеристики					
	2 кВт 220 В 15 А 2850 об./мин	5 кВт 220 В 16 А 2870 об./мин	3 кВт 220 В 12 А 1450 об./мин	8 кВт 380 В 15 А 2900 об./мин	2 кВт 220 В 5 А 2850 об./мин	
Режим Х.Х.	1	2,5	8	18	25	12
	2	2,3	7,8	16	23	14
	3	2,5	8,2	19	21	15
	4	2,2	8,7	17	24	13
	5	2,7	8,1	20	23	14
Витковое замыкание	1	—	—	41	80	48
	2	—	—	35	78	47
	3	—	—	43	82	55
	4	—	—	37	80	62
	5	—	—	35	81	58
Межфазное замыкание	1	—	—	85	160	110
	2	—	—	6	150	120
	3	—	—	70	150	120
	4	—	—	91	170	110
	5	—	—	75	150	100
Обрыв фазы	1	—	—	11	13	4
	2	—	—	8	10	3
	3	—	—	9	11	4
	4	—	—	10	13	5
	5	—	—	8	11	4
Рабочий режим 0,8 P _н	1	9,0	12	21	28	14
	2	8,5	11	19	27	13
	3	9,7	13	20	26	16
	4	7,8	13	23	30	12
	5	7,4	12	21	28	15

Выводы

Для определения технического состояния АД в качестве диагностического параметра может быть использована напряженность ВЭМП, измеренная на корпусе АД в зоне лобовых частей обмотки статора.

Характер измерения параметров ВЭМП в зависимости от времени безотказной работы позволяет использовать их при решении

вопросов прогнозирования технического состояния АД.

Наиболее реальным следует считать второй случай, который предполагает регулярное измерение сопротивления изоляции с помощью корабельного мегомметра и других средств измерения, контроль изоляции кабеля и его техническое обслуживание.

Список литературы

1. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика и контроль технического состояния изделия. Основные термины и определения [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-20911-89>.
2. Можяев А.С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем. Л.: ВМА, 1988. 67 с.
3. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 247 с.
4. Половко А.М., Гуров С.В. Надежность технических систем и техногенный риск. СПб.: СПГ Лесотехническая академия, 1998. 119 с.
5. Рябинин И.А., Парфенов Ю.М. Надежность, живучесть и безопасность корабельных электроэнергетических систем. СПб.: ВМА, 1997. 430 с.
6. Северцев П.А. Надежность сложных систем в эксплуатации при наработке. М.: Высшая школа, 1989. 428 с.
7. Хенли Э.Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.

References

1. GOST 20911-89. Tekhnicheskaya diagnostika i kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya izdeliya. Osnovnye terminy i opredeleniya [Elektronnyi re-surs]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-20911-89>.
2. Mozhaev A.S. Obshchii logiko-veroyatnostnyi metod analiza nadezhnosti slozhnykh sistem. L.: VMA, 1988. 67 s.
3. Novitskii P.V., Zograf I.A. Otsenka pogreshnostei rezul'tatov izmerenii. L.: Energoatomizdat, 1985. 247 s.
4. Polovko A.M., Gurov S.V. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyi risk. SPb.: SPG Lesotekhnicheskaya akademiya, 1998. 119 s.
5. Ryabinin I.A., Parfenov Yu.M. Nadezhnost', zhivuchest' i bezopasnost' korabel'nykh elektroenergeticheskikh sistem. SPb.: VMA, 1997. 430 s.
6. Severtsev P.A. Nadezhnost' slozhnykh sistem v ekspluatatsii pri narabotke. M.: Vysshaya shkola, 1989. 428 s.
7. Khenli E.Dzh., Kumamoto Kh. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i otsenka riska. M.: Mashinostroenie, 1984. 528 s.



Саяхов И. Ф.
Sayakhov I. F.

*аспирант кафедры «Электромеханика»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Николаева А. Н.
Nikolaeva A. N.

*студент кафедры «Телекоммуникационные
системы», ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный авиационный
технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 629.7.062

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНЫМИ КРЫЛЬЯМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Для управления полетом современного самолета используется широкий набор аэродинамических поверхностей. Управление этими поверхностями производится различного рода силовыми приводами: гидравлическими, пневматическими и электрическими. Наиболее перспективными являются электроприводы ввиду их простоты конструкции и высоких массогабаритных показателей.

Усилия, необходимые для перемещения аэродинамической поверхности, для каждого самолета определяются площадью поверхности, скоростью, высотой полета и другими условиями.

Следует отметить, что основная масса несущей системы самолета и рулевых поверхностей сосредоточена в силовых приводах. Поэтому разработка простых электромеханических приводов с высокими массогабаритными показателями как замена гидравлическим системам является актуальной научно-технической задачей. В настоящее время электроприводы находят применение в системах управления положением самолета и механизацией крыла. Более широкое использование электроприводов ограничено вследствие необходимости обеспечения ресурса и надежности механической части электропривода, одним из решений данной проблемы является поглощение воспринимаемых аэродинамических нагрузок в фиксированном положении выходного звена.

Перспективным направлением в современном самолетостроении является применение адаптивного крыла с изменяемой формой и геометрией. Применение электроприводов с высокими энергетическими и массогабаритными показателями для управления адаптивными крыльями позволит снизить полетную массу и оптимизировать характеристики самолета.

Конструкция электропривода предполагает использование бесколлекторного электродвигателя с постоянными магнитами и датчиками положения совместно с двухступенчатым редуктором, электромагнитной муфтой и датчиками обратной связи. Однако электромеханические приводы имеют ряд недостатков, обусловленных низкой надежностью механического редуктора, наличием люфтов, а также возникновением высоких механических нагрузок под действием аэродинамических сил в пассивном режиме работы привода.

В разрабатываемом электроприводе критичным параметром является быстродействие, которое в основном определяется используемыми электродвигателем и редуктором.

Разработанная конструкция электропривода не уступает по своим энергетическим и массовым показателям зарубежным электрогидравлическим приводам и приводам-аналогам.

Ключевые слова: аэродинамические нагрузки, электромеханический привод, конструкция привода, адаптивное крыло, летательный аппарат.

ELECTROMECHANICAL ACTUATORS TO CONTROL ADAPTIVE COMPLIANT AIRCRAFT WINGS

A wide range of airfoil surfaces is used to control the flight of a modern aircraft. These surfaces are controlled by various power actuators: hydraulic, pneumatic, or electric. The latter are the most promising option thanks to their simple design and high mass-dimension value.

The effort required to move the airfoil surface is aircraft-specific and depends on the surface area, flight speed and altitude, and other factors.

Note that the power actuators represent the bulk of the airframe and control surfaces. That is why developing simple electromechanical actuators with higher mass-dimension values to replace the dominant hydraulic system is a topical scientific and technical problem. As of today, electric actuators are used to position the aircraft and control its high-lift devices. Use of such actuators is not being expanded because of the need to prolong the service life and improve the reliability of the mechanical portions of such actuator. One solution is to fix the position of the output arm and make it absorb aerodynamic loads taken.

Use of adaptive compliant wings with adjustable shape and geometry is a promising trend in modern aircraft building. Use of electric actuators with higher power and mass-dimension values to control adaptive compliant wings will reduce the flight weight and optimize the characteristics of the aircraft.

This electric actuator design implies using permanent magnet synchronous motors with position sensors, two-stage reducers, electromagnetic coupling, and feedback sensors. However, electromechanical actuators have a number of shortcomings due to less reliable mechanical gear, backlash, as well as high mechanical loads occurring under the effect of aerodynamic forces when the actuator operates in the passive mode.

For the electric actuator we are developing, the critical parameter is the actuator speed that mainly depends on the motor and the reducer in use.

The developed actuator design is not inferior to foreign-made electrohydraulic actuators and similar drives in terms of power and mass values.

Key words: aerodynamic forces, electromechanical actuator, actuator design, adaptive wing, aircraft.

Для управления полетом современного самолета используется широкий набор аэродинамических поверхностей (рисунок 1), для управления этими поверхностями применяются различного рода силовые приводы: гидравлические, пневматические и электрические. Наиболее перспективными в этом плане являются электроприводы ввиду простоты их конструкций и высоких массогабаритных показателей.

Усилия, необходимые для перемещения аэродинамической поверхности, для каждого самолета определяются площадью поверхности, а также режимами полета летательного аппарата.

Как видно из работы [1], электроприводы для управления рулевыми поверхностями самолета находят широкое применение и могут заменить гидравлические приводы, так как по своим параметрам они обеспечивают вполне конкурентные цифры. Так, при участии ФГУП «ЦАГИ» разработан и испытан линейный электропривод, предназначенный

для отклонения руля высоты самолета [2], в «МАИ» спроектирован электропривод руля направления вращательного и поступательного действия [3], в АО «Электропривод» разработаны несколько систем: электроприводы стабилизатора ЭПС-324 и триммирования ЭПТ-324 самолета Ту-324 [4]. В самолетах компании Embraer и Lockheed Martin применяются электроприводы стабилизатора.

Концепция построения системы электроприводов предполагает использование бесколлекторного электродвигателя с постоянными магнитами и датчиками положения совместно с двухступенчатым редуктором, электромагнитной муфтой и датчиками обратной связи. Однако электромеханические приводы имеют ряд недостатков: невысокая надежность механического редуктора, наличие люфтов, а также возникновение высоких нагрузок, обусловленных аэродинамическими силами в пассивном режиме работы привода.

На кафедре электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета разработаны конструктивные схемы, обеспечивающие повышение надежности и ресурса электропривода за счет снижения механических напряжений в пассивном режиме работы. В первом варианте (рисунок 2, а) снижение нагрузок осуществляется за счет демпфирования колебаний в пассивном режиме при помощи электромеханических демпферов, а во втором (рисунок 2, б) — при помощи упругой муфты. При этом компенсация электромеханическими демпферами не всегда нецелесообразна, так как для демпфирования больших механических нагрузок необходимы электромеханические демпферы с большими массогабаритными показателями.

На рисунке 2, а: 1 — корпус; 2 — шарико-винтовая пара; 3 — гайка шарико-винтовой пары, выполненная в виде двухстороннего конического зубчатого колеса; 4 — винт шарико-винтовой пары; 5 — упорный подшипник; 6 — электродвигатель; 7 — датчик положения ротора; 8 — система управления; 9 — электромеханические демпферы; 10 — зубчатые колеса; 11 — вал электродвигателя; 12 — коническое зубчатое колесо.

На рисунке 2, б: 1 — электродвигатель; 2 — датчики положения выходного звена; 3 — корпус; 4 — шарико-винтовая пара; 5 — гайка шарико-винтовой пары; 6 — винт шарико-винтовой пары; 7 — электромагнитная муфта сухого трения; 8 — аксиальный подшипник; 9 — упругая муфта.



Рисунок 1. Необходимые усилия для перемещения аэродинамических поверхностей магистрального самолета

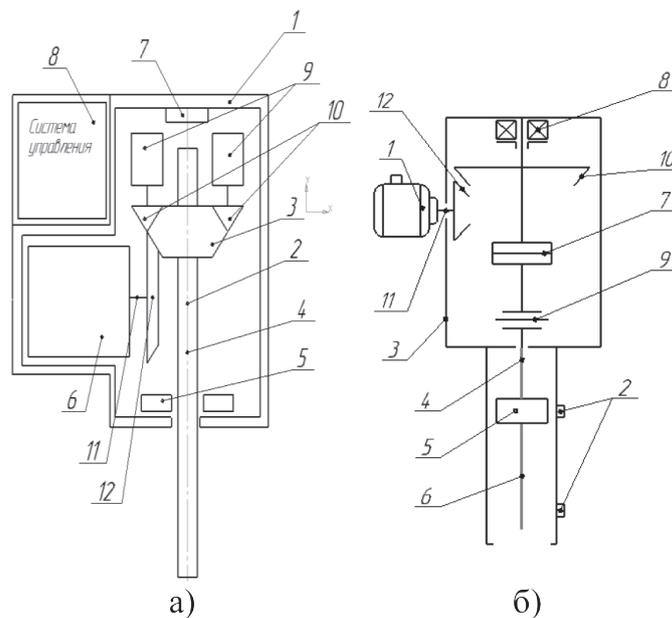


Рисунок 2. Конструктивные схемы электроприводов: с применением электромеханических демпферов (а), с применением упругой муфты (б)

Разработанный на основе предложенных конструктивных схем эскизный проект электропривода, представленный на рисунке 3, можно масштабировать на любые энергетические характеристики с соизмеримым увеличением массогабаритных показателей, а также сохранением параметров по быстродействию.

На рисунке 3: 1 — электродвигатель; 2 — коническо-цилиндрический редуктор; 3 — электромагнитная тормозная муфта; 4 — упругая муфта; 5 — гайка шарико-винтовой пары; 6 — винт шарико-винтовой пары; 7 — датчики положения выходного звена; 8 — выходное звено.

В разрабатываемом электроприводе критичным параметром является быстродействие, которое, в основном, определяется электродвигателем.

Разработанная конструкция электропривода не уступает по своим энергетическим и массовым показателям зарубежным электрогидравлическим приводам и приводам-аналогам и имеет быстродействие, соизмеримое с их показателями (таблица 1).

Электромеханические приводы с регулируемым электродвигателем и механическим редуктором применяются на самолётах:

— А-380 — для отклонения предкрылков и стабилизатора;

— Boeing 787 — приводы спойлеров и тормозов шасси;

— Ту-204 — приводы перемещения предкрылков и закрылков;

— АН-70 — приводы для выпуска и уборки закрылков;

— Ту-324 — привод стабилизатора и привод триммирования и регулирования загрузки рычагов систем управления.

Одной из перспектив развития в управлении самолетом на данный момент является улучшение характеристик крыла за счет выполнения механизации в виде единых элементов, в котором носовые и хвостовые части выполняются отклоняемыми, без ухудшения аэродинамического качества.

Деформируемая бесшовная поверхность создается с применением материалов, используемых в аэрокосмической отрасли: алюминия, титана, волокно-армированных полимерных композитов. При этом поверхность может перемещаться вверх или вниз в потоке встречного воздуха. На рисунке 4 показаны сечения аэродинамического профиля адаптивного крыла в различных положениях: при отклонении вверх, нейтральном положении и отклонении вниз.

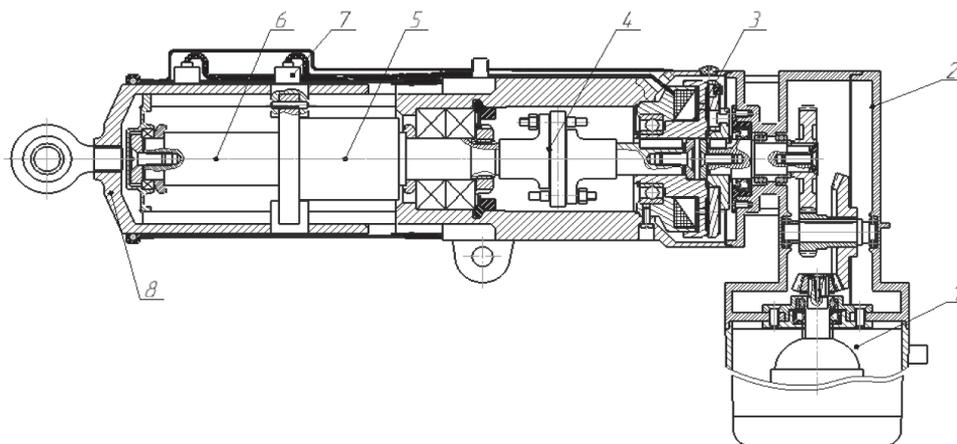


Рисунок 3. Конструкция электропривода

Таблица 1. Сопоставление параметров разработанной конструкции электропривода с другими типами приводов

	Разработанная конструкция	UTC Aerospace (установлены на F-35)	EBNA Liebherr (установлены на A-330)	МАИ (ММЗ Рассвет)	АО «Электропривод»
Масса, кг	17	48	48	20	2,7
Скорость, мм/с	120–134	90–110	90–110	91	10
Усилие, Н	15000	65000	70000	4600	3920



1 — жесткая конструкция; 2 — гибкая обшивка

Рисунок 4. Сечения аэродинамического профиля адаптивного крыла в различных положениях

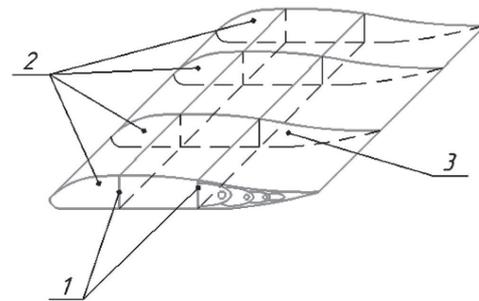
Данная технология применяется в самолетах фирмы Airbus в крыле с управляемой кривизной, на самолётах Boeing 787 для изменения кривизны задней части профиля крыла, в самолете Boeing X-53 по программе активного аэроупругого крыла. Разработками адаптивного крыла занимается компания FlexSys. Данной технологией был оснащён экспериментальный Gulfstream III.

Преимуществами адаптивных крыльев являются:

- экономия топлива за счет выигрыша в аэродинамическом качестве;
- снижение шума летательного аппарата из-за отсутствия щелей в механизации;
- высокая надежность (отсутствие подвижных частей в механизме изменения формы);
- снижение веса — масса самого крыла снижается за счет отказа от большого количества приводов;
- высокая эффективность управления аэродинамическими плоскостями при помощи электроприводов.

Существует несколько концепций адаптивных крыльев [5-7]. На рисунке 5 представлена одна из существующих конструкций. Основной задачей является нахождение конструкции, способной деформироваться и одновременно выдерживать аэродинамические нагрузки. Решение данной задачи заключается в разработке многопрофильной поверхности, которая состоит из жестких и гибких сегментов. При этом получается структура, которая остается эластично стабильной под действием внешних аэродинамических нагрузок.

В гибкой части имеется несколько последовательных блоков, соединенных друг с другом посредством шарниров, расположенных на линии аэродинамического профиля и управляемых электроприводами.



1 — лонжероны;
2 — нервюры с гибкими задними кромками;
3 — обшивка крыла

Рисунок 5. Концепция адаптивного крыла

Выводы

Подводя итог, следует отметить, что основная масса несущей системы самолета и рулевых поверхностей сосредоточена в силовых приводах. Поэтому разработка простых электромеханических приводов с высокими массогабаритными показателями на замену преобладающим гидравлическим системам является актуальной научно-технической задачей. В настоящее время электроприводы находят применение в системах управления положением самолета и механизацией крыла. Более широкое использование электроприводов в данном направлении задерживается из-за необходимости обеспечения ресурса и надежности механической части электропривода. Одним из решений данной проблемы является поглощение воспринимаемых аэродинамических нагрузок при фиксированном положении выходного звена.

Перспективным направлением в современном самолетостроении является применение адаптивного крыла с изменяемой формой и геометрией. Применение электроприводов с высокими энергетическими и массогабаритными показателями для управления адаптивными крыльями позволит снизить полетную массу и оптимизировать характеристики самолета.

Список литературы

1. Jensen S.C., Jenney G.D., Raymond B., Dawson D. Flight Test Experience with an Electromechanical Actuator on the F-18 Systems Research Aircraft // 19th Digital Avionics Systems Conference, October 7-13, 2000. 2000, Philadelphia, Pennsylvania.
2. Билялетдинова Л.Р., Стеблинкин А.И. Математическое моделирование электромеханического рулевого привода с шариковинтовой передачей с учетом нелинейности типа сухое трение и люфт // Электрификация летательных аппаратов: тр. науч.-техн. конф. М.: ИД Академии Жуковского, 2016. 332 с.
3. Кузьмичев Р.В., Ситин Д.А., Степанов В.С. Исполнительные механизмы петлеобразной формы для приводов самолетов с повышенным уровнем электрификации // Труды МАИ. 2011. № 45. С. 1–18.
4. Ерохин Д.В., Волокитина Е.В., Рубцова Л.А. Электропривод в системах уборки-выпуска и управления взлетно-посадочных устройств // Электроника и электрооборудование транспорта. 2013. № 3. С. 40–44.
5. Thill C., Etches J., Bond I., Potter K., Weaver P. Morphing skins // The aeronautical journal. March, 2008. Paper No. 3216.
6. Brailovski V., Terriault P., Georges T., Coutu D. SMA Actuators for Morphing Wings // Physics Procedia. December, 2010. P. 197–203.
7. Schorsch O., Lühring A., Nagel C., Pecora R., Dimino I. Polymer based morphing skin for adaptive wings // 7th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials.

References

1. Jensen S.C., Jenney G.D., Raymond B., Dawson D. Flight Test Experience with an Electromechanical Actuator on the F-18 Systems Research Aircraft // 19th Digital Avionics Systems Conference, October 7-13, 2000. 2000, Philadelphia, Pennsylvania.
2. Biljaletdinova L.R., Steblinkin A.I. Matematicheskoe modelirovanie jelectromehaničeskogo rulevogo privoda s sharikovintovoj peredachej s uchetom nelinejnosti tipa suhoe trenie i ljuft // Jelektrifikacija letatel'nyh apparatov: tr. nauch.-tehn. konf. M.: ID Akademii Zhukovskogo, 2016. 332 s.
3. Kuz'michev R.V., Sitin D.A., Stepanov V.S. Ispolnitel'nye mehanizmy petleobraznoj formy dlja privodov samoletov s povyshennym urovnem jelektrifikacii // Trudy MAI. 2011. № 45. S. 1–18.
4. Erohin D.V., Volokitina E.V., Rubcova L.A. Jelektroprivod v sistemah uborki-vypuska i upravlenija vzletno-posadochnyh ustrojstv // Jelektronika i jelektrooborudovanie transporta. 2013. № 3. S. 40–44.
5. Thill C., Etches J., Bond I., Potter K., Weaver P. Morphing skins // The aeronautical journal. March, 2008. Paper No. 3216.
6. Brailovski V., Terriault P., Georges T., Coutu D. SMA Actuators for Morphing Wings // Physics Procedia. December, 2010. S. 197–203.
7. Schorsch O., Lühring A., Nagel C., Pecora R., Dimino I. Polymer based morphing skin for adaptive wings // 7th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials.



Стыскин А. В.
Styskin A. V.

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



Уразбахтина Н. Г.
Urazbakhtina N. G.

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

УДК 621.314.075

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ САМОЗАПУСКА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД

Поскольку мощность электрических станций постоянно увеличивается и мощность электродвигателей собственных нужд (СН) также растет, то очень важно исследовать динамические характеристики двигателей собственных нужд, а именно пусковые характеристики не только при включении, но и характеристики выбега и самозапуска после кратковременного по времени аварийного отключения электрической сети или глубокой посадки напряжения до некоторого остаточного значения, т.е. исследовать способность электродвигателя или группы электродвигателей восстанавливать нормальный режим работы без вмешательства персонала.

В связи с этим был проведен анализ и исследование вопросов самозапуска электродвигателей собственных нужд путем имитационного моделирования режимов работы одного асинхронного двигателя повышенной мощности и группы двигателей (совместно) с различного вида нагрузкой на валу для обеспечения их динамической устойчивости при кратковременных перерывах электроснабжения. На основании проведенного анализа была разработана методика проверки успешного самозапуска электродвигателей собственных нужд. Разработанная имитационная модель может применяться как для исследования самозапуска единичного двигателя, так и для исследования поведения группы двигателей (более двух). Модель включает в себя модели асинхронных двигателей как наиболее часто применяемых для агрегатов собственных нужд, блоки нагрузки с переменными параметрами, а также модель источника питания, имитирующую сеть неограниченной мощности с возможными аварийными ситуациями во времени, от полного отсутствия напряжения до некоторого остаточного значения. Разработанная компьютерная имитационная модель для исследования электромагнитных процессов, происходящих при самозапуске асинхронных двигателей СН, обладает довольно простой структурой, что облегчает работу практическому пользователю. При всей простоте компьютерная модель позволяет: осуществить проверку правильности выбора асинхронных двигателей СН и нагрузочных механизмов по мощности, проверив потребляемый ток и время выбега; проверить обеспеченность успешного самозапуска как одиночных двигателей, так и группового самозапуска (более двух в группе) и выбрать рациональное время ступенчатого включения, на основании этой проверки выявить агрегаты, которые не обеспечивают самозапуск, и подключить к ним автоматику; осуществить проверку самозапуска группы асинхронных двигателей СН не только на нормированной паузе напряжения питания, но и при других возможных временах аварии, изменяя заданное время таймера включения.

Ключевые слова: асинхронный двигатель собственных нужд, самозапуск, имитационное моделирование, пуск, выбег, самозапуск, вентиляторная нагрузка.

MODELING AND ANALYSIS OF OPPORTUNITIES SELF INDUCTION MOTORS OWN NEEDS

Since the power of power stations is constantly increasing, power of electric motors of own needs is also increasing, it is important to explore the dynamic characteristics of the engine's own needs, namely, starting performance not only at startup, but also the characteristics of run-down and self after a short time of emergency power outage or deep planting voltage up to some residual value, i.e., the ability of the electric motor or motors group to restore normal operation without human intervention.

In this connection, an analysis of and study on their own self-starting motor needs (SN) through simulation modeling performance levels of high-power induction motor and the engine group, together with various types of load on the shaft to ensure their dynamic stability during short interruptions of power supply. method of verification of successful self-starting motor own needs has been developed on the basis of the analysis. The developed simulation model can be used for self-study of a single motor, and to study the behavior of a group of engines (more than two). The model includes a model of induction motors, the most commonly used units for their own use, load units with variable parameters, as well as the power supply model simulates unlimited capacity network with possible emergencies in time, from the total absence of residual voltage to a certain value.

Developed a computer simulation model for the study of electromagnetic processes occurring during the self-induction motors, has a relatively simple structure that facilitates the work of the practical user. Despite the simplicity of a computer model, you can: to verify the correctness of the choice of induction motors HF and loading mechanisms for power, check the current consumption and run-time; check to ensure the successful self as a single engine and group self (more than two per group) and choose a time efficient step-inclusion on the basis of this test to identify the units that do not provide self-starting and connect them to the automation; to verify the self-SN group of asynchronous motors not only on hiatus normalized supply voltage, but also at other times of possible accident, change the time on-time.

Key words: asynchronous motor's own needs, self-starting, simulation, commissioning, run-on, self-starting, fan load.

Автономность мощных энергоблоков электростанций требует решения вопросов надежности работы агрегатов его собственных нужд (СН) как относительно самих схем электропитания, так и надежности работы механизмов СН в переходных и аварийных режимах. В связи с этим, актуальным является вопрос о возможности и способах обеспечения самозапуска ответственных электромеханизмов, в частности, электродвигателей (ЭД) собственных нужд электростанций [1, 2].

Вид и исполнение электродвигателя привода, управляющего механизмами СН большой мощности на электрических станциях, зависит от назначения, ответственности и места установки агрегата. При этом важно исследовать динамические характеристики двигателей СН, т.е. пусковые характеристики при включении, выбеге и самозапуске в аварийных режимах работы. В связи с этим необходимо решение вопроса устойчивого самозапуска электродвигателей после огра-

ниченного по времени аварийного отключения электрической сети или резкого снижения напряжения до некоторой остаточной величины, т.е. способность ЭД или группы ЭД восстанавливать нормальный режим работы без вмешательства персонала.

Для обеспечения безаварийной работы агрегатов и механизмов СН требуется проведение либо тщательного расчетного, либо экспериментального исследования указанных режимов их работы, возникающих при аварийных ситуациях (коротких замыканиях, переключениях источников питания, пусках, переключениях ЭД и др.). До настоящего времени теоретические расчёты самозапуска ЭД СН проводятся по механическим характеристикам или по математическим моделям тепловых процессов [1, 3, 4]. На основании этих расчетов делается вывод об успешности или неуспешности самозапуска, а также намечаются мероприятия, которые бы облегчили условия самозапуска. Как правило, подобные расчеты трудоёмки и неточны

вследствие значительных упрощений физических процессов, происходящих в электрических двигателях.

Данные о самозапуске, полученные практическим путем при испытаниях электродвигателей СН, также обладают недостаточными информативными возможностями из-за невозможности вывода испытываемой части оборудования из работы, а также ограниченностью возможных ситуаций самозапуска ЭД СН. Имеются единичные работы, посвященные моделированию поведения оборудования СН, состоящие из сложных фундаментальных программных комплексов, выполняющих кроме расчетов самозапуска ЭД расчеты исходного установившегося режима, режима короткого замыкания, группового выбега ЭД и группового самозапуска ЭД после восстановления нормального режима [5]. Не каждому энергетическому предприятию разработка или приобретение подобного комплекса по силам с финансовой точки зрения.

В настоящей статье приведены результаты исследования вопросов самозапуска электродвигателей собственных нужд электрических станций путем математического и имитационного моделирования режимов работы одного асинхронного двигателя повышенной мощности или группы двигателей совместно с различного вида нагрузкой на валу для обеспечения их динамической устойчивости при кратковременных перерывах электроснабжения. Ранее авторами было проведено исследование поставленной задачи в среде MATLAB & Simulink [6]. Однако на практике подобная модель вызывала затруднения в связи со сложной структурой. Поэтому для упрощения восприятия решения задачи в качестве среды моделирования был выбран прикладной пакет MATLAB & Simulink & SimPowerSystems, в котором была реализована не только модель асинхронного двигателя повышенной мощности с постоянной и вентиляторной нагрузкой, которая обычно присутствует у двигателей СН, но и получить модель системы электропитания при аварийной ситуации как по времени, так и по величине проседания напряжения.

Моделирование проводилось для двигателя марки 4А3М-160, параметры которого следующие: $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; мощность двигателя $P_{\text{ном}} = 16000$ кВт; номинальный ток $I_{\text{н}} = 107$ А;

частота $f = 50$ Гц; число оборотов в минуту $n_{\text{ном}} = 1500$ об./мин; число пар полюсов статора $p_{\text{н}} = 2$; сопротивление обмотки статора $R_1 = 0,5$ Ом; приведенное сопротивление обмотки ротора $0,58$ Ом; собственная индуктивность обмотки статора $L_1 = 0,02$ Гн; приведенная собственная индуктивность обмотки ротора $L_2 = 0,0003$ Гн; взаимная индуктивность обмоток статора и ротора $L_{12} = 1,06$ Гн; момент инерции $J = 30$ кг·м².

Для обеспечения самозапуска необходимо правильно выбрать мощность неотключаемых двигателей ответственных механизмов, исходя из условия возможности их самозапуска, т.е. обеспечить при самозапуске такое восстанавливающееся напряжение, чтобы двигатели смогли развернуться до нормальной скорости при допустимом дополнительном нагреве их обмоток.

Для двигателей с ответственными нагрузками самозапуск, согласно нормам времени, должен быть произведен сразу же после аварии, т.е. в горячем состоянии, через 2,5 с. В зависимости от класса изоляции обмоток статора превышение температуры двигателя может быть принято 135 °С.

За время пуска двигателя СН потребляют от сети ток в 4–5 раз больше $I_{\text{ном}}$. Допускается, что двигатели СН питаются, как правило, от сети неограниченной мощности, и дополнительное падение напряжения в трансформаторе питания имеет небольшую величину, поэтому считается, что запуск единичного двигателя происходит при напряжении $U_{\text{ном}}$. Если выдержана норма времени аварийного состояния и единичный двигатель обеспечивает самозапуск из горячего состояния, то время самозапуска должно быть меньше времени пуска, и превышение температуры не будет выше допустимого независимо от типа нагрузки.

Если же авария длится более нормированного времени, или двигатель СН имеет нагрузку более номинальной, или не выполняются требования в групповом запуске (включение реакторов в цепь статора каждого двигателя, обеспечивающего для группы двигателей условия как для единичного), то выбег двигателей может закончиться их остановкой.

В этом случае самозапуск длится дольше, чем пуск, при этом обмотки двигателя нагре-

ваются. Поэтому успешным считается такой самозапуск, когда выбег двигателя не оканчивается остановкой, после восстановления питания двигателя разгонятся до рабочей скорости, при этом температура обмоток не превысит допустимого значения.

Основные допущения, принятые при моделировании:

— время аварии (отсутствия напряжения питания двигателей) — 2,5 с;

— двигатели одинаковой мощности, отличающиеся типом нагрузки (постоянная и вентиляторная);

— при групповом запуске двух двигателей в цепь статора была введена индуктивность реактора;

— основным пакетом моделирования был выбран пакет структурного моделирования электротехнических устройств и систем в Simulink SimPowerSystems, позволяющий моделировать сложные многодвигательные системы;

— пуск и самозапуск двигателей осуществляется совместно с нагрузкой на валу;

— при групповом пуске включение двигателей осуществляется ступенчато.

На рисунке 1 показана структурная схема для моделирования самозапуска единичного асинхронного двигателя с вентиляторной и постоянной нагрузками.

Подсистемы 1, 2, 3 (рисунок 2) представляют собой три идеальных ключа, программируемых с помощью таймера, с помощью которых задается время прерывания напряжения — время аварии. На рисунке 3 показаны осциллограммы, снятые на модели при разной величине вентиляторной нагрузки.

На рисунке 4 представлена структурная схема моделирования группового самозапуска асинхронных двигателей СН, на рисунке 5 показаны осциллограммы, снятые при моделировании.

Пуск двигателей осуществляется со сдвигом во времени на 1,1 с, время аварии и восстановление напряжения зафиксировано через 3,5 с. Двигатели нагружены вентиляторной нагрузкой как наиболее часто применяемой для двигателей СН. Нагрузка второго двигателя в два раза больше, чем у первого.

Осциллограммы показывают, что самозапуск обоих двигателей успешный, время самозапуска меньше, чем при пуске, т.к.

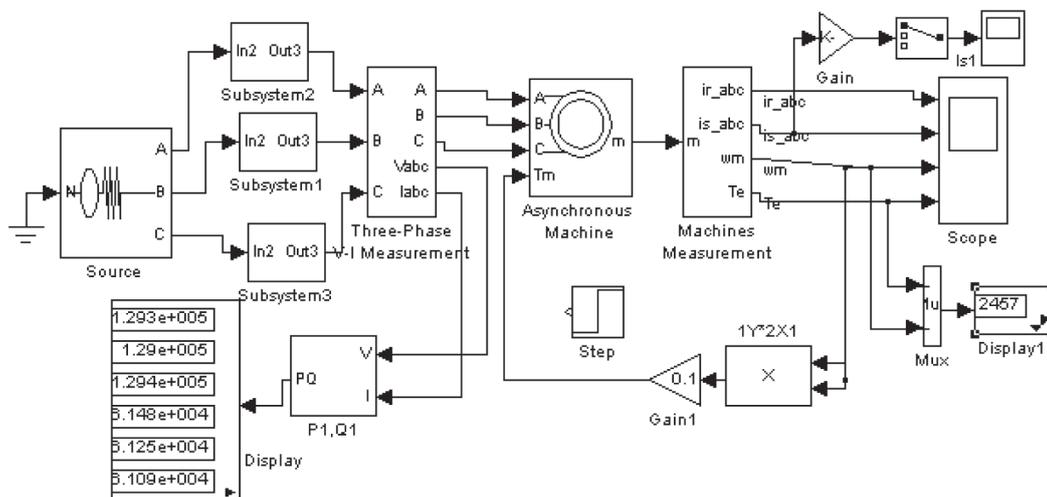


Рисунок 1. Структурная схема моделирования самозапуска единичного асинхронного двигателя

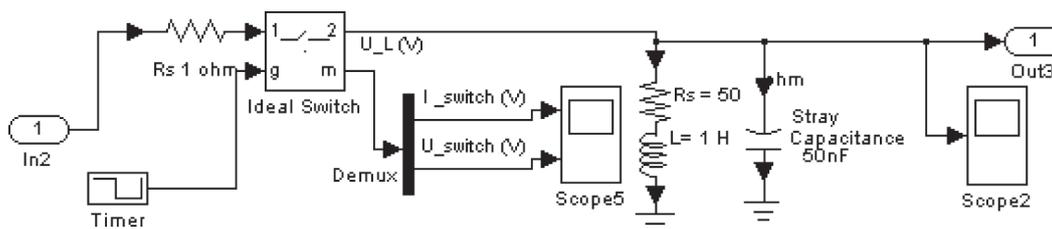


Рисунок 2. Структурная схема модели, имитирующей аварию на электростанции с последующим включением

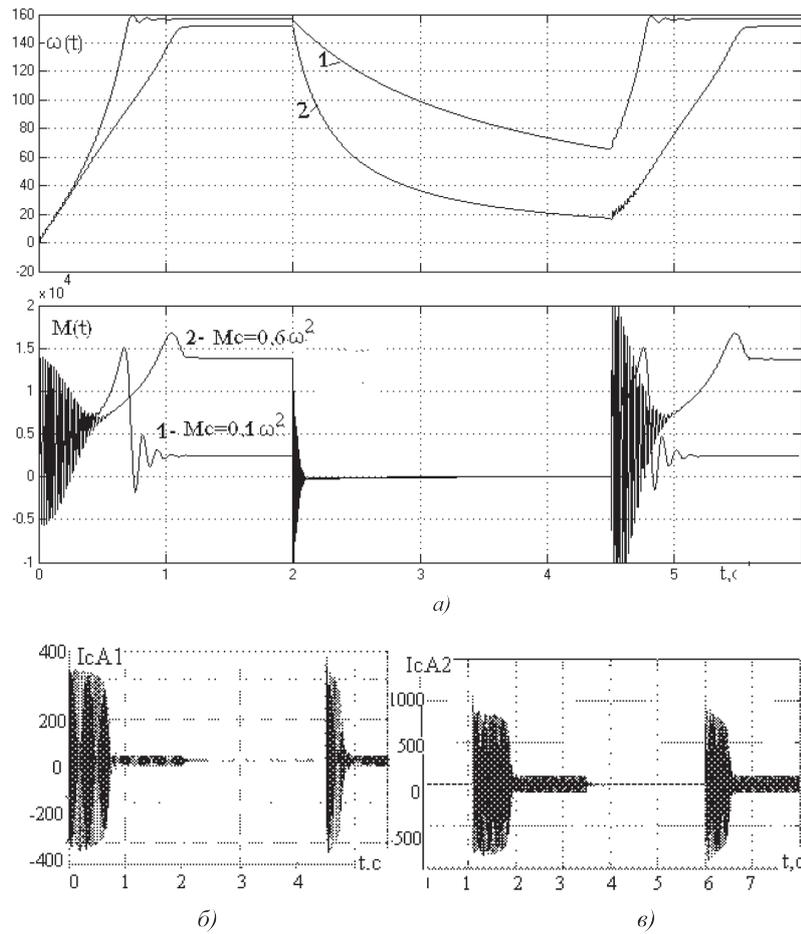


Рисунок 3. Осциллограммы единичного самозапуска асинхронного двигателя с вентиляторной нагрузкой $M_c = 0.1\omega^2$: $\omega(t)$, $M(t)$ (а); $I_{cA}(t)$ (при нагрузке $M_c = 0.1\omega^2$) (б); $I_{cA}(t)$ (при нагрузке $M_c = 0.6\omega^2$) (в)

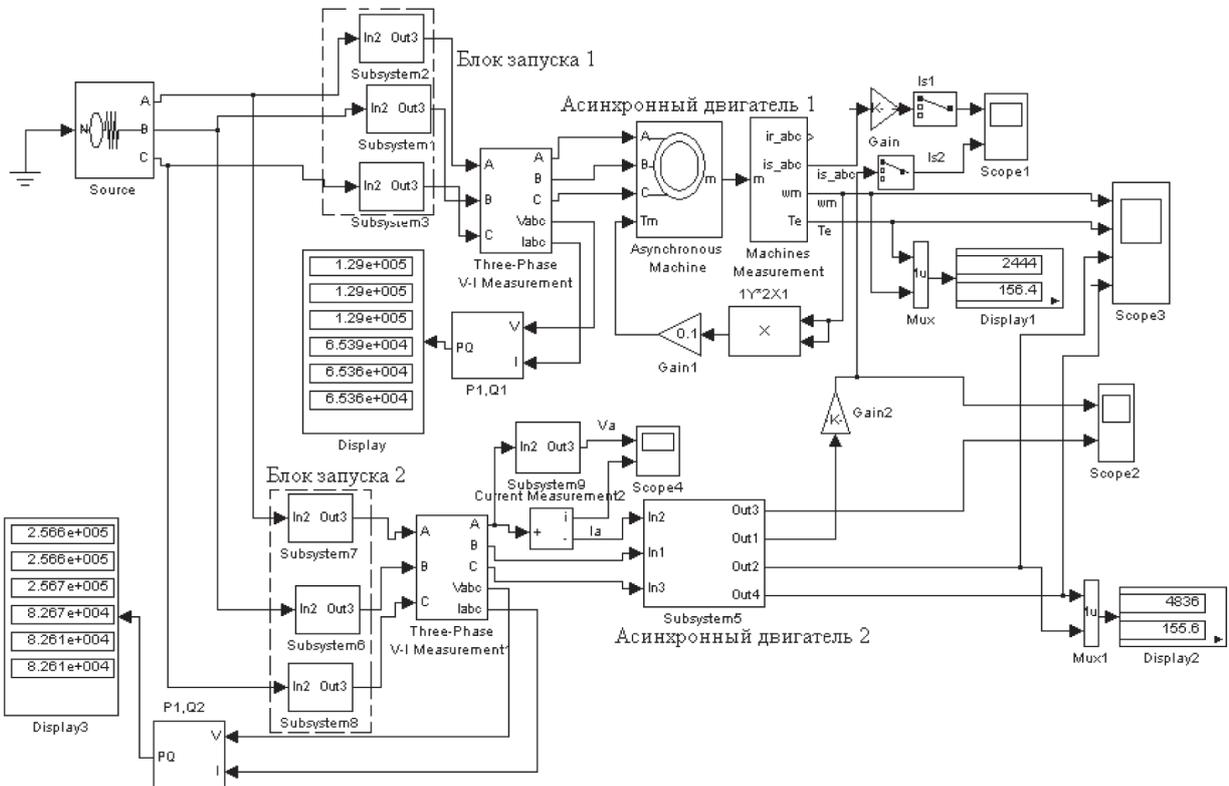


Рисунок 4. Структурная схема моделирования группового самозапуска асинхронных двигателей

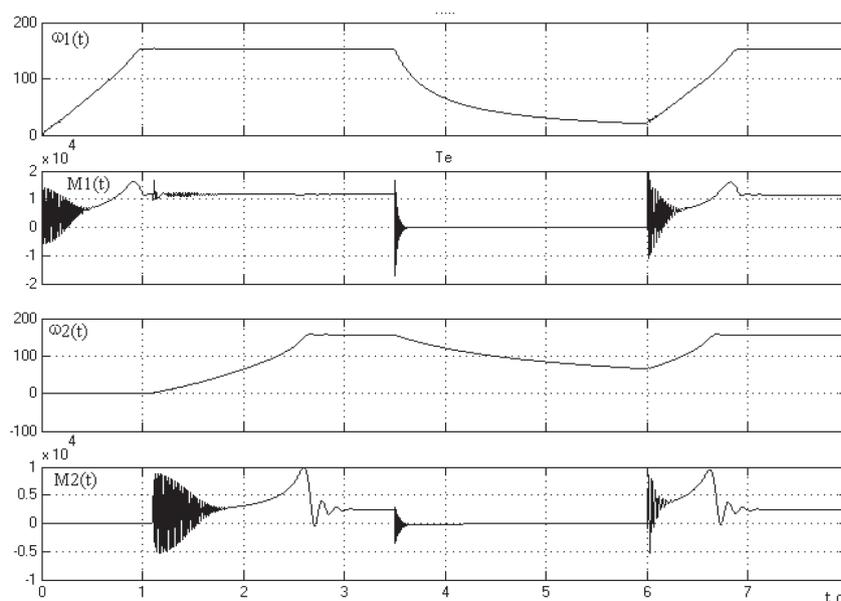


Рисунок 5. Осциллограммы группового самозапуска асинхронных двигателей с вентиляторной нагрузкой

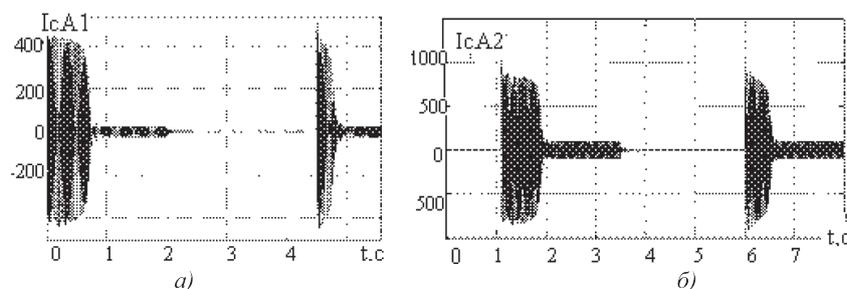


Рисунок 6. Осциллограммы токов статора двух двигателей при самозапуске: ток статора менее нагруженного первого двигателя (а); ток статора более нагруженного второго двигателя (б)

самозапуск происходит при горячем состоянии двигателей. Осциллограммы фазных токов, приведенные на рисунке 6, показывают, что токи при выбеге и при самозапуске не превышают номинальных значений как по величине, так и по времени, что тоже говорит об успешном самозапуске.

Выводы

Разработанная компьютерная имитационная модель для исследования электромагнитных процессов, происходящих при самозапуске асинхронных двигателей СН, обладает довольно простой структурой, что облегчает работу практическому пользователю. При всей простоте компьютерная модель позволяет:

1) осуществить проверку правильности выбора асинхронных двигателей СН и нагру-

зочных механизмов по мощности, проверив потребляемый ток и время выбега;

2) проверить обеспеченность успешного самозапуска как одиночных двигателей, так и группового самозапуска (более двух в группе) и выбрать рациональное время ступенчатого включения, на основании этой проверки выявить агрегаты, которые не обеспечивают самозапуск и подключить к ним автоматику;

3) осуществить проверку самозапуска группы асинхронных двигателей СН не только на нормированной паузе напряжения питания, но и при других возможных временах аварии, изменяя заданное время таймера включения.

Список литературы

1. Курбангалеев У.К. Самозапуск двигателей собственных нужд электростанций. М.: НТФ Энергопрогресс, 2001. 64 с.
2. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1985. 136 с.
3. Эрнст А.Д. Самозапуск асинхронных электродвигателей: учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. 46 с.
4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учеб. для электроэнергетических вузов. М.: Высш. шк., 1985. 536 с.
5. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л.Г. Мамиконянца. М.: Энерглатомиздат, 1984. 240 с.
6. Георгиади В.Х. Поведение энергоблоков ТЭС при перерывах электроснабжения собственных нужд. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2003. 88 с.
7. Стыскин А.В., Уразбахтина Н.Г., Шуртаева О.К. Исследование самозапуска асинхронного двигателя на имитационных моделях // Энергетические и электротехнические системы: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2015. Вып. 2. С. 195–204.

References

1. Kurbangaleev U.K. Samozapusk dvigatelej sobstvennyh nuzhd jelektrostancij. M.: NTF Jenergoprogress, 2001. 64 s.
2. Golodnov Ju.M. Samozapusk jelektrodvigatelej. M.: Jenergoatomizdat, 1985. 136 s.
3. Jernst A.D. Samozapusk asinhronnyh jelektrodvigatelej: uchebn. posobie. Omsk: Izd-vo OmGTU, 2006. 46 s.
4. Venikov V.A. Perehodnye jelektromehpnicheskie processy v jelektricheskijh sistemah: ucheb. dlja jelektrojenergeticheskijh vuzov. M.: Vyssh. shk., 1985. 536 s.
5. Syromjatnikov I.A. Rezhimy raboty asinhronnyh i sinhronnyh dvigatelej / Pod red. L.G. Mamikonjanca. M.: Jenerglatomizdat, 1984. 240 s.
6. Georgiadi V.H. Povedenie jenergoblokov TJeS pri pereryvah jelektrosnabzhenija sobstvennyh nuzhd. M.: NTF «Jenergoprogress», 2003. 88 s.
7. Styskin A.V., Urazbahtina N.G., Shurtaeva O.K. Issledovanie samozapuska asinhronnogo dvigatelja na imitacionnyh modeljah // Jenergeticheskie i jelektrotehnicheskie sistemy: mezhvuz. sb. nauch. tr. Magnitogorsk: Magnitogorsk.gos.tehn. un-t im. G.I. Nosova, 2015. Vyp. 2. S. 195–204.



Artyushenko V. M.
Артюшенко В. М.

*Doc. Sci. Tech., Professor,
Head of «Information Technology and Control
Systems» Chair, FSBEI HE
«Technological University»,
Korolev MR, Russian Federation*



Volovach V. I.
Воловач В. И.

*Doc. Sci. Tech., Associate Professor, Head
of Information and Electronic Service Chair,
FSBEI HE «Volga Region State
University of Service»,
Togliatti, Russian Federation*

UDC 621.396.96

APPLYING OF DOPPLER SIGNAL AMPLITUDE SELECTION FOR MEASURING OF EXTENDED OBJECTS MOTION SPEED

The article considers the applying of amplitude selection of the Doppler signal used to determine the speed of motion of extended objects by short-range radiolocation devices. The task of using the channel of speed measurement in extended objects detectors is justified. It is shown that to solve the above-mentioned task the threshold method of processing the Doppler signal can be used, where only the part of the signal that has the amplitude exceeding some specified value is subjected to demodulation. The main statistical characteristics of the instantaneous frequency of a signal depending on the threshold of processing are considered and the gain in measurement accuracy achieved by that is estimated.

The existence of statistical relationships between random deviations of frequency of the processed signal and values of its envelope is shown. The expression for conditional density of probability distribution of frequency at which the values of the envelope of the signal exceed the specified threshold is given; the graphs of corresponding dependencies are presented. It is shown that the average value of the absolute deviation of signal frequency is inversely proportional to the relative level of its envelope.

The error in measurement of frequency of the processed signal is estimated. It is shown that the relative RMS value of the error for instantaneous frequency is determined as a function of threshold voltage. The correlation between the duration of the processed signal and the total duration of implementation is obtained. The rational value of threshold voltage is found. The expression determining the RMS relative error in determination of instantaneous speed is given.

The spectral density of the frequency of the processed signal in the threshold mode of demodulation is analyzed. It is shown that the variance of the frequency of the Doppler signal in this mode is finite and decreases with the threshold increase. The values of its correlation function at zero, in contrast to non-threshold demodulation, are finite and will decrease with the increase of threshold voltage.

It is shown that the spectral density of instantaneous frequency fluctuations at zero, which is the integral of the correlation function, also will decrease with the threshold increase. The obtained expression of correlation function of the instantaneous frequency through the use of mathematical modeling is analyzed.

It is shown that the estimate of the spectral density of a random component of the instantaneous frequency of the signal can be found in two ways: using Fourier-transform of the correlation function and using the method of Cooley-Tuckey. The graphical dependencies of the families of correlation functions of a random frequency and a spectral density of frequency for different threshold values are presented. It is shown that the increase of the threshold leads to a narrowing of the spectrum and also to the decrease of its absolute values at the respective frequencies.

As a result of the theoretical and numerical analysis, the estimates of a potentially achievable accuracy of measurement of motion parameters of extended objects by Doppler short-range detection devices in the threshold mode of demodulation are given. It is proved that the introduction of amplitude threshold in contrast to the non-threshold demodulation of the Doppler signal allows us not only to obtain the final values of variance of the estimation of motion speed of an extended object in a broad band of frequencies, but also to reduce spectral components of phase noise.

Key words: amplitude selection, threshold method, Doppler signal, extended object, statistical characteristics of instantaneous frequency, frequency measurement accuracy, spectral density of frequency.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АМПЛИТУДНОЙ СЕЛЕКЦИИ ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

В статье рассмотрено использование амплитудной селекции доплеровского сигнала, используемой при определении скорости движения протяженных объектов радиотехническими устройствами ближнего действия. Обоснована задача применения канала измерения скорости в обнаружителях объектов. Показано, что для решения названной задачи может быть использован пороговый способ обработки доплеровского сигнала, при котором демодуляции подвергается только часть сигнала, имеющая амплитуду, превышающую некоторое заданное значение. В статье рассмотрены основные статистические характеристики мгновенной частоты обрабатываемого сигнала в зависимости от порога и определена оценка достигаемого при этом выигрыша в точности измерения.

Показано существование статистической связи между случайными отклонениями частоты обрабатываемого сигнала и значениями его огибающей. Получено выражение для условной плотности вероятности частоты, при которой значения огибающей сигнала превышают некоторый заданный порог; приведены соответствующие графики зависимостей. Показано, что среднее значение модуля отклонений частоты сигнала обратно пропорционально относительному уровню его огибающей.

Произведена оценка погрешности измерения частоты сигнала. Показано, что относительное среднеквадратичное значение ошибки для мгновенной частоты определяется как функция порогового напряжения. Получена зависимость между длительностью полезного сигнала и общей длительностью реализации. Установлено рациональное значение уровня порогового напряжения. Приведено выражение для определения среднеквадратичной относительной ошибки определения мгновенной скорости.

Осуществлен анализ спектральной плотности частоты обрабатываемого сигнала в пороговом режиме демодуляции. Показано, что дисперсия частоты доплеровского сигнала в этом режиме конечна и падает с ростом порога. При этом, значения ее корреляционной функции в нуле, в отличие от беспороговой демодуляции, также конечны и будут падать с ростом порогового напряжения.

Показано, что спектральная плотность флуктуаций мгновенной частоты в нуле, представляющая собой интеграл от корреляционной функции, будет падать в функции порога. Осуществлен анализ полученного выражения корреляционной функции мгновенной частоты посредством использования машинного моделирования.

Показано, что оценка спектральной плотности случайной компоненты мгновенной частоты сигнала может быть найдена двумя способами: через Фурье-преобразование корреляционной функции и с помощью метода Кули и Тьюки. В качестве результатов проведенного численного анализа представлены графические зависимости семейств корреляционных функций случайной частоты и спектральной плотности частоты при различных величинах порога. Увеличение порога приводит как к сужению спектра, так и к уменьшению всех его абсолютных значений на соответствующих частотах.

В результате проведенных теоретического и численного анализов даны оценки потенциально достижимой точности измерения параметров движения протяженных объектов доплеровскими устройствами обнаружения ближнего действия в пороговом режиме демодуляции. Доказано, что введение амплитудного порога в отличие от беспороговой демодуляции доплеровского сигнала позволяет получить конечные значения дисперсии оценок

скорости движения протяженного объекта в широкой полосе частот и уменьшает все спектральные компоненты фазового шума.

Ключевые слова: амплитудная селекция, пороговый способ, доплеровский сигнал, протяженный объект, статистические характеристики мгновенной частоты, погрешность измерения частоты, спектральная плотность частоты.

Introduction

In [1] was noted that short-range radio location devices (SRRLD) may be optimized primarily by adaptation. One of the ways of adaptation is possible through speed measuring of detected object if the detection is fulfilled on the basis of Doppler signal processing. As a result, in addition to detection SRRLD will perform the function of speed meter. Speed measurement (in a wide sense the parameters of movement of the object such as acceleration, the geometric sizes of the object, location) lets us solve the task of object detection of short-range radiolocation devices more accurately, for example we get some extra data about the object including spectrum of detection signal [2-5]. It also lets us predict its behavior in relation to boundaries of the detection area. In many cases, the measurement of the parameters of motion of the object is a separate task [6-13].

Next some aspects of the implementation of the speed measurement channel that can supplement regular SRRLD will be studied.

1. Problem statement

It is known [14, 15], that the presence of multiple «shiny» points in the measuring volume and their random position leads to significant fluctuations in the Doppler signal frequency, which is the measure of speed. These fluctuations, called phase noise [16] can reach significant values and significantly limit the accuracy of speed estimation.

Analysis of the instantaneous frequency of Doppler signal, received from two «shiny» points moving with the same speed, showed that its maximum values correspond to the minimum amplitude and, on the contrary, for large values of the envelope of the signal its frequency almost does not change.

Based on these results, threshold method of Doppler signal processing was proposed and implemented [17], which means that only that part is subject to demodulation, amplitude of which lies above a preassigned threshold. The

speed values in intermediate moments of time are determined by interpolation of demodulation results.

Consider the basic statistical characteristics of instantaneous frequency depending on the threshold and assessment of win in the measurement accuracy achieved in this case.

The task is solved for the Doppler signal, the model for which is narrowband normal random process of the type

$$\xi(t) = U(t) \cos[\omega_0 t - \varphi(t)], \quad (1)$$

where $U(t)$ is envelope signal, ω_0 is carrier frequency, $\varphi(t)$ is function reflecting the law of phase (frequency) modulation.

2. Statistical characteristics of instantaneous frequency

First, let us find a statistical relation between random deviations of the frequency $\varphi(t)$ and the values of the envelope $U(t)$. Two-dimensional probability density of values φ and U can be found on the basis of the known expression [18] for four-dimensional probability density

$$W_4(U, \dot{U}, \varphi, \dot{\varphi}) = (U^2/4\pi^2\sigma^4(-\rho_0'')) \times \exp\left\{-\left[U/2\sigma^2(-\rho_0'')\right][(-\rho_0'')U^2 + \dot{U}^2 + U^2\varphi^4]\right\}, \quad (2)$$

where the dispersion of the process (1) is σ^2 , the value of the second derivative of the correlation coefficient at zero is ρ_0'' .

It is considered that $\rho_0''(0) = \Delta\omega^2$, where $D\omega$ is half-width of the Doppler signal range on the level $e^{-1/2}$ of its maximum. Integrating (2) for U and φ within the range $-\infty, +\infty$ for U and $-\pi, +\pi$ for φ , we will get

$$W_2(U, \dot{\varphi}) = (U^2/\sqrt{2\pi}\sigma^3\sqrt{-\rho_0''}) \times \exp\left\{-U^2/2\sigma^2\right\} \exp\left\{-U^2\varphi^2/2\sigma^2(-\rho_0'')\right\}.$$

Moving to a new relative variable

$$z = U/\sigma\sqrt{2} = \left[U^2/\langle U^2 \rangle\right]^{1/2},$$

where $\langle U^2 \rangle = 2\sigma^2$ is the average square of the envelope, we are getting

$$W_2(\dot{\varphi}, z) = (2\delta^2/\sqrt{\pi}\Delta\omega) \exp\left\{-z^2(\Delta\omega^2 + \dot{\varphi}^2)/\Delta\omega^2\right\}. \quad (3)$$

On the basis of this expression we will find the conditional density of frequency probability

$W_2(\phi|z=z_{tr})$, when the values of the signal envelope exceed a preset threshold $z_{tr} = U_{tr}/\langle U^2 \rangle^{1/2}$. By the definition [19] we can write

$$W_2(\phi|z=z_{tr}) = W_2(\phi, z_{tr})/W(z_{tr}). \quad (4)$$

Then

$$W_z(\phi|z \geq z_{tr}) = \int_{z_{tr}}^{\infty} W_z(\phi, z) dz / \int_{z_{tr}}^{\infty} W(z) dz, \quad (5)$$

where $W(z)$ is one-dimensional density probability of the relative envelope.

In accordance with [18]

$$W(z) = 2z \exp(-z^2). \quad (6)$$

Substituting (4) and (6) in (5) and introducing the new relative variable $y = \phi/\Delta\omega$ [20], we are getting

$$W_2(y|z \geq z_{tr}) = (1/\sqrt{\pi}) \exp(z_{tr}^2 y^2) (1+y)^{-3/2} \Gamma(3/2, x).$$

Here $x = z_{tr}^2 (1+y^2)$; $\Gamma(3/2, x)$ is incomplete gamma function.

A family of probability densities of instantaneous frequency fluctuations for different levels z_{tr} is shown in Figure 1.

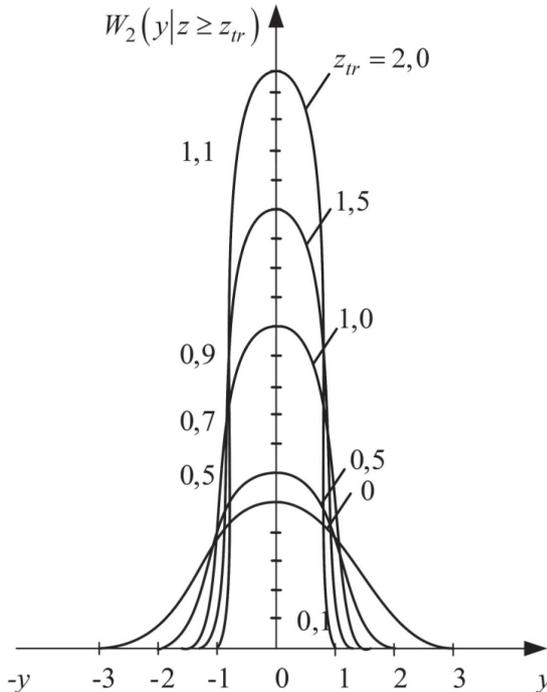


Figure. 1. The dependence of the probability densities of instantaneous frequency fluctuations from the value of the specified threshold level

The graphs show that with the increase of the threshold levels z_{tr} the probability of large deviations of the frequency sharply decreases and probability of small deviations increases. Therefore, the value of root-mean-square error with the increase z_{tr} should decrease. Of interest is the finding of a regression line that establishes a dependence of the expected value of the

module of the frequency deviations from the preset value of the envelope. By definition

$$m\{|y|\} = \int_{-\infty}^{\infty} |y| W(y|z=z_1) dy = 2 \int_0^{\infty} y W(y|z=z_1) dy, \quad (7)$$

where m is the symbol of the expected value, $W(y|z=z_1)$ is the density of frequency probability with set value z_1 . Substituting in (7) value $W(y|z=z_1)$ which, in accordance with (4) is equal to

$$W(y|z=z_1) = (z_1/\sqrt{\pi}) \exp\{-z_1^2 y^2\},$$

we will get

$$m\{|y|\} = 1/(z_1 \sqrt{\pi}). \quad (8)$$

As follows from (8), the mean value of the modulus of the frequency deviations is related to the relative level of the envelope z_1 with inversely proportional dependence. The obtained results are the theoretical basis for the method of reducing the phase noise through amplitude selection of the Doppler signal.

3. Estimation of frequency measurement error

The dependence of the dispersion of deviations from the threshold frequency can be found from the ratio

$$\sigma_{tr\phi}^2 = \langle \phi_{tr}^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi^2 W_2(z, \phi) d\phi dz / \int_{-\infty}^{\infty} W(z) dz,$$

where values $W_2(z, \phi)$ and $W(z)$ are determined by the expressions (3) and (6).

With regard to the latter, we can write

$$\sigma_{tr\phi}^2 = \langle \phi_{tr}^2 \rangle = (1/2) \Delta\omega^2 \exp(z_{tr}^2) E_1(z_{tr}^2) \quad (9)$$

where E_1 is the integral exponential function.

The relative root-mean square value of error for the instantaneous frequency as a threshold function can be easily found from (9):

$$\sigma_{tr\phi} / \omega_D = \sqrt{\langle \phi^2 \rangle} / \omega_D = (\Delta\omega / \sqrt{2} \omega_D) \exp(z_{tr}^2/2) \sqrt{E_1(z_{tr}^2)}.$$

Introducing the designation $\Delta\omega = \omega_D / M\pi$, we will get:

$$\delta_{\omega} = \sigma_{tr\phi} / \omega_D = (1/\sqrt{2} M\pi) \exp(z_{tr}^2/2) \sqrt{E_1(z_{tr}^2)}, \quad (10)$$

where M is any positive integer.

Analysis of the dependence (10) shows that the mean square error at first decreases rapidly with the increase of the threshold, and then its steepness decreases.

On the basis of the expression (6) it is easy to get the ratio between the length of τ_{us} of the useful signal and the total duration of the implementation τ_0 :

$$\tau_{us}/\tau_0 = \int_{z_{tr}}^{\infty} W(z) dz / e \int_0^{\infty} Wz(z) dz = \left(-\frac{2}{z_{tr}}\right), \quad (11)$$

where $z_{tr}^2 = U_{tr}^2 / \langle U^2 \rangle$.

From the analysis of the dependence (11) follows that if with $z_{tr} = 1$ the duration of the useful signal is 0,37 % from the duration of implementation, with $z_{tr} = 2$ this value decreases to 2 %. From the above we can make a conclusion about inexpediency of establishment $z_{tr} > 1,5$, because the duration of the useful signal will be less than 10 % of the total duration of the implementation, and we will not get a significant reduction of the error.

Measurement error can be further reduced by rational filtering [18] of the output signal of frequency discriminator provided that we know correlation function or the spectral density of the instantaneous frequency for a given value of U_{tr} .

The spectral density of the instantaneous frequency of the multi-frequency Doppler signal with nonthreshold detection, as is known [16], is equal to the spectral density of a normal narrow-band process. Its values at zero $S(0)$ are maximum and equal to $4,66D\omega$ [18].

For nonthreshold detecting the root-mean-square relative error of determination of the instantaneous speed will be equal to

$$\delta_v = \sigma_v/v = \delta_f f_D = \frac{1}{2\pi} \sqrt{S(0)\Delta F/f_D^2} = \frac{\sqrt{\Delta F/f_D}}{2\sqrt{M}},$$

where d_f is standard deviation of frequency Doppler signal, d_v is standard deviation of speed of object, f_D is frequency of Doppler signal, DF is range of variation of frequency of Doppler signal.

For actual values DF/f_D and $M = 100$ we will get $\sigma f_D = 0,2$ %.

4. Analysis of the spectral density of frequency

Next, we proceed to analyzing the spectral density of frequency in threshold mode of demodulation. First, let us make a few preliminary remarks. As it was shown, the variance of the Doppler signal frequency in this mode is finite and decreases with the threshold increase. Therefore, values of the correlation functions at zero, in contrast to the no-threshold demodulation, also are finite and will decrease with the increase of the threshold. Finite variance implies that the integral of spectral density of phase noise is finite as well, and the spectral density is falling faster than $1/\omega$.

Since the correlation function of the instantaneous frequency at zero threshold is monotonous and decreasing, we can assume that with the increase of the threshold its values will begin to decrease not only at zero, but also in all other points. If it is so, the spectral density of fluctuations of instantaneous frequency at zero, which is an integral of the correlation function, also will fall with the increase of threshold.

Considering that obtained analytical expression for the correlation function of the instantaneous frequency was so complex that its analysis even with the use of modern PCs are too expensive, to confirm the obtained conclusions using quantitative estimates we used the method of computer simulation.

The Doppler signal computer modeling was performed with the determining of the current values of the envelope and instantaneous frequency at each time step, with identifying the signal sections with above-threshold values of the envelope and quantitative estimations of the correlation function and the spectral density of the instantaneous frequency for the considered sections.

The calculation of desired values of the random frequency is carried out in accordance with the known [18] expression

$$\dot{\varphi}(t = n\Delta t) = (\dot{U}_s U_c - \dot{U}_c U_s) / (U_s^2 + U_c^2),$$

where $U_s, U_c, \dot{U}_s, \dot{U}_c$ are accordingly sinus and cosine components and their time derivatives of the signal complex amplitude $U(t)$.

The calculation of each component was carried out by the following formulas:

$$U_s = \sum U_i \{t - t_i\} \sin \omega_D t_i;$$

$$U_c = \sum U_i \{t - t_i\} \cos \omega_D t_i;$$

$$\dot{U}_s = \sum \dot{U}_i \{t - t_i\} \sin \omega_D t_i;$$

$$\dot{U}_c = \sum \dot{U}_i \{t - t_i\} \cos \omega_D t_i.$$

In the above expressions t is current time. Its discrete values at each time step are defined as qh, h is the interval of discreteness, is the envelope of the signal of a single brilliant point, t_i is random arrival moment of the «brilliant» point i to the centre of the measuring volume, a is parameter defined by the transverse dimension of the measured object. When we know duration of the single-frequency signal, expressed in Doppler periods NT_D , and the average number of particles n present in the measuring volume in

the same time is given, the value of l is found as n/NT_D . Sequential values of intervals Dt_i and arrival moments of t_i particles were obtained using a random numbers generator in accordance with expressions

$$\Delta t_i = -(1/l) \ln P_1 = (NT_D) \ln P_1,$$

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t_i,$$

where P_1 is a random number uniformly distributed in the range $[0,1]$, generated by the random numbers generator. Estimation of the autocorrelation function of the frequency with qh shift (q is the number of steps, h is discreteness interval in the absence of threshold limit of the envelope) was found as [21]

$$\hat{k}_q = k_q(qh) = \frac{1}{N-q} \sum_{n=1}^{N-q} \dot{\varphi}_n \dot{\varphi}_{n+q}, \quad q=0, 1, 2, \dots, m. \quad (12)$$

Here N is the number of implementation samples, m is the maximum number of calculated points of the correlation function.

With the introduction of the threshold bottom limits for the envelope, part of the signal with small amplitudes was not taken into consideration, and the values of a random frequency of these sections were assumed to be equal to zero. Therefore, the expression (12) for the correlation function of the frequency with the introduction of the threshold should be amended to exclude from the total number of summands members with zero values of product $\dot{\varphi}_n \dot{\varphi}_{n+q}$. Then

$$\hat{k}_q(qh) = \langle \dot{\varphi}_n \dot{\varphi}_{n+q} \rangle = \frac{1}{N-q-s} \sum_{n=1}^{N-q} \dot{\varphi}_n \dot{\varphi}_{n+q},$$

where s is the number of zero products $\dot{\varphi}_n \dot{\varphi}_{n+q}$ (where $\dot{\varphi}_n$, $\dot{\varphi}_{n+q}$ or both values of φ are equal to zero).

Estimation of the spectral density of the random component of the instantaneous frequency of a signal in accordance with [22] can be found in two ways:

- 1) a standard way, i.e. via the Fourier transform of the correlation function;
- 2) the method of the direct Fourier transform of the original implementation of instantaneous frequency with using the fast Fourier transform (FFT) algorithm (the so-called Cooley and Tukey method), which is more efficient in terms of computation time.

Based on requirements to ensure the accuracy of not less than 5 % at the estimates of the spectra and the correlation functions and frequency resolution in the spectral area $\Delta\omega = 0,1\Delta\omega$, the following values of the model parameters were selected: the number of implementations

$r = 400$, the length of the implementation of the $T_r = 256$ samples, discreteness step $h = 4T_D$.

The results of numerical analysis are presented in Figures 2 and 3.

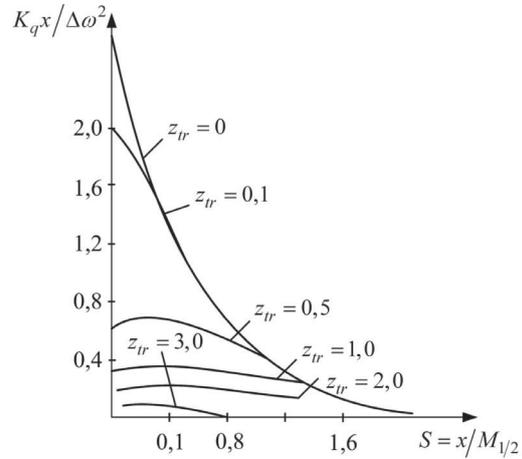


Figure 2. The family of the correlation functions of the random frequency depending on the relative parameter S

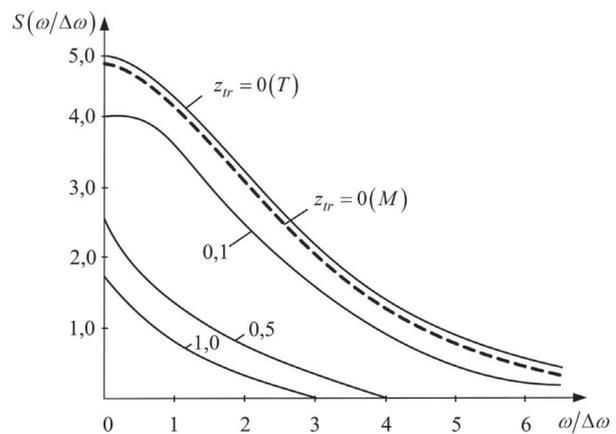


Figure 3. Graphs of spectral density of frequency $S(\omega/\Delta\omega)$ at different values of the threshold

Figure 2 shows the family of the correlation functions of the random frequency built based on the relative parameter $S = x/M_{1/2}$, where $x = t/T_D$, $M_{1/2} = M/2$, with different levels of threshold limit of the envelope. It is significant that the values of the correlation functions for $S = 0$ coincide exactly with the theoretically calculated values of frequency dispersion at the appropriate levels of the threshold z_{tr} , and the curves with other values of the relative shift S coincide with the above assumptions.

Figure 3 shows the graphs of the spectral density of frequency $S(\omega)$ at different values of threshold (the letters T and M mean theoretical and model results). It is shown that with the increase of the threshold narrowing of the spectrum occurs, as well as reduction of all its abso-

lute values at the relevant frequencies. Changing of the spectral density at zero $S(0)$ from the threshold is approximated as

$$S_0(z_{tr}) = S_0 \exp(-z_{tr}).$$

Therefore, for $z_{tr} = 1,5$ value $S_0(z_{tr})$ will be reduced by 4,5 times compared to the case where $z_{tr} = 0$. It means that when we study turbulent pulsations of speed the value of the root-mean-square error of speed measurement, determined mainly by the value S_0 , with the introduction of the threshold, will be reduced in $4,5^{1/2} = 2,1$ times compared with the case where the threshold is absent, and the frequency band is the same.

Список литературы

1. Воловач В.И. Обнаружение протяженных объектов в условиях априорной неопределенности относительно параметров движения на фоне негауссовских помех // Радиотехника. 2015. № 2. С. 30–38.

2. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Исследование спектра доплеровского сигнала, отраженного от движущегося протяженного объекта // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 11. С. 58–66.

3. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Статистические характеристики сигналов и помех при обнаружении и измерении параметров движения протяженных объектов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18. № 1. С. 60–67.

4. Артюшенко В.М., Воловач В.И., Иванов В.В. Статистические характеристики длительностей выбросов огибающих сигналов, отраженных от протяженных объектов // Радиотехника. 2015. № 2. С. 54–61.

5. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Анализ параметров спектра доплеровского сигнала, отраженного от движущегося протяженного объекта // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2015. № 1. С. 5. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan15/13/text.html> (дата обращения: 25.11.2016).

6. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Динамические модели параметров движения протяженных объектов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 2. С. 84–90.

7. Artyushenko V.M., Volovach V.I., Shakurskiy M.V. Analysis of influence of uncorrelated additive non-Gaussian noise on

Conclusion

Thus, the theoretical and numerical analysis allows us to estimate in common case the potentially achievable accuracy of motion parameters of extended objects for Doppler short-range radio location devices in the threshold mode of demodulation. Applying of the amplitude threshold in contrast to the no-threshold demodulation of Doppler signal allows us to get finite variances of extended object speed estimates within detection area in wide frequency band and reduces all spectral components of phase noise.

accuracy of motion parameters measurement in short-range radio systems // Proceedings of IEEE International Siberian conference on control and communications (SIBCON-2015). Omsk, Russia, May 21-23, 2015. Omsk: OSTU, 2015. P. 7147279. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147279.

8. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Измерение информационных параметров сигнала в условиях воздействия аддитивных негауссовских коррелированных помех // Автометрия. 2016. Т. 59. № 6. С. 22–28. DOI: 10.15372/AUT20160603.

9. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Оценка погрешности измерения параметров движения протяженных объектов на фоне коррелированных аддитивных негауссовских помех // Двойные технологии. 2015. № 2. С. 19–22.

10. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Оценка точности измерения информационных параметров сигнала на фоне коррелированной аддитивной помехи при непрерывной обработке // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2015. № 1. С. 59–65.

11. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Анализ влияния аддитивных негауссовских помех на точность измерения параметров движения в радиосистемах ближнего действия // Нелинейный мир. 2015. Т. 13. № 1. С. 16–30.

12. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Измерение параметров движения протяженных объектов в условиях мешающих воздействий и изменяющейся дальности // Двойные технологии. 2015. № 1. С. 69–74.

13. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Оценка погрешности измерения параметров движения протяженных объектов в условиях

изменяющейся дальности // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2015. Т. 58. № 1. С. 26–37.

14. Островитянов Р.В., Басалов Ф.А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. М.: Радио и связь, 1982. 232 с.

15. Фельдман Ю.И., Мандуровский И.А. Теория флюктуаций локационных сигналов, отраженных распределенными целями. М.: Радио и связь, 1988. 272 с.

16. Соболев В.С. О спектре фазового шума на выходе лазерного доплеровского измерителя скорости // Автометрия. 1974. № 6. С. 23–28.

17. Василенко Ю.Г., Дубнищев Ю.Н., Коронкевич В.П. и др. Лазерные доплеровские измерители скорости / Отв. ред. Ю.Е. Нестерихин. Новосибирск: Наука, 1975. 128 с.

18. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.

19. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. 814 с.

20. Артющенко В.М., Воловач В.И. Оценка погрешности измерения частоты сигнала, отраженного от протяженного объекта, на фоне аддитивных негауссовских помех // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXII Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2016. Т. I. С. 345–354.

21. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974. 326 с.

22. Артющенко В.М. Исследование и разработка радиолокационного измерителя параметров движения протяженных объектов. М.: ГБОУ ВПО ФТА, 2013. 214 с.

References

1. Volovach V.I. Obnaruzhenie protjazhennyh ob'ektov v uslovijah apriornoj neopredelennosti odnositel'no parametrov dvizhenija na fone negaussovskih pomeh // Radiotekhnika. 2015. № 2. S. 30–38.

2. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Issledovanie spektra doplerovskogo signala, otrazhennogo ot dvizhushhegosja protjazhennogo ob'ekta // Uspehi sovremennoj radiojelektroniki. 2015. № 11. S. 58–66.

3. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Statisticheskie harakteristiki signalov i pomeh pri obnaruzhenii i izmerenii parametrov dvizhenija protjazhennyh ob'ektov // Fizika

volnovyh processov i radiotekhnicheskie sistemy. 2015. T. 18. № 1. S. 60–67.

4. Artjushenko V.M., Volovach V.I., Ivanov V.V. Statisticheskie harakteristiki dlitel'nostej vybrosov ogibajushhh signalov, otrazhennyh ot protjazhennyh ob'ektov // Radiotekhnika. 2015. № 2. S. 54–61.

5. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Analiz parametrov spektra doplerovskogo signala, otrazhennogo ot dvizhushhegosja protjazhennogo ob'ekta [Jeletronnyj resurs] // Zhurnal radiojelektroniki: jeletronnyj zhurnal. 2015. № 1. S. 5. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan15/13/text.html> (data obrashhenija: 25.11.2016).

6. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Dinamicheskie modeli parametrov dvizhenija protjazhennyh ob'ektov // Jeletrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2014. T. 10. № 2. S. 84–90.

7. Artjushenko V.M., Volovach V.I., Shakurskiy M.V. Analysis of influence of uncorrelated additive non-Gaussian noise on accuracy of motion parameters measurement in short-range radio systems // Proceedings of IEEE International Siberian conference on control and communications (SIBCON-2015). Omsk, Russia, May 21-23, 2015. Omsk: OSTU, 2015. P. 7147279. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147279.

8. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Izmerenie informacionnyh parametrov signala v uslovijah vozdejstvija additivnyh negaussovskih korrelirovannyh pomeh // Avtometrija. 2016. T. 59. № 6. S. 22–28. DOI: 10.15372/AUT20160603.

9. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Ocenka pogreshnosti izmerenija parametrov dvizhenija protjazhennyh ob'ektov na fone korrelirovannyh additivnyh negaussovskih pomeh // Dvojnye tehnologii. 2015. № 2. S. 19–22.

10. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Ocenka tochnosti izmerenija informacionnyh parametrov signala na fone korrelirovannoj additivnoj pomehi pri nepreryvnoj obrabotke // Izvestija vuzov Rossii. Radiojelektronika. 2015. № 1. S. 59–65.

11. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Analiz vlijanija additivnyh negaussovskih pomeh na tochnost' izmerenija parametrov dvizhenija v radiosistemah blizhnego dejstvija // Nelinejnyj mir. 2015. T. 13. № 1. S. 16–30.

12. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Izmerenie parametrov dvizhenija protjazhennyh ob'ektov v uslovijah meshajushhijh vozdeystvij i izmenjajushhejsja dal'nosti // Dvojnye tehnologii. 2015. № 1. S. 69–74.
13. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Ocenka pogreshnosti izmerenija parametrov dvizhenija protjazhennyh ob'ektov v uslovijah izmenjajushhejsja dal'nosti // Izvestija vuzov. Radioelektronika. 2015. T. 58. № 1. S. 26–37.
14. Ostrovitjanov R.V., Basalov F.A. Statisticheskaja teorija radiolokacii protjazhennyh celej. M.: Radio i svjaz', 1982. 232 s.
15. Fel'dman Ju.I., Mandurovskij I.A. Teorija fljuktucij lokacionnyh signalov, otrazhennyh raspredelemnymi celjami. M.: Radio i svjaz', 1988. 272 s.
16. Sobolev V.S. O spektre fazovogo shuma na vyhode lazernogo doplerovskogo izmeritelja skorosti // Avtometrija. 1974. № 6. S. 23–28.
17. Vasilenko Yu.G., Dubnishchev Yu.N., Koronkevich V.P. i dr. Lazernye doplerovskie izmeriteli skorosti / Otv. red. Yu.E. Nesterikhin. Novosibirsk: Nauka, 1975. 128 s.
18. Tihonov V.I. Statisticheskaja radio-tehnika. M.: Radio i svjaz', 1982. 624 s.
19. Ventcel' E.S. Teorija verojatnostej. M.: Nauka, 1964. 814 s.
20. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Ocenka pogreshnosti izmerenija chastoty signala, otrazhennogo ot protjazhennogo ob'ekta, na fone additivnyh negaussovskih pomeh // Radiolokacija, navigacija, svjaz': sb. tr. XXII Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. Voronezh, 2016. T. I. S. 345–354.
21. Bendat Dzh., Pirsol A. Izmerenie i analiz sluchajnyh processov. M.: Mir, 1974. 326 s.
22. Artjushenko V.M. Issledovanie i razrabotka radiolokacionnogo izmeritelja parametrov dvizhenija protjazhennyh ob'ektov. M.: GBOU VPO FTA, 2013. 214 s.



Ерофеев В. В.
Erofeyev V. V.

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



Игнатъев А. Г.
Ignatiev A. G.

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Прикладная механика», ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», г. Челябинск, Российская Федерация



Альмухаметов А. А.
Almkhametov A. A.

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



Шарафиев Р. Г.
Sharafiyev R. G.

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



Ерофеев С. В.
Erofeyev S. V.

кандидат технических наук, директор ООО «Промстандарт», г. Челябинск, Российская Федерация

УДК 622.692.052.7

ИНФОРМАЦИОННО-ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ

Одной из ключевых задач, стоящих перед нефтегазовой отраслью, является предотвращение аварийных ситуаций, имеющих место в процессе эксплуатации нефтегазопроводов. В этой связи приоритетным направлением становится разработка диагностических комплексов, позволяющих на базе данных технического освидетельствования трубопроводов в наиболее нагруженных и поврежденных участках прогнозировать их остаточный рабочий ресурс и устанавливать на этой основе межремонтные сроки. Как правило, достижение поставленной задачи обеспечивается путем мониторинга технического состояния наиболее опасных участков трубопровода и на основе оценки их рабочего ресурса на базе различных расчетно-экспериментальных подходов. В настоящей работе предлагается информационно-

диагностический комплекс, позволяющий исключить сложную процедуру мониторинга, в том числе статистическую обработку накопленных данных по оценке технического состояния трубопроводов, и периодическую экспериментальную проверку и испытания вырезаемых образцов из наиболее опасных и поврежденных участков труб, необходимые для оценки механических свойств металла трубопроводов. Для этих целей предлагается использовать метод голографической интерферометрии, положенный в основу информационно-диагностического комплекса, с помощью которого можно определить напряженное состояние и нагруженность в стенке трубопровода и необходимые параметры и механические свойства металла труб с учетом их старения в процессе эксплуатации для оценки ресурса пластичности металла труб. В работе рассмотрена методика прогнозирования остаточного рабочего ресурса трубопроводов, положенная в основу предлагаемого информационно-диагностического комплекса.

Ключевые слова: нефтегазопроводы, остаточный рабочий ресурс, информационно-диагностический комплекс, параметры технического состояния, механические свойства металла труб.

INFORMATION AND DIAGNOSTIC SYSTEM FOR EVALUATION OF TECHNICAL CONDITION PARAMETERS OIL AND GAS PIPELINES

One of the key challenges facing the oil and gas industry, is the prevention of accidents that occur in the operation of oil and gas. In this regard, priority is the development of diagnostic systems that allow on the basis of technical inspection of pipelines of data in the most loaded and damaged areas to predict their residual service life and to establish on this basis, the turnaround time. As a rule, the achievement of the objectives achieved by monitoring the technical condition of the most dangerous areas of labor-laying, and evaluation of their working life on the basis of different computational and experimental approaches. In this paper we propose information and diagnostic system that allows you to exclude a complex monitoring procedure, including statistical analysis of historical data to assess the technical condition of the pipelines, and the periodic experimental verification and test specimens are cut from the most dangerous and damaged sections of pipe needed to assess the mechanical properties of metal pipelines. For these purposes are encouraged to use the method of hol-ographic interferometry, which is the basis of information-diagnostic system with which you can define the state of stress and loading in the wall of the pipeline and the necessary parameters and mechanical properties of metal pipes with regard to their age during the operation to assess a resource of plasticity metal pipes. The paper considers the method of forecasting the residual working life of pipelines, laid the basis for the proposed information-diagnostic complex.

Key words: oil and gas pipelines, remaining service life, information-diagnostic system, parameters of technical condition, mechanical properties of metal pipes.

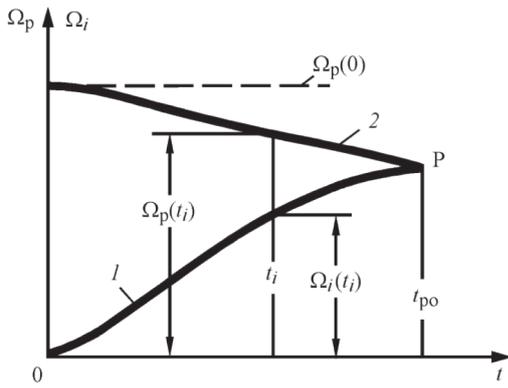
В настоящей работе предложены результаты по разработке информационно-диагностического комплекса для оценки параметров технического состояния нефтегазопроводов, необходимых для прогнозирования их остаточного рабочего ресурса, базирующегося на использовании метода голографической интерферометрии. Сущность предлагаемого подхода прогнозирования заключается в следующем. Для оценки эксплуатационного ресурса трубопроводов $[0, t_{p0}]$ необходима информация о накоплении локальной повреждаемости металла трубопровода в его наиболее нагруженном

участке (как правило, вблизи концентраторов напряжений) $W_i(t)$ (кривая 1, рисунок 1) и снижении запаса пластичности материала детали $W_p(t)$ (кривая 2, рисунок 1) [1].

Фактически определение эксплуатационного ресурса металлоконструкции t_{p0} сводится к решению двух самостоятельных задач:

1 — оценка локальной повреждаемости металла в наиболее нагруженном участке трубопровода в процессе его эксплуатации $W_i(t)$;

2 — определение остаточного запаса пластичности металла трубопровода в процессе эксплуатации $W_p(t)$.



1 — кривая накопления локальной повреждаемости металла в наиболее нагруженном и ослабленном участке; 2 — зависимость остаточной пластичности металла от времени их эксплуатации

Рисунок 1. Схема определения эксплуатационного ресурса трубопровода [0, t_p]

В работе предлагается подход, позволяющий отказаться от решения более сложной первой задачи. Для этого, используя нелинейный закон суммирования повреждений [2] и распространяя его на двухстадийный процесс накопления локальных повреждений в металлоконструкциях рассматриваемых объектов (1 стадия — стадия эксплуатации, 2 стадия — процесс испытаний), установлена взаимосвязь между рассматриваемыми параметрами $W_i(t)$ и $W_p(t)$, соответствующими одному и тому же периоду времени t_p :

$$\frac{\Omega_i(t_i)}{\Omega_p(0)} = \left[1 - \left[\frac{\Omega_p(t_i)}{\Omega_p(0)} \right]^{a_2} \right]^{\frac{1}{a_1}}, \quad (1)$$

где a_1, a_2 — некоторые параметры закона нелинейного суммирования повреждений, отвечающие этапу эксплуатации и испытаний [2]:

$$a_{1,2} = a_0 \exp(1 + 0,238\Pi_{1,2}). \quad (2)$$

Здесь a_0 — постоянная материала, определяемая из кривой деформирования материала; $\Pi_{1,2}$ — показатель жесткости напряженного состояния в наиболее нагруженном участке конструкции, отвечающий данным стадиям нагружения.

Основные практические сложности, возникающие в процессе оценки технического состояния деталей на базе использования критерия W_p , связаны с экспериментальным определением данной величины, что сопряжено с испытанием целого ряда образцов заданной конфигурации при различных схемах нагружения (изгибе, кручении, растяжении и т.д.) и

наличии концентраторов, обеспечивающих в процессе испытания образцов разную величину показателя жесткости Π_2 и вида напряженного состояния v_s в окрестности вершины концентратора. Последнее необходимо для построения диаграмм пластичности материала в виде $W_p = W_p(\Pi, v_s)$, характеризующих запас пластичности металла при различных условиях нагружения.

В работе предлагается подход, позволяющий по информации, снимаемой на стадии технической диагностики, не прибегая к испытаниям образцов, непосредственно оценить запас пластичности металла для различных условий нагружения. Базируясь на допущении о возможности описания диаграмм пластичности экспоненциальными зависимостями, было получено соотношение, позволяющее по параметрам аппроксимированной кривой деформирования материала m (показатель упрочнения материала), E и σ_T (модуль упругости и предел текучести) и параметрам Π и v_s , определяющим схему и характер нагружения, оценить запас пластичности металла:

$$\Omega_p = \frac{2m_i}{1 - m_i^2} e^{-\frac{\Pi_i}{2\pi} f\left(m_i, \frac{E}{\sigma_{Ti}}, v_{\sigma i}\right)}, \quad (3)$$

где $f\left(m_i, \frac{E}{\sigma_{Ti}}, v_{\sigma i}\right) = \ln\left[\frac{m_i E}{10\pi \sigma_{Ti}} \left[1 + \pi - \arccos\left(\frac{v_{\sigma i}}{3}\right)\right]^{-2}\right]$. (4)

Величина v_s для оболочковых конструкций типа трубопроводов характеризует геометрическую форму оболочки и характер нагружения ее в процессе эксплуатации, а величина Π определяет жесткость напряженного состояния в наиболее нагруженном участке трубопровода:

$$\Pi_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{n_i + 1}{\sqrt{1 - n_i + n_i^2}}, \quad (5)$$

$$v_{\sigma i} = 2n_i - 1,$$

где $n_i = \frac{\sigma_{2i}}{\sigma_{1i}}$, σ_{1i}, σ_{2i} — главные нормальные напряжения в стенке трубопровода.

Используя соотношения (3) и (4) по информации, снимаемой на стадиях технической диагностики трубопроводов ($m_i, \sigma_{Ti}, \Pi_i, v_{\sigma i}$), строится кривая изменения запаса пластичности материала труб в наиболее нагруженном участке (кривая 2 на рисунке 1). Затем, используя соотношения (1) и (2) в предположении, что $v_{s1} = v_{s2} = v_{si}, \Pi_1 = \Pi_2 = \Pi_p$ и следовательно $a_{1i} = a_{2i} = a_p$, кривая (2) перестраивается в кривую (1) и находится их точка

пересечения (методом экстраполяции), т.е. значение t_{p0} , отвечающее рабочему ресурсу металлоконструкции.

Дефекты и конструктивные несовершенства нефтегазопроводов (смещения кромок, разнотолщинность и т.п.) способствуют повышению уровня напряженности в стенке конструкции и, как следствие, прогрессивному развитию процессов коррозии металла (так называемый механохимический эффект), что, в свою очередь, приводит к снижению рабочего ресурса конструкции. В связи с этим при прогнозировании рабочего ресурса трубопроводов необходимо вводить корректировку на механохимический эффект с учетом соотношения [3-6]

$$t_p = \frac{t_{p0}}{K_{ук}}, \quad (6)$$

где t_{p0} — рабочий ресурс, определенный по предлагаемой методике без учета механохимического эффекта; $K_{ук}$ — коэффициент усиления коррозии от действия напряжений,

$$K_{ук} = (K_{ст} m_i + 1) \exp(K_u A_i m_i^{m_i}), \quad (7)$$

$K_{ст}$ — механохимический параметр, определяемый экспериментально (для углеродистых сталей $K_{ст} = 5 \dots 6$; для низколегированных сталей $K_{ст} = 6 \dots 7$); K_u — константа материала,

$$K_u = \frac{V}{RT}, \quad (8)$$

V — модульный объем стали; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура; A_i — константа деформационного упрочнения материала,

$$A_i = \frac{\sigma_{Ti}}{\left(1 + \frac{3}{2} m_i\right) (\sqrt{3} \Omega_p)^{m_i}}. \quad (9)$$

Основными показателями механических свойств материала конструкций, необходимыми для оценки рабочего ресурса, являются предел текучести (σ_{Ti}), модуль упругости (E) и показатель упрочнения материала (m_i).

Данные характеристики на стадии технической диагностики могут быть определены с использованием методик, базирующихся на упругопластическом контактном взаимодействии шарового индентора с поверхностью трубопровода [7], позволяющих определить предел текучести материала (σ_{Ti}) и косвенную характеристику пластических свойств — модуль упрочнения (E_{Ti}).

Способ определения предела текучести материала основан на корреляционной связи

этой характеристики с диаметром отпечатка при известном усилии вдавливания индентора, способ определения модуля упрочнения (E_{Ti}) материала — на использовании установленной взаимосвязи между этой характеристикой и деформированным состоянием поверхности вокруг отпечатка. Получены корреляционные выражения для определения указанных характеристик:

$$\sigma_{Ti} = \sigma_{Ty} \left(\frac{d_{0Fy}}{d}\right)^{3,3} \cdot \left(\frac{F}{F_y}\right)^{1,43}, \quad (10)$$

$$\frac{E_T}{E_{T6}} = \left(\frac{\sigma_T}{\sigma_{T6}}\right)^{9/8} \ln \left[\frac{10}{3} \left(\frac{\sigma_{T6}}{\sigma_T}\right)^{0,82} \frac{W_{0d6}}{W_{0d}} \right], \quad (11)$$

где индексы «у» и «б» указывают на параметры, относящиеся к «условному» и «базовому» материалам: $\sigma_{Ty} = 1$ МПа; $d_{0Fy} = 0,29$ мм; $F = 1$ Н; $W_{0d6} = 1,0 \cdot 10^{-3}$ мм; $\sigma_{T6} = 325$ МПа; $E_{T6} = 1 \cdot 10^4$ МПа.

Модуль упрочнения E_T является основой для определения искомой характеристики m_i на базе известного соотношения, полученного для конструктивных материалов:

$$m_i = 2,857 \frac{E_{Ti}}{E}. \quad (12)$$

Для определения значений Π_i и v_{si} необходимо знать величины главных нормальных напряжений σ_{1i} и σ_{2i} в стенке конструкции в наиболее нагруженном участке на стадии диагностики. Для этой цели используется методика измерений, основанная на методе голографической интерферометрии [7]. Принцип измерения основан на использовании закономерностей взаимосвязи между деформированным состоянием поверхности вокруг отпечатка в результате вдавливания индентора и напряжениями в стенке трубопровода. Результатом измерения являются величины компонент главных напряжений в точке поверхности, совпадающей с центром отпечатка.

Основные разрешающие уравнения методики:

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_{Ti}} = \frac{3}{2} \ln \left(1 - \frac{\Delta W_y}{2W_{0d}} \right); \quad (13)$$

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_{Ti}} = \frac{3}{2} \ln \left(1 - \frac{\Delta W_x}{2W_{0d}} \right),$$

где оси x и y направлены вдоль осей симметрии зарегистрированного распределения перемещений (рисунок 2); σ_{Ti} — предел текучести материала; W_{0d} — величина нормального перемещения в контрольной точке

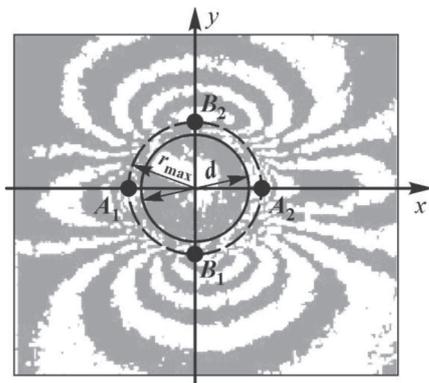


Рисунок 2. Распределение нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка

(точки A и B на расстоянии r_{\max} от центра отпечатка) для материала конструкции при отсутствии напряжений, определяемая по диаграмме вдавливания для материала $W(d)$; DW — разность между полученной при измерении напряжений величиной нормального перемещения в контрольной точке и базовым перемещением W_{od} .

Общая характеристика метода:

- 1) метод позволяет проводить дискретные (поточечные) измерения напряжений;
- 2) получаемый объем информации: величины компонент напряжений в точке на поверхности трубы, их знаки, направления главных осей;
- 3) чувствительность метода: 0,05...0,15 от предела текучести материала в зависимости от диаметра индентора и диаметра отпечатка;
- 4) база усреднения получаемых экспериментальных данных: по поверхности — диаметр отпечатка, по глубине — 1/4 диаметра отпечатка;
- 5) рекомендуемый диапазон диаметров отпечатков: 0,9...1,5 мм в зависимости от диаметра индентора;
- 6) тип индентора: шар диаметром 5...15 мм;
- 7) характер нагружения детали: статический, динамический;
- 8) погрешность измерения в рекомендуемом диапазоне диаметров отпечатков: не более 10 %;
- 9) по классификационному признаку «степень воздействия на исследуемый объект» метод относится к условно неразрушающим методам;
- 10) производительность измерений — до 5 мин на измерение напряжений в одной точке поверхности детали;
- 11) ограничения по применению:

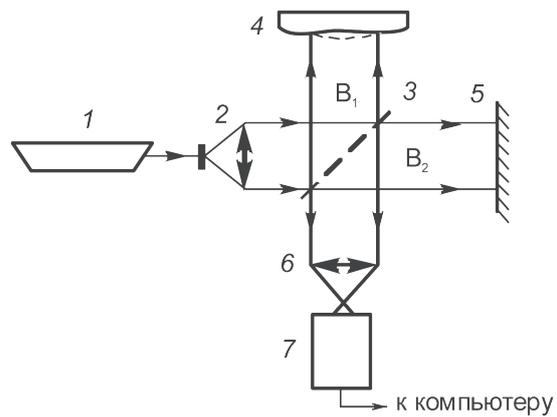


Рисунок 3. Оптическая система блока интерферометра на базе ЭСИ
1 — лазер; 2 — коллиматор; 3 — делитель (полупрозрачное зеркало); 4 — объект; 5 — зеркало; 6 — объектив; 7 — цифровой фотодетектор (видеокамера)

Рисунок 3. Оптическая система блока интерферометра на базе ЭСИ

- в металлоконструкциях без резких изменений геометрии поверхности,
- проведение измерений только на наружной поверхности конструкции,
- проведение измерений на подготовленной поверхности конструкции (зачистка и т.п.),
- твердость поверхности не выше 60 HRC,
- отсутствие наружных и внутренних дефектов в поверхностном слое.

Представленные характеристики метода позволяют рекомендовать его для неразрушающего диагностирования напряжений в металлоконструкциях в режиме экспресс-измерений [8–10].

Для проведения практических измерений нагруженности металлоконструкций разработана измерительная оптико-электронная установка на базе метода электронной спекл-интерферометрии. Принципиальная схема измерительного оборудования показана на рисунке 3.

Выводы

Предложен информационно-диагностический комплекс, позволяющий исключить сложную процедуру мониторинга, в том числе статистическую обработку накопленных данных по оценке технического состояния трубопроводов, и периодическую экспериментальную проверку и испытания вырезаемых образцов из наиболее опасных и поврежденных участков труб, необходимые для оценки механических свойств металла трубопроводов. Для этих целей предлагается использовать метод голографической интер-

ферометрии, положенный в основу информационно-диагностического комплекса, с помощью которого можно определить напряженное состояние и нагруженность в стенке трубопровода и необходимые параметры и механические свойства металла труб с учетом их старения в процессе эксплуатации для оценки ресурса пластичности металла труб. Рассмотрена методика прогнозирования остаточного рабочего ресурса трубопро-

водов, положенная в основу предлагаемого информационно-диагностического комплекса.

Представлены результаты по разработке информационно-диагностического комплекса для оценки параметров технического состояния нефтегазопроводов, необходимых для прогнозирования их остаточного рабочего ресурса, базирующегося на использовании метода голографической интерферометрии.

Список литературы

1. Ерофеев В.В., Шахматов М.В., Айметов Ф.Г. и др. Прогнозирование остаточного эксплуатационного ресурса труб при статическом нагружении в коррозионных средах // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. 1993. № 2. С. 20–24.

2. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Metallurgiya, 1984. 144 с.

3. Зайнуллин Р.С. Механика катастроф. Обеспечение работоспособности оборудования в условиях механохимической повреждаемости. Уфа: МНТЦ «БЭСТ», 1997. 426 с.

4. Зайнуллин Р.С. Оценка эффективности применения высокопрочных сталей для производства элементов нефтегазового оборудования // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2015. Вып. 1 (99). С. 120–127.

5. Латыпов А.М., Мухаметзянов А.Н., Харисов Р.А., Зайнуллин Р.С. Совершенствование методов расчета долговечности элементов оборудования и трубопроводов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2014. Вып. 3 (97). С. 90–95.

6. Харисов Р.А., Кантемиров И.Ф., Сазонов К.А., Зайнуллин Р.С. Основы расчетов на прочность и устойчивость с учетом прибавки на компенсацию коррозионно-механического износа базовых элементов нефтегазового оборудования и трубопроводов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2011. Вып. 4 (86). С. 47–53.

7. Игнатъев А.Г. Определение механических свойств металлических покрытий при восстановлении деталей // Достижения науки

— агропромышленному производству: матер. XLVIII Междунар. науч.-техн. конф., Ч. 4. Челябинск: ЧГАУ, 2009.

8. Игнатъев А.Г. и др. Метод и технические средства контроля напряженного состояния металлоконструкций // Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами. Челябинск: ЦНТИ, 2004.

9. Шарафиев Р.Г., Шарафиев Р.Г., Кускильдин Р.А. Промышленная безопасность: опыт, проблемы и перспективы эксплуатации нефтегазопроводов. Челябинск, 2005. 448 с.

10. Крюков Н.И. и др. Газопроводы и газовые сети: надежность, диагностика, перспективы. Челябинск-Уфа, 2008. 375 с.

References

1. Erofeev V.V., Shakhmatov M.V., Aimetov F.G. i dr. Prognozirovanie ostatochnogo ekspluatatsionnogo resursa trub pri staticheskom nagruzhenii v korrozionnykh sredakh // Transport i khranenie nefiti i nefteproduktov. 1993. № 2. S. 20–24.

2. Bogatov A.A., Mizhiritskii O.I., Smirnov S.V. Resurs plastichnosti metallov pri obrabotke davleniem. M.: Metallurgiya, 1984. 144 s.

3. Zainullin R.S. Mekhanika katastrof. Obespechenie rabotosposobnosti oborudovaniya v usloviyakh mekhanokhimicheskoi povrezhdaemosti. Ufa: MNTTs «BEST», 1997. 426 s.

4. Zainullin R.S. Otsenka effektivnosti primeneniya vysoko-prochnykh stalei dlya proizvodstva elementov neftegazovogo oborudovaniya // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov. 2015. Vyp. 1 (99). S. 120–127.

5. Latypov A.M., Mukhametzyanov A.N., Kharisov R.A., Zainullin R.S. Sovershenstvovanie metodov rascheta dolgovechnosti elementov oborudovaniya i truboprovodov // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov. 2014. Vyp. 3 (97). S. 90–95.
6. Kharisov R.A., Kantemirov I.F., Sazonov K.A., Zainullin R.S. Osnovy raschetov na prochnost' i ustoichivost' s uchetom pribavki na kompensatsiyu korrozionno-mekhanicheskogo iznosa bazovykh elementov neftegazovogo oborudovaniya i truboprovodov // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov. 2011. Vyp. 4 (86). S. 47–53.
7. Ignat'ev A.G. Opredelenie mekhanicheskikh svoistv metallicheskih pokrytii pri vosstanovlenii detalei // Dostizheniya nauki — agropromyshlennomu proizvodstvu: mater. XLVIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Ch. 4. Chelyabinsk: ChGAU, 2009.
8. Ignat'ev A.G. i dr. Metod i tekhnicheskie sredstva kontrolya napryazhennogo sostoyaniya metallokonstruktsii // Kontrol' tekhnologii, izdelii i okruzhayushchei sredy fizicheskimi metodami. Chelyabinsk: TsNTI, 2004.
9. Sharafiev R.G., Sharafiev R.G., Kuskil'din P.A. Promyshlennaya bezopasnost': opyt, problemy i perspektivy ekspluatatsii neftegazoprovodov. Chelyabinsk, 2005. 448 s.
10. Kryukov N.I. i dr. Gazoprovody i gazovye seti: nadezhnost', diagnostika, perspektivy. Chelyabinsk-Ufa, 2008. 375 s.



Родионов А. С.
Rodionov A. S.

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Общенаучные дисциплины», филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, г. Салават, Российская Федерация



Мухаметзянов Э. В.
Mukhametzyanov E. V.

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры «Общенаучные дисциплины», филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, г. Салават, Российская Федерация



Курбангалиев А. М.
Kurbangaliev A. M.

студент кафедры «Общенаучные дисциплины», филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, г. Салават, Российская Федерация



Исламгулов Р. Р.
Islamgulov R. R.

студент кафедры «Общенаучные дисциплины», филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, г. Салават, Российская Федерация

УДК 004.62

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОКАЗАНИЙ ДАТЧИКОВ

В статье рассматривается разработка программно-аппаратного комплекса для мониторинга показаний с различных видов датчиков. Благодаря повсеместному развитию и распространению беспроводных сетей, появлению облачных вычислений, развитию технологий межмашинного взаимодействия появилась возможность автоматизировать процесс сбора телеметрической информации с различных видов датчиков. В связи с этим в настоящее время широкий спектр задач подразумевает необходимость снятия данных с датчиков различных типов. При этом необходима определенная квалификация сотрудников, настраивающих интерфейсы для взаимодействия с датчиками.

Данное программное обеспечение было разработано для применения в рамках концепции «интернета вещей», и из этого следует, что область применения данного продукта очень широка: от применения в быту до научной деятельности. При разработке представляемого программного обеспечения были поставлены и реализованы следующие задачи: выбор наиболее подходящих средств реализации цели: языка программирования, базы

данных, разработка серверной части программно-аппаратного комплекса по сбору информации с датчиков и обеспечение клиентов верными данными.

В статье рассмотрено использование следующего программного обеспечения для реализации поставленных задач: Docker (программное обеспечение для реализации развертывания и управления приложениями в среде виртуализации на уровне операционной системы), Nginx (HTTP-сервер и обратный прокси-сервер, почтовый прокси-сервер, а также TCP/UDP прокси-сервер общего назначения), InfluxDB (нереляционная база данных, специализирующаяся на хранении временных рядов, метрик; она написана на языке Go и не имеет внешних зависимостей; предназначена для хранения метрик мониторинга серверов, данных от сенсоров и аналитики временных рядов в реальном времени), Flask (микрофреймворк для создания веб-приложений на языке программирования Python, использующий набор инструментов Werkzeug, а также шаблонизатор Jinja2). В результате реализации было разработано программное обеспечение, позволяющее собирать данные с разных видов датчиков и получать к ним доступ через публичный интерфейс.

Ключевые слова: датчик, мониторинг, сбор данных, python, сенсоры, база данных, программное обеспечение, InfluxDB, интернет вещей, контроль.

COMPUTER APPLIANCE FOR MONITORING READINGS FROM SENSORS

The article deals with the development of a software and hardware complex for monitoring indications from various types of sensors. Thanks to the widespread development and distribution of wireless networks, the emergence of cloud computing, the development of inter-machine interaction technologies, it became possible to automate the process of collecting telemetric information from various types of sensors. In this regard, now a wide range of tasks implies the need to remove data from different types of sensors. At the same time, a certain qualification of employees is required, which set up interfaces for interaction with sensors.

This software was developed for use within the framework of the «Internet of things» concept, and it follows that the scope of this product is very broad: from application in the home to scientific activity. During the development of the presented software, the following tasks were set and implemented: selection of the most suitable means for the realization of the goal: the programming language, database, the development of the server part of the hardware and software complex for collecting information from the sensors and providing customers with correct data.

The article discusses the use of the following software to implement the tasks: Docker (software for implementing deployment and management of applications in an operating system-level virtualization environment), Nginx (HTTP server and reverse proxy, mail proxy, and TCP / UDP proxy server for general purpose), InfluxDB (a nonrelational database specializing in the storage of time series, metrics, it is written in Go and does not have external dependencies; it is intended for storing server monitoring metrics, data from sensors and time analytics Series in real time), Flask (microframe for creating Web applications in the Python programming language, using the Werkzeug toolset, as well as the Jinja2 template engine). As a result of the implementation, software was developed that allows data to be collected from different types of sensors and accessed through a public interface.

Key words: sensor, monitoring, data collection, python, sensors, database, software, InfluxDB, Internet of things, control.

Благодаря повсеместному развитию и распространению беспроводных сетей, появлению облачных вычислений, развитию технологий межмашинного взаимодействия появилась возможность автоматизировать процесс сбора телеметрической информации с различных видов датчиков. В связи с этим возникла необходимость в создании плат-

формы для сбора, обработки и хранения этих данных [1-4]. Важность создания данного программного продукта состоит в том, чтобы предоставить удобный инструмент для быстрой организации систем мониторинга, основанный на снятии показаний с датчиков.

Для удовлетворения поставленных выше требований необходимо, чтобы создаваемая

платформа обеспечивала: удобство разработки, быстрое развёртывание, высокую доступность, производительность, гибкость (возможность изменять конфигурацию оборудования) и простоту расширения.

Для реализации поставленных задач использовано следующее программное обеспечение: Docker (программное обеспечение для реализации развёртывания и управления приложениями в среде виртуализации на уровне операционной системы [5]), Nginx (HTTP-сервер и обратный прокси-сервер, почтовый прокси-сервер, а также TCP/UDP прокси-сервер общего назначения [6]), InfluxDB (нереляционная база данных, специализирующаяся на хранении временных рядов, метрик; она написана на языке Go и не имеет внешних зависимостей; предназначена для хранения метрик мониторинга серверов, данных от сенсоров и аналитики временных рядов в реальном времени), Flask (микро-фреймворк для создания веб-приложений на языке программирования Python [7, 8],

использующий набор инструментов Werkzeug, а также шаблонизатор Jinja2).

Данные, снятые с датчиков (рисунок 1), поступают на шлюз по протоколу CoAP. Шлюз преобразует данные в формат JSON и отправляет их на сервер. На сервере данные обрабатываются и отправляются в базу данных (БД). Клиент получает эти данные через публичный интерфейс. Данные сохраняются в локальной базе данных и выводятся на экран в виде графиков.

Возможность получения данных со шлюза или напрямую с датчиков, их обработка, сохранение и предоставление публичного интерфейса обеспечиваются серверной частью (рисунок 2) описываемого комплекса.

В качестве входных данных приложение принимает POST запрос по HTTP с данными, снятыми с датчиков, в теле запроса в формате JSON. Запрос инициирует запись принятых данных в БД. Когда клиентское программное обеспечение обращается к веб-приложению с определённым запросом, сервис преобразовывает его в понятный базе данных язык

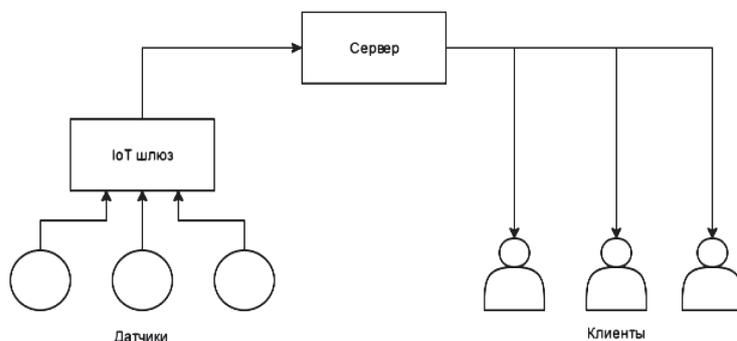


Рисунок 1. Общая схема программно-аппаратного комплекса

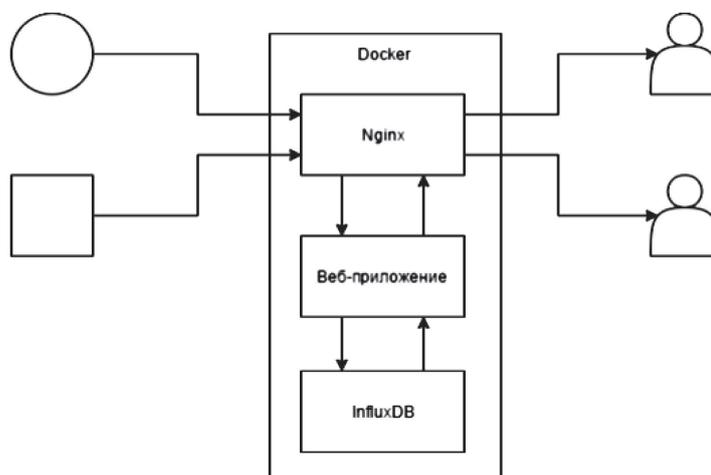


Рисунок 2. Архитектура серверной части

InfluxQL. После этого полученные данные отправляются клиенту в формате JSON по протоколу HTTP.

Серверная часть программно-аппаратного комплекса отвечает за агрегацию данных с сенсоров, сохранение в специализированной базе данных и предоставление публичного интерфейса доступа для последующего анализа. Данная процедура автоматизирована и не требует вмешательства со стороны человека, исключая нештатные ситуации.

Для обеспечения надёжной работы решения были использованы такие технологии, как Docker, Nginx, InfluxDB и Flask.

Возможность оперативного развёртывания комплекса является его неотъемлемым достоинством. Для реализации данного преимущества был использован Docker. Docker позволяет «упаковать» приложение со всем его окружением и зависимостями в контейнер, который может быть перенесён на любую Linux-систему с поддержкой cgroups в ядре, а также предоставляет среду по управлению контейнерами.

Nginx использован в качестве обратного прокси, ретранслирующего запросы из внешней сети к веб-приложению. Тем самым обеспечиваются высокая производительность и безопасность.

В качестве базы данных используется InfluxDB, так как InfluxDB предназначена для хранения метрик мониторинга серверов, данных от сенсоров и аналитики временных рядов в реальном времени.

Для предоставления сенсорам и клиентам доступа к базе данных написана прослойка, представляющая из себя публичный интерфейс (REST API). Для данной задачи был использован микрофреймворк Flask [9].

В работе программного обеспечения используются следующие алгоритмы: алгоритм принятия данных и сохранения в базе данных, алгоритм фильтрации данных по параметрам из URL, алгоритм вывода возможных вариантов значений по тегу.

Алгоритм принятия данных и сохранения в базе данных работает следующим образом: шлюз или поддерживаемый датчик формируют POST запрос к серверу, сервер получает

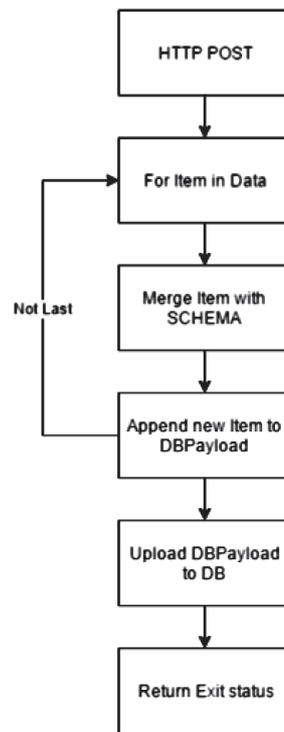


Рисунок 3. Алгоритм обработки данных перед сохранением в базе данных

эти данные, обрабатывает их и отправляет базе данных. На рисунке 3 представлена блок-схема данного алгоритма.

Алгоритм выборки данных из БД достаточно гибкий: он умеет принимать любое количество разнотипных условий (тегов) и, одновременно с этим, работать с временными выборками. В результате запроса приложение вернёт массив с объектами в формате JSON. Блок-схема алгоритма выборки данных представлена на рисунке 4.

Алгоритм вывода возможных вариантов значений по тегу работает следующим образом. Для того чтобы получить все серийные номера датчиков, требуется сделать выборку по определённому тегу. В начале инициализируется переменная тега, по которому нужно фильтровать, из параметров GET запроса и проверяется на пустоту. Если параметр оказался пуст, клиенту возвращается ошибка. Далее параметр проверяется на вхождение в список разрешённых тегов, чтобы избежать проблем с безопасностью. В случае успешной проверки генерируется строка InfluxQL и выполняется запрос к базе данных. Ответ отправляется клиенту. На рисунке 5 представлена блок-схема алгоритма.

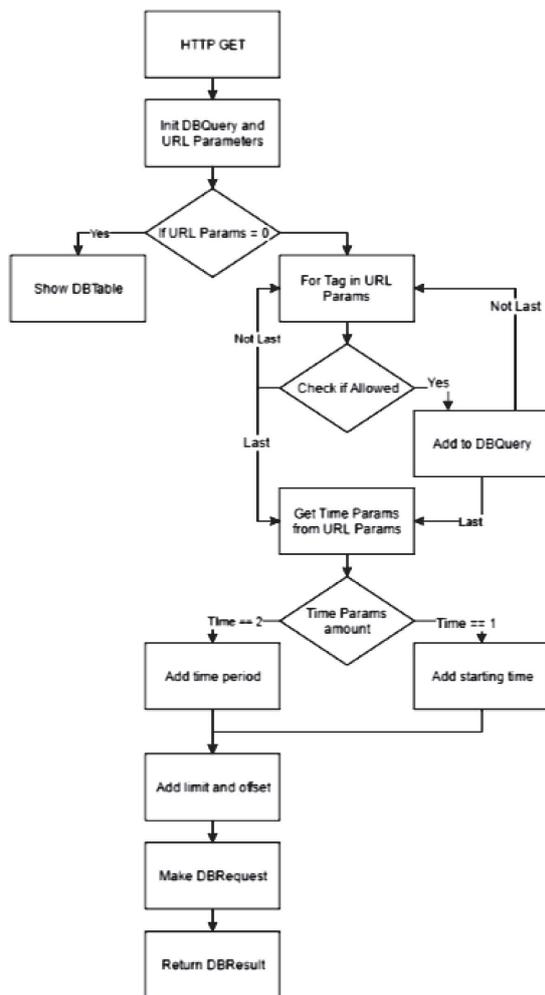


Рисунок 4. Алгоритм выборки данных из базы данных

Список литературы

1. Айвалиотис Д. Администрирование сервера NGINX: Пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2013. 288 с.
2. Гринберг М. Разработка веб-приложений с использованием Flask на языке Python: Пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2014. 272 с.
3. Лутц М. Программирование на Python: Пер. с англ. 4-е изд. СПб.: Символ-Плюс, 2011.
4. Маккинни У. Python и анализ данных: Пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2015.
5. Левина Т.М., Бажанова Т.В. Удаленное предоставление производственной информации по запросу пользователя // Сб. тез. докл. VI науч.-техн. конф. молодых специалистов ООО «БашНИПИнефть». 2016. С. 115–116.
6. Ураксеев М.А., Левина Т.М., Шамаев Ф.Ф., Кулябин А.С. Разработка волоконно-оптических систем для учета, мониторинга и прогнозирования работы высоковольтного

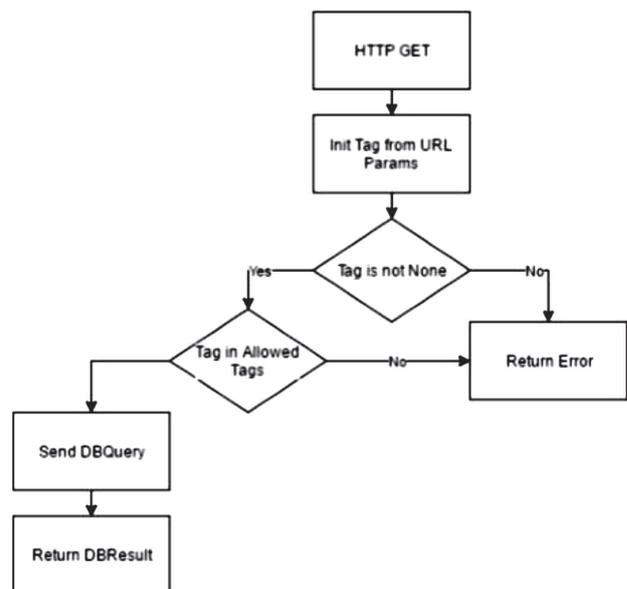


Рисунок 5. Алгоритм выборки данных по тегу

Вывод

Разработанное программное обеспечение предоставляет простой способ развертывания по сравнению с существующими аналогами, что призвано повысить скорость разработки и исследования в областях, где необходимо использовать данные, получаемые с различного рода датчиков.

- оборудования в СУБД с web-интерфейсом // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. Т. 11. № 1. С. 97–103.
7. Родионов А.С., Ефимова Д.А. Разработка системы управления промышленными данными // Естественные и математические науки в современном мире. 2015. № 36-37. С. 41–46.
 8. Родионов А.С., Юсупова Л.Р. Автоматизация процесса создания и обработки заявок, связанных с отказом оборудования в нефтегазовых предприятиях // Сб. тез. докл. VI науч.-техн. конф. молодых специалистов ООО «БашНИПИнефть». 2016. С. 133–134.
 9. Мухаметзянов Э.В., Насырова Р.Т., Курбангалиев А.М., Исламгулов Р.Р. Применение Wi-Fi ESP8266 в ходе проведения лабораторных работ по физике // Информационные технологии. Проблемы и решения. 2016. № 1 (3). С. 95–98.

References

1. Ajvaliotis D. Administrirovanie servera NGINX: Per. s angl. M.: DMK Press, 2013. 288 s.
2. Grinberg M. Razrabotka veb-prilozhenij s ispol'zovaniem Flask na jazyke Python: Per. s angl. M.: DMK Press, 2014. 272 s.
3. Lutc M. Programirovanie na Python: Per. s angl. 4-e izd. SPb.: Simvol-Pljus, 2011.
4. Makkinni U. Python i analiz dannyh: Per. s angl. M.: DMK Press, 2015.
5. Levina T.M., Bazhanova T.V. Udalennoe predostavlenie proizvodstvennoj informacii po zaprosu pol'zovatelja // Sb. tez. dokl. VI nauch.-tehn. konf. molodyh specialistov OOO «BashNIPIneft». 2016. S. 115–116.
6. Urakseev M.A., Levina T.M., Shamaev F.F., Kuljabin A.S. Razrabotka volokonno-opticheskikh sistem dlja ucheta, monitoringa i prognozirovanija raboty vysokovol'tnogo oborudovanija v SUBD s web-interfejsom // Jelektrotehnicheckie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2015. T. 11. № 1. S. 97–103.
7. Rodionov A.S., Efimova D.A. Razrabotka sistemy upravlenija promyshlennymi dannymi // Estestvennye i matematicheskie nauki v sovremennom mire. 2015. № 36-37. S. 41–46.
8. Rodionov A.S., Jusupova L.R. Avtomatizacija processa sozdaniya i obrabotki zajavok, svjazannyh s otkazom oborudovanija v neftegazovyh predpriyatijah // Sb. tez. dokl. VI nauch.-tehn. konf. molodyh specialistov OOO «BashNIPIneft». 2016. S. 133–134.
9. Muhametzjanov Je.V., Nasyrova R.T., Kurbangaliev A.M., Islamgulov R.R. Primenenie Wi-Fi ESP8266 v hode provedenija laboratornyh rabot po fizike // Informacionnye tehnologii. Problemy i reshenija. 2016. № 1 (3). S. 95–98.



Карабельская И. В.
Karabel'skaya I. V.
доцент кафедры
«Информатика и
информационно-
коммуникационные
технологии», ФГБОУ
ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа, Российская
Федерация



Абызбаев И. И.
Abyzbaev I. I.
доктор технических наук,
профессор кафедры
«Разработка и эксплуатация
нефтяных и газонефтяных
месторождений»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа, Российская
Федерация



Могучев А. И.
Moguchev A. I.
кандидат технических
наук, доцент, декан горно-
нефтяного факультета,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический
университет»,
г. Уфа, Российская
Федерация

УДК 537.3-047.37

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН В КЛИНОВИДНОЙ СРЕДЕ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Введение

При разработке нефтяных и газовых месторождений, при геофизических поисках глубоко-козалегающих полезных ископаемых методами электроразведки, скважинной и межскважинной электроразведки на постоянном токе изучение структурной неоднородности пласта, включая состояние межскважинного пространства, имеет важное научно-техническое значение. Объемное исследование пластовых систем со сложными геологическими параметрами возможно путем математической обработки наведенного электромагнитного поля.

Задачи и методы решения

В статье представлены математическая модель трехмерной граничной краевой задачи, описывающей электрические поля, создаваемые точечными источниками тока, с цилиндрическими неоднородностями, электродами и изоляторами; вычислительные алгоритмы понижения размерности задачи.

Решение задачи получено при помощи комбинированного метода, основанного на использовании интегрального преобразования, интегральных уравнений и дифференциально-разностного метода.

С помощью преобразований получена двумерная краевая задача, для решения которой используется вторая формула Грина.

Двумерная краевая задача преобразована в одномерную краевую задачу, для которой частное решение находится методом построения функции Грина.

Задача представлена в векторном виде. Общее решение краевой задачи определяется по формуле обращения преобразования Фурье.

Результаты

В данной работе изложен метод решения задачи скважинной и межскважинной электроразведки на постоянном токе в плоско-параллельной среде с цилиндрическими включениями.

В данной работе представлены разработанные, апробированные на ЭВМ комбинированные алгоритмы численного анализа электрических полей, описываемых трехмерными

нелинейными самосогласованными краевыми задачами в плоско-параллельной среде с цилиндрическими неоднородными включениями, изоляторами и электродами.

Этот класс моделей охватывает широкий ряд теоретических задач электрических и тепловых полей, имеющих важные практические приложения [1-13, 15-17, 21, 22].

Для решения задач расчета электрических полей разрабатывались общие и специальные методы математической физики [14, 18-20, 23-25].

Ключевые слова: нефтегазовое месторождение, межскважинное пространство, методы электроразведки, методы скважинной и межскважинной электроразведки, электрические поля постоянного тока, самосогласованная краевая задача, системы со сложными геометрическими параметрами, формула обращения преобразования Фурье, система интегральных уравнений Фредгольма второго рода, вторая формула Грина.

MODELING METHODS OF WELLS THE WEDGE-SHAPED MEDIUM WITH CYLINDRICAL INCLUSION

Introduction

In the development of oil and gas fields, with deep-seated geophysical search for minerals by electrical, borehole and cross-well electrical DC to study the structural heterogeneity of the formation, including the state of cross-borehole space are of great scientific and technological importance. Volumetric study of reservoir systems with complex geological settings is possible by mathematical processing of the induced electromagnetic field.

Objectives and methods of solution

The paper formulated a mathematical model of the three-dimensional boundary of the boundary value problem describing the electric fields generated by the current point sources, with cylindrical inhomogeneities electrodes and insulators; computational algorithms lowering dimension of the problem.

The solution obtained by the combined method based on the integral transformation on integral equations and differential-difference method.

Obtained using a two-dimensional transformation boundary value problem for which the solution is used a second Green formula.

With the help of a two-dimensional transformation boundary value problem is transformed into a one-dimensional boundary value problem for which a particular solution is the method of construction of the Green's function.

Presented task vector. The general solution of the problem is given by the treatment of the Fourier transform.

Results

In this paper a method of solving the problem of borehole and cross-well electrical direct current in a plane-parallel environment with cylindrical inclusions.

This paper presents the developed, tested by computer algorithms combined numerical analysis of electric fields described by the three-dimensional self-consistent nonlinear boundary value problems in a plane-parallel environment with cylindrical heterogeneous inclusions, insulators and electrodes.

This class of models of models covers a wide range of theoretical problems of electric and thermal fields with important practical applications [1-13, 15-17, 21, 22].

To solve the problems of calculation of electric fields developed general and specific methods of mathematical physics [14, 18-20, 23-25].

Key words: oil and gas field, inter-well space, methods of electrical exploration, methods of borehole and cross-well electrical exploration, electric field of direct current, self-consistent boundary value problem, the system with complex geometric parameters, the inversion formula of the Fourier transform, the system of Fredholm integral equations of the second kind, the second Green formula.

При исследовании залежей углеводородов нередко возникает необходимость подробного изучения структуры пласта и учета его особенностей. Среди множества методов изучения межскважинного пространства на месторождениях нефти и газа можно выделить методы скважиной электроразведки, в основе которых лежит исследование наведен-

ного электрического поля, путем обработки полученных физических данных можно получить объемную структуру неоднородных пород [1–8].

Скважинная электроразведка позволяет детально изучить структуру нефтегазового месторождения и учесть возможности осложнений [9–16].

Стремление к получению достоверного численного анализа математических с использованием ограниченных ресурсов вычислительных средств приводит к необходимости разработки эффективных алгоритмов. Основная трудность, находящаяся на этом пути, заключается в трехмерности и многосвязности расчетных областей, нелинейности математических моделей, содержащих в качестве исходных данных гладкие и разрывные функции. Трудности решения таких задач в общем случае приводят к необходимости разработки экономичных алгоритмов для определенного класса задач. Эти алгоритмы, как правило, основаны на комбинировании различных вычислительных методов [17–20].

Эффективность и универсальность метода интегральных уравнений позволяет создать автоматизированную систему научных исследований (АСНИ) электрических полей в сложных системах методом вычислительного эксперимента на основе разработанных пакетов прикладных программ.

АСНИ электрических полей можно использовать в качестве подсистемы САПР электрохимических технологий, электрохимической защиты металлических сооружений от коррозии и для автоматизированной интерпретации геофизических методов поиска полезных ископаемых, основанных на постоянном электрическом поле [22–24].

В настоящее время имеет место тенденция к созданию АСНИ на основе обобщенных математических моделей, универсальных алгоритмов и пакетов прикладных программ ППП.

Рассмотрим полупространство, разделенное на n клиновидных областей системой полуплоскостей, сходящихся на дневной поверхности. Все клиновидные области имеют общее ребро. В клиньях расположено

m цилиндрических областей с удельными электропроводностями σ_j , ($j = n + 1, \dots, n + m$), отличными от удельных электропроводностей клиньев σ_i ($i = 1, \dots, n$).

Проблема расчета потенциала в условиях среды рассматриваемого типа возникает в задачах скважинной электроразведки. Указанная модель среды является отражением тех случаев, когда месторождение представляет собой серию рудных тел, расходящихся веерообразно от поверхности земли в глубину. Во многих случаях рудные и жильные дайки имеют большую длину по простиранию — вдоль поверхности и по падению — в глубину, и могут быть моделированы в виде секторовидных неоднородностей, значительно отличающихся по своей удельной электрической проводимости от вмещающих пород.

Электрическое поле, создаваемое источником постоянного тока силы I , расположенного в точке $M_0(x_0, y_0, z)$, можно описать следующей краевой задачей:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\sigma(x, y) \frac{\partial U}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\sigma(x, y) \frac{\partial U}{\partial y}) + \sigma(x, y) \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -I \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z); \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=0}; \quad (2)$$

$$U_i \Big|_{\gamma_i} = U_j \Big|_{\gamma_j}, \quad \sigma_i \frac{\partial U_i}{\partial n_i} \Big|_{\gamma_i} = \sigma_j \frac{\partial U_j}{\partial n_j} \Big|_{\gamma_j}, \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, n + m; \quad U_i \rightarrow 0 \text{ при } x^2 + y^2 + z^2 \rightarrow \infty; \quad i = 1, 2, \dots, n + m. \quad (4)$$

В условиях (3) индексы i и j являются номерами соседних областей.

Решение задачи (1)–(4) можно получить при помощи комбинированного метода, основанного на интегральном преобразовании, интегральных и дифференциальных уравнениях и дифференциально-разностного метода.

Область симметрична по z , поэтому можем применить косинус-преобразование Фурье по z . Получим двумерную краевую задачу:

$$\frac{1}{\sigma(x, y)} \frac{\partial}{\partial x}(\sigma(x, y) \frac{\partial \bar{U}}{\partial x}) + \frac{1}{\sigma(x, y)} \frac{\partial}{\partial y}(\sigma(x, y) \frac{\partial \bar{U}}{\partial y}) - p^2 \bar{U} = -\frac{I}{2\sigma_{i_0}} \delta(x - x_0) \delta(y - y_0); \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad (6)$$

$$\bar{U}_i|_{S_i} = \bar{U}_j|_{S_i}, \sigma_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial n_i} \Big|_{S_i} = \sigma_j \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial n_i} \Big|_{S_i}, i=1, 2, \dots, n+m; \quad (7)$$

$$\bar{U}_i \rightarrow 0 \text{ при } \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty; \quad (8)$$

где $\bar{U}(x, y, p) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \bar{U}(x, y, z) \cos pzd p$;

S_i — граница области, образованной сечением плоскостью $z = const$ либо цилиндрической области Ω , либо полуплоскости, ограничивающей клиновидную область Ω_i .

Если воспользоваться второй формулой Грина

$$\iint_{\Omega} (vL\bar{u} - \bar{u}Lv) ds = \int_{\Gamma} (v \frac{\partial \bar{u}}{\partial N} - \bar{u} \frac{\partial v}{\partial N}) dl \quad (9)$$

и сделать соответствующие преобразования, то получим систему интегральных уравнений Фредгольма второго рода:

$$\gamma \bar{U}(Q) - 2 \sum_{i=1}^m \int_{S_i} (\sigma_i - \sigma_k) \bar{U}_i(M_l) \frac{\partial G(Q, M_l)}{\partial n} dl = \beta IG(Q, M_0). \quad (10)$$

В качестве вспомогательной функции возьмем $G(Q, M)$, которая является решением краевой задачи:

$$LG_i = \frac{1}{\sigma(x, y)} \frac{\partial}{\partial x} (\sigma(x, y) \frac{\partial G_i}{\partial x}) + \frac{1}{\sigma(x, y)} \frac{\partial}{\partial y} (\sigma(x, y) \frac{\partial G_i}{\partial y}) - p^2 G_i = -\frac{I}{2\sigma_{i_0}} \delta(M - M_0); \quad (11)$$

$$\frac{\partial G_i}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad (12)$$

$$G_i|_{S_i} = G_{i+1}|_{S_i}, \sigma_i \frac{\partial G_i}{\partial n_i} \Big|_{S_i} = \sigma_{i+1} \frac{\partial G_{i+1}}{\partial n_i} \Big|_{S_i},$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

$$G_i \rightarrow 0 \text{ при } \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty. \quad (14)$$

Общее решение задачи (1)–(4) восстанавливаем по формуле обращения преобразования Фурье:

$$U(x, y, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \bar{U}(x, y, p) \cos pzd p. \quad (15)$$

Рассмотрим применение предложенного метода для частного случая двух клиновидных областей с I цилиндрическим включением, т.е. $n = 2, m = 1$. Задача сводится к интегральному уравнению Фредгольма второго рода:

$$\bar{U}(Q) - 2 \int_S (\sigma_4 - \sigma_2) \bar{U}(M_l) \frac{\partial G(Q, M_l)}{\partial n} dl = \beta IG(Q, M_0). \quad (16)$$

Вспомогательная функция $G(Q, M)$ удовлетворяет краевой задаче (11)–(14) для случая двух клиньев. Решение этой задачи можно построить различными методами [18, 26].

Перейдем к полярной системе координат:

$$\frac{\partial^2 G}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial G}{\partial r} + \frac{1}{\sigma(\varphi)} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\sigma(\varphi) \frac{\partial G}{\partial \varphi}) - p^2 G_i = \quad (17)$$

$$= -\frac{1}{2\sigma_{i_0}} \delta(r - r_0) \delta(\varphi - \varphi_0);$$

$$\frac{\partial G}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=0, \pi} = 0, |G(0, \varphi, p)| < \infty; \quad (18)$$

$$G_1|_{\varphi=\varphi_1} = G_2|_{\varphi=\varphi_1}, \sigma_1 \frac{\partial G_1}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\varphi_1} = \sigma_2 \frac{\partial G_2}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\varphi_1}, \quad (19)$$

$$G \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty. \quad (20)$$

Решение задачи (17)–(20) построим на основе дифференциально-разностного метода. Аппроксимируем производные по φ , тогда получим краевую задачу для системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial^2 G_0}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial G_0}{\partial r} + \frac{2}{r^2 h^2} (G_1 - G_0) - p^2 G_0 = 0; \quad (21)$$

$$\frac{\partial^2 G_j}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial G_j}{\partial r} + \frac{2}{r^2 h^2} [\sigma_{j+\frac{1}{2}} (G_{j+1} - G_j) - \sigma_{j-\frac{1}{2}} (G_j - G_{j-1})] - p^2 G_j = -\frac{I_{kj} \delta(r - r_0)}{2\sigma_k h r_0}, j = \overline{1, M};$$

$$\frac{\partial^2 G_{N+1}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial G_{N+1}}{\partial r} + \frac{2}{r^2 h^2} (G_N - G_{N+1}) - p^2 G_{N+1} = 0;$$

$$G_j \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty;$$

где $n = \frac{\pi}{N+1}$, $\sigma_{j \pm \frac{1}{2}} = \sigma(\varphi_j \pm \frac{h}{2})$, $\sigma_j = \frac{\sigma(\varphi_j + 0) + \sigma(\varphi_j - 0)}{2}$;

$$\begin{cases} I, k = J, \\ I_{kj} = 0, k \neq J, \varphi_k = \varphi_0. \end{cases}$$

Пронумеруем систему уравнений (21) от I до M = N + 2 и представим задачу в векторном виде:

$$\frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{V}}{\partial r} + \frac{1}{r^2 h^2} T \bar{V} - p^2 \bar{V} = -\frac{\bar{I} \delta(r - r_0)}{2\sigma_k h r_0}, \quad (22)$$

$$\bar{V} \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty.$$

Здесь

$$\bar{V} = (G_1, \dots, G_M)^T, \bar{I} = (0, \dots, I_{kj}, 0, \dots, 0)^T.$$

$$T = \begin{bmatrix} A_1 & -B_1 & 0 \dots & 0 \dots & 0 \\ -C_2 & A_2 & -B_2 & 0 \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 \dots & 0 & -C_{M-1} & A_{M-1} & -B_{M-1} \\ 0 \dots & 0 & 0 & -C_{M-1} & A_{M-1} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial^2 G_0}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial G_0}{\partial r} + \frac{2}{r^2 h^2} (G_1 - G_0) - p^2 G_0 = 0.$$

Якобиова матрица T — простой структуры, поэтому она представляется в виде:

$T = R^{-1} \Lambda R$, где $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_M)$ — диагональная матрица M -порядка.

Умножим (22) на матрицу R слева, получим:

$$\frac{\partial^2 U_n}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_n}{\partial r} - \frac{\lambda_n}{r^2 h^2} U_n - p^2 U_n = - \frac{I \delta(r-r_0) r_{nk}}{2 \sigma_k h r_0},$$

$$U_n \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty; n = 1, \dots, M. \quad (23)$$

Решение этой задачи определяется методом построения функции Грина:

$$\begin{cases} U_n(r) = \frac{I r_{nk}}{2 \sigma_k h} K v_n(p r_0) I v_n(p r), r \leq r_0 \\ K v_n(p r) I v_n(p r_0), r \geq r_0, \end{cases} \quad (24)$$

где, $v_n = \frac{\sqrt{\lambda_n}}{h}$, r_{nk} — элемент матрицы R .

Для определения собственных чисел λ_n и собственных векторов r_{nk} матрицы T необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} (A_1 - \lambda) r_1 - B_1 r_2 = 0 \\ \dots \dots \dots \\ -C_m r_{m-1} + (A_m - \lambda) r_m + B_m r_{m+1} = 0 \\ \dots \dots \dots \\ -C_m r_{m-1} + (A_m - \lambda) r_m = 0. \end{cases} \quad (25)$$

Характеристический многочлен Якобиевой матрицы задачи (25) раскрывается по следующим рекуррентным формулам:

$$\begin{aligned} D_0(\lambda) &= 1, D_1(\lambda) = A_1 - \lambda, D_j(\lambda) = \\ &= (A_j - \lambda) D_{j-1}(\lambda) - B_{j-1} C_j D_{j-2}(\lambda), j = 1, \dots, M. \end{aligned}$$

Корни характеристического уравнения $D_M = 0$ являются собственными числами матрицы T . Собственные векторы вычисляются по явным формулам [7]:

$$r_{js} = l_s B_1^{-1} B_2^{-1} \dots B_{j-1}^{-1} D_{j-1}(\lambda_s), j, s = 1, 2, \dots, M.$$

Для матрицы T' собственные векторы вычисляются по формулам:

$$r'_{js} = l'_s C_2^{-1} C_3 \dots C_j^{-1} D_{j-1}(\lambda_s), j, s = 1, 2, \dots, M.$$

Из условия биортогональности собственных векторов матриц T и T'

$$\begin{cases} r_{1s} r'_{j1} + r_{2s} r'_{j2} + \dots + r_{Ms} r'_{jM} = 0, s \neq j \\ d_s, s = j \end{cases}$$

Список литературы

1. Долوماتов М.Ю., Карабельская И.В., Ковалева Э.А. Проектирование ИС по свойствам и электронным характеристикам сложных многокомпонентных органических систем // Электротехнические и информаци-

получаем $l_s = 1, l'_s = \frac{1}{d_s}$.

Матрица, построенная из собственных векторов R_j матрицы T' , и будет искомой матрицей R . Теперь можно определить решение задачи (22).

$$\bar{V} = R^{-1} \bar{U}$$

или

$$G_j(r, p) = \sum_{n=1}^M U_n B_1^{-1} B_2^{-1} \dots B_{j-1}^{-1} D_{j-1}(\lambda_n), j = 1, 2, \dots, M; \quad (26)$$

где U_n вычисляются по формуле (24).

Если направляющей цилиндра является эллипс:

$$(x-x_k)^2 a^{-2} + (y-y_k)^2 b^{-2} = 1,$$

то задача сводится к решению интегрального уравнения:

$$\bar{U}(\varphi) - 2(\sigma_4 - \sigma_2) \int_0^{2\pi} \bar{U}(t) K(t, \varphi) dt = f(\varphi),$$

где $K(t, \varphi) = \frac{\partial G}{\partial \eta} a \sin t + \frac{\partial G}{\partial \xi} b \cos t$; $f(\varphi) = \beta IG(\varphi, \varphi_0)$ (27)

Решение двумерной задачи (5)–(8) находим по формуле

$$\bar{U}(Q) - 2 \sum_{i=1}^m \int_{S_i} (\sigma_i - \sigma_k) \bar{U}_i(M_i) \frac{\partial G(Q, M_i)}{\partial n} dl = \beta IG(Q, M_0), \quad (28)$$

а общее решение задачи (1)–(4) — по формуле обращения преобразования Фурье:

$$U(x, y, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \bar{U}(x, y, p) \cos p z dp \quad (29)$$

Все оценки погрешности, полученные для плоско-параллельной среды, верны и для клиновидной среды.

Вывод

Данный метод решения задачи позволяет рассчитывать поле точечного источника, расположенного вне цилиндрических включений. По принципу взаимности можно получить решение вне цилиндрических включений, когда источник тока расположен внутри цилиндрических неоднородностей.

Методы реализованы на ЭВМ в виде комплекса программ.

онные комплексы и системы. 2014. № 2. Т. 10. С. 45–51.

2. Долوماتов М.Ю., Шуляковская Д.О., Карабельская И.В. Интегральные характеристики спектров сложных молекулярных систем и их информационные свойства // Электротехнические и информационные

- комплексы и системы. 2015. № 3. Т. 11. С. 113–120.
3. Карабельская И.В. Исследования электрических полей постоянного тока в системах со сложными геометрическими параметрами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. № 1. Т. 11. С. 45–51.
 4. Карабельская И.В. Примеры расчета электрических полей при электрохимической защите трубопроводов от коррозии // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. № 2. Т. 11. С. 23–29.
 5. Карабельская И.В., Абызбаев И.И. Методы расчета электрических полей при электрохимической защите трубопроводов от коррозии в неоднородных и клиновидных средах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. № 4. Т. 11. С. 25–33.
 6. Карабельская И.В., Абызбаев И.И., Майский Р.А. Моделирование методов исследования скважин на основе обобщенной формулы Грина // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. Вып. 2 (104). С. 18–27.
 7. Карабельская И.В., Абызбаев И.И. Моделирование методов исследования скважин на основе формирования системы эквивалентных интегральных уравнений // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. Вып. 3 (105). С. 59–71.
 8. Карабельская И.В., Абызбаев И.И., Ахметов И.В. Обобщенная функция Грина // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. № 2. Т. 12. С. 29–34.
 9. Иванов В.Т., Болотнов А.М., Гадилова Ф.Г., Кильдибекова Г.Я., Кризский В.Н., Надергулов И.У., Карабельская И.В. Комплекс программно-алгоритмического обеспечения численных исследований электрических полей в некоторых сложных системах // Известия вузов: Электромеханика. 1987. № 11. С. 21–26.
 10. Иванов В.Т., Болотнов А.М., Гадилова Ф.Г., Кильдибекова Г.Я., Кризский В.Н., Надергулов И.У., Карабельская И.В. Комплекс программно-алгоритмического обеспечения численных исследований электрических полей в некоторых сложных системах // I Всесоюзн. конф. по теоретической электротехнике: тез. докл. Ташкент, 1987. С. 34–35.
 11. Болотнов А.М., Иванов В.Т., Кильдибекова Г.Я., Карабельская И.В. Методы расчета трехмерных краевых задач для эллиптических уравнений в многосвязных областях с цилиндрическими границами. Деп. в ВИНТИ 4.12.86. № 8870. В 86. Уфа: БГУ, 1986. 49 с.
 12. Ураков А.Р., Карамов В.И., Карабельская И.В. Исследования автомобильных процессов нестационарной ЭХО // Современная электротехнология в машиностроении: сб. тр. Всеросс. науч.-техн. конф. Тула, 1997. С. 161–162.
 13. Иванов В.Т., Гусев В.Г., Фокин А.Н. Оптимизация электрических полей, контроль и автоматизация гальванообработки. М.: Машиностроение, 1986. 211 с.
 14. Андреев И.Н. Коррозия металлов и их защита. Казань: Татарское кн. изд-во, 1979. 120 с.
 15. Заборовский А.И. Электроразведка. М.: Гостехнефиздат, 1948.
 16. Дахнов В.Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин. М.: Недра, 1981. 334 с.
 17. Козырин А.К. Электрическая корреляция разрезов скважин. М.: Недра, 1985.
 18. Иванов В.Т., Масютина М.С. Методы решения прямых и обратных задач электрокаротажа. М.: Наука, 1983. 143 с.
 19. Иванов В.Т. Некоторые проблемы вычислительной математики применительно к расчетам электрических полей в электрохимических системах / Препринт докл. Президиуму БФАН СССР. Уфа: БФАН СССР, 1983. 39 с.
 20. Самарский А.А. Проблемы применения вычислительной техники // Вестник АН СССР. 1984. № 11. С. 17–29.
 21. Иванов В.Т. Теория информационных систем и систем управления с распределенными параметрами: тез. докл. Всесоюзн. конф.: Ч. 1. Уфа: БФАН СССР, 1976. С. 19–20.
 22. Иванов В.Т. Методы расчета трехмерных электрических полей в электролитах // Краевые задачи математической физики и их приложения. Уфа: БФАН СССР, 1976. С. 18–53.
 23. Иванов В.Т., Глазов Н.П., Махмутов М.М. Расчет трехмерных электрических

полей в неоднородной среде с протяженными тонкими цилиндрическими электродами // *Электричество*. 1985. № 6. С. 48–52.

24. Самарский А.А. Введение в численные методы. М.: Наука, 1982. 271 с.

25. Дмитриев В.И., Захаров Е.В. Метод решения задач электродинамики неоднородных сред // *Журнал вычисл. матем. и матем. физ.* 1970. № 6. С. 1458–1464.

26. Сахарников Н.А. Поле точечного источника в среде, состоящей из клиновидных неоднородностей // *Ученые записки ЛГУ. Сер. физ. и геол. наук*. 1966. Вып. 16. № 329. С. 129–170.

References

1. Dolomatov M.Yu., Karabel'skaya I.V., Kovaleva E.A. Proektirovanie IS po svoistvam i elektronnykh kharakteristikam slozhnykh mnogokomponentnykh organicheskikh sistem // *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy*. 2014. № 2. Т. 10. С. 45–51.

2. Dolomatov M.Yu., Shulyakovskaya D.O., Karabel'skaya I.V. Integral'nye kharakteristiki spektrov slozhnykh molekulyarnykh sistem i ikh informatsionnye // *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy*. 2015. № 3. Т. 11. С. 113–120.

3. Karabel'skaya I.V. Issledovaniya elektricheskikh polei postoyannogo toka v sistemakh so slozhnymi geometricheskimi parametrami // *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy*. 2015. № 1. Т. 11. С. 45–51.

4. Karabel'skaya I.V. Primery rascheta elektricheskikh polei pri elektrokhimicheskoi zashchite truboprovodov ot korrozii // *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy*. 2015. № 2. Т. 11. С. 23–29.

5. Karabel'skaya I.V., Abyzbaev I.I. Metody rascheta elektricheskikh polei pri elektrokhimicheskoi zashchite truboprovodov ot korrozii v neodnorodnykh i klinovidnykh sredakh // *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy*. 2015. № 4. Т. 11. С. 25–33.

6. Karabel'skaya I.V., Abyzbaev I.I., Maiskii R.A. Modelirovanie metodov issledovaniya skvazhin na osnove obobshchennoi formuly Grina // *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov*. 2016. Vyp. 2 (104). С. 18–27.

7. Karabel'skaya I.V., Abyzbaev I.I. Modelirovanie metodov issledovaniya skvazhin na osnove formirovaniya sistemy ekvivalentnykh integral'nykh uravnenii // *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov*. 2016. Vyp. 3 (105). С. 59–71.

8. Karabel'skaya I.V., Abyzbaev I.I., Akhmetov I.V. Obobshchennaya funktsiya Grina // *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy*. 2016. № 2. Т. 12. С. 29–34.

9. Ivanov V.T., Bolotnov A.M., Gadilova F.G., Kil'dibekova G.Ya., Krizskii V.N., Nadergulov I.U., Karabel'skaya I.V. Kompleks programmno-algoritmicheskogo obespecheniya chislennykh issledovaniy elektricheskikh polei v nekotorykh slozhnykh sistemakh // *Izvestiya vuzov: Elektromekhanika*. 1987. № 11. С. 21–26.

10. Ivanov V.T., Bolotnov A.M., Gadilova F.G., Kil'dibekova G.Ya., Krizskii V.N., Nadergulov I.U., Karabel'skaya I.V. Kompleks programmno-algoritmicheskogo obespecheniya chislennykh issledovaniy elektricheskikh polei v nekotorykh slozhnykh sistemakh // *I Vsesoyuzn. konf. po teoreticheskoi elektrotekhnike: tez. dokl. Tashkent*, 1987. С. 34–35.

11. Bolotnov A.M., Ivanov V.T., Kil'dibekova G.Ya., Karabel'skaya I.V. Metody rascheta trekhmernykh kraevykh zadach dlya ellipticheskikh uravnenii v mnogosvyaznykh oblastiakh s tsilindricheskimi granitsami. Dep. v VINITI 4.12.86. № 8870. V 86. Ufa: BGU, 1986. 49 s.

12. Urakov A.R., Karamov V.I., Karabel'skaya I.V. Issledovaniya avtomodel'nykh protsessov nestatsionarnoi EKHO // *Sovremennaya elektrotekhnologiya v mashinostroenii: sb. tr. Vseross. nauch.-tekhn. konf. Tula*, 1997. С. 161–162.

13. Ivanov V.T., Gusev V.G., Fokin A.N. Optimizatsiya elektricheskikh polei, kontrol' i avtomatizatsiya gal'vanoobrabotki. М.: Mashinostroenie, 1986. 211 s.

14. Andreev I.N. Korroziya metallov i ikh zashchita. Kazan': Tatarskoe kn. izd-vo, 1979. 120 s.

15. Zaborovskii A.I. *Elektrorazvedka*. М.: Gostekhnefizdat, 1948.

16. Dakhnov V.N. Elektricheskie i magnitnye metody issledovaniya skvazhin. М.: Nedra, 1981. 334 s.

17. Kozyrin A.K. Elektricheskaya korrelyatsiya razrezov skvazhin. M.: Nedra, 1985.
18. Ivanov V.T., Masyutina M.S. Metody resheniya pryamykh i obratnykh zadach elektrokartotazha. M.: Nauka, 1983. 143 s.
19. Ivanov V.T. Nekotorye problemy vychislitel'noi matematiki primenitel'no k raschetam elektricheskikh polei v elektrokhimicheskikh sistemakh / Preprint dokl. Prezidiumu BFAN SSSR. Ufa: BFAN SSSR, 1983. 39 s.
20. Samarskii A.A. Problemy primeneniya vychislitel'noi tekhniki // Vestnik AN SSSR. 1984. № 11. S. 17–29.
21. Ivanov V.T. Teoriya informatsionnykh sistem i sistem upravleniya s raspredelennymi parametrami: tez. dokl. Vsesoyuzn. konf.: Ch. 1. Ufa: BFAN SSSR, 1976. S. 19–20.
22. Ivanov V.T. Metody rascheta trekhmernykh elektricheskikh polei v elektrolitakh // Kraevye zadachi matematicheskoi fiziki i ikh prilozheniya. Ufa: BFAN SSSR, 1976. S. 18–53.
23. Ivanov V.T., Glazov N.P., Makhmutov M.M. Raschet trekhmernykh elektricheskikh polei v neodnorodnoi srede s protyazhennymi tonkimi tsilindricheskimi elektrodami // Elektrichestvo. 1985. № 6. S. 48–52.
24. Samarskii A.A. Vvedenie v chislennye metody. M.: Nauka, 1982. 271 s.
25. Dmitriev V.I., Zakharov E.V. Metod resheniya zadach elektrodinamiki neodnorodnykh sred // Zhurnal vychisl. matem. i matem. fiz. 1970. № 6. S. 1458–1464.
26. Sakharnikov N.A. Pole tochechnogo istochnika v srede, sostoyashchei iz klinovidnykh neodnorodnostei // Uchenye zapiski LGU. Ser. fiz. i geol. nauk. 1966. Vyp. 16. № 329. S. 129–170.



Зайнуллин А. Р.
Zainullin A. R.

аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



Багманов В. Х.
Bagmanov V. Kh.

доктор технических наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные системы», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

УДК 629.783

МЕТОД ПОДАВЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПОЛОС ПРОПУСКАНИЯ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОГО ФОТОННОГО СВЧ-ФИЛЬТРА В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ

Важную задачу в телекоммуникационных системах выполняет фильтрация, а увеличение объемов и скоростей передачи данных повышает планку необходимого быстродействия систем. В связи с этим решение задачи фильтрации радиочастотных сигналов предлагается перенести в оптическую область, где проектируются фотонные СВЧ-фильтры. Целью реализации предложенного фотонного СВЧ-фильтра является повышение спектральной эффективности оптического канала связи в гибридных системах связи за счет повышения показателей добротности. Помимо повышения спектральной эффективности системы связи, актуальной является задача подавления повторяющихся спектральных составляющих фотонных СВЧ-фильтров вследствие периодичности структуры частотной характеристики фильтров, связанной с дискретной природой временной обработки сигналов. Это свойство препятствует реализации полосовой фильтрации с широкой спектральной полосой подавления, необходимой во многих важных задачах селекции сигналов, что, в свою очередь, ограничивает возможность использования широкополосных свойств фотоники. Поэтому разработка неперiodической структуры полосового фотонного СВЧ-фильтра с низким уровнем шумов является актуальной и важной задачей.

В статье предложен и продемонстрирован метод подавления периодических спектральных полос пропускания фотонного некогерентного многоотводного КИХ-фильтра в гибридных системах связи, основанный на эффекте Верньера, заключающийся в добавлении когерентного оптического Лайот-фильтра. Многоотводный КИХ-фильтр основан на использовании свойств фотоники для задержки, оценки и комбинирования набора повторений СВЧ-сигнала. Как правило, задержка вносится дисперсной средой распространения. Когерентный оптический Лайот в данной работе реализован при помощи устройств дифференциальной групповой задержки, что делает его более универсальным.

Экспериментальные результаты демонстрируют полосовой фильтр, полученный комбинированием трехотводного КИХ-фильтра с Лайот-фильтром второго порядка. Данный метод позволяет увеличить рабочий диапазон фотонных микроволновых трансверсальных фильтров для полноценного использования широкополосной природы фотонных технологий.

Ключевые слова: микроволновая фотоника, фотонный микроволновый фильтр, Лайот-фильтр, радиофотоника.

A METHOD OF ELIMINATION PERIODIC SPECTRAL PASSBANDS BASED ON COMBINED PHOTONIC MICROWAVE FILTER IN HYBRID NETWORKS

Filtering performs an important role in telecommunication systems, but rising amount of information and bitrates increase the required system performance level. Thereby, it is proposed to transfer RF signal filtering into optical domain where microwave photonic filters are designed. The main purpose of the proposed microwave photonic filter implementation is to enhance the optical channel spectral efficiency in hybrid communication systems. It is proposed to implement by Q-factors increasing. Multitap FIR filters are based on using photonics to delay, weight and combine a set of replicas of a microwave signal. Typically the delay is introduced by a dispersive medium to exploit the parallelism allowed by photonics. However, FIR filters are intrinsically periodic in frequency which is a severe drawback to fully exploit the wideband nature inherent to photonics. The approach followed here is based on combining the FIR filter with a coherent optical Lyot filter to achieve the cascade of their spectral responses.

A method to eliminate the periodic spectral passbands of photonic incoherent multitap FIR filters based on adding a coherent optical filter is proposed and demonstrated. Experimental results show a single passband filter obtained from the combination of a three-tap FIR filter with a two-stage Lyot filter. This approach increases the range of operation of photonic microwave transversal filters to fully exploit the broadband nature of photonic technology.

Key words: microwave photonics, photonic microwave filter, Layot filter, radiophotonics.

Введение

Значительный интерес технология фотонной СВЧ-фильтрации привлекла благодаря способности к широкополосной настройке и крупным достижениям в области интеграции в оптоволоконные системы [1, 2]. В литературе было рассмотрено множество различных структур построения фильтров. В целом известные структуры фотонных фильтров можно классифицировать по следующим основным методологиям построения: некогерентные многоотводные методы, основанные на реализации конечной импульсной характеристики (КИХ-фильтры) [3-6], и когерентные методы проектирования фотонных фильтров с использованием оптических фильтров с дальнейшим переносом их передаточной характеристики в СВЧ-диапазон [7, 8]. Многоотводные КИХ-фильтры легко перестраиваемы и реконфигурируемы [4], лишены частотной нестабильности, присущей когерентным структурам фильтров, нечувствительны к изменениям окружающей среды вследствие некогерентной структуры, что в совокупности привело к положительным результатам при их интеграции в оптические системы [6].

Тем не менее, передаточная характеристика КИХ-фильтров имеет периодическую

структуру, т.е. присутствует несколько гармонических полос пропускания вследствие природных особенностей дискретной обработки сигналов. Это является серьезным недостатком, т.к. не позволяет в полной мере использовать широкополосные свойства фотоники. Отношение периодичности фильтра к ширине полосы пропускания является существенным ограничением. Кроме того, периодическая структура фотонных СВЧ-фильтров препятствует реализации полосовой фильтрации с широкой спектральной полосой подавления, необходимой во многих важных задачах селекции сигналов. Отношение между спектральной периодичностью и шириной пропускания фильтра для данного числа отводов служит ограничивающим фактором применимости данного подхода фильтрации. Поэтому разработ фотонного СВЧ-фильтра с низким уровнем шумов является актуальной и важной задачей.

Ранее было предложено несколько структур многоотводных КИХ-фильтров для решения задачи подавления периодичности спектральной характеристики, включая неравномерное распределение оптических источников [9] и разрезание спектра широкополосного источника излучения [10]. В данной работе представлен метод комбинирования

некогерентного многоотводного КИХ-фильтра с когерентным Лайот фильтром для достижения стабильности и повышения добротности КИХ-фильтров без ограничений со стороны их периодической природы спектральной характеристики.

Принцип работы

Многоотводный КИХ-фильтр основан на использовании свойств фотоники для задержки, оценки и комбинирования набора повторений СВЧ-сигнала. Как правило, задержка вносится дисперсной средой распространения. Так как после процесса фотодетектирования уже невозможно произвести фильтрацию повторяющихся нежелательных спектральных составляющих СВЧ-сигнала, реализацию этой задачи необходимо выполнять в оптической области путем комбинирования КИХ-фильтров с различным спектральным периодом (FSR). Метод, использованный в данной работе, основан на комбинировании КИХ-фильтра с когерентным оптическим фильтром для получения каскадной результирующей спектральной характеристики. При точной настройке обоих спектральных откликов фильтров эффект будет аналогичен каскадному подключению набора нескольких фильтров, и, тем самым, нежелательные спектральные повторения будут ликвидированы, т.е. произойдет подавление гармоник.

Оптический Лайот фильтр [11–13] был выбран в качестве когерентного оптического фильтра из-за своей простоты, реконфигурируемости и надежности, объясняемой тем фактом, что все оптические сигналы будут проходить по общему физическому каналу. Лайот фильтр, как правило, состоит из набора двулучепреломляющих поляризующих пластин, толщина каждой следующей из которых в два раза меньше предыдущей. Поляризационная ось каждой из двулучепреломляющих пластин ориентирована под углом в 45° по отношению к оси поляризатора. Свет, распространяющийся в кристалле, можно представить в виде двух компонент, имеющих различные фазовые задержки. Относительная задержка фазы двух поляризационных компонент зависит от длины

волны. В данной экспериментальной установке двулучепреломляющие пластины были заменены устройством DGD (устройство групповой дифференциальной задержки), которое оказывает идентичный эффект на проходящее излучение, и является более универсальным. Это означает, что при необходимости реконфигурации Лайот фильтра для получения других значений FSR достаточно будет подключить в схему дополнительное устройство, или же изменить величину DGD в случае с электронным устройством.

Подход, использованный в данной работе, основывался на применении эффекта Верньера, суть которого заключается в следующем: прореживание спектра достигается из-за различного спектрального расстояния между гармониками, и поэтому полученное значение FSR будет больше исходного значения [14].

Конечный частотный отклик разработанного фильтра имеет следующий вид:

$$|H(f)| = |H_{incoherent}(f)| \cdot |H_{coherent}(f)|, \quad (1)$$

где $H_{incoherent}(f)$ — отклик КИХ-фильтра; $H_{coherent}(f)$ — отклик Лайот фильтра.

Целью работы является использование КИХ-фильтра для получения необходимой пропускной способности и формы огибающей и использование большей периодичности Лайот фильтра для подавления нежелательных гармоник.

Передаточная характеристика КИХ-фильтра выглядит следующим образом:

$$|H_{incoherent}(f)| = \left| \sum_{k=1}^N P_k e^{-j[2\pi f(k-1)\Delta\tau]} \right|, \quad (2)$$

где N — число отводов (в нашем случае число оптических несущих); $\Delta\tau$ — временная задержка между несущими, которая определяется по следующей формуле:

$$\Delta\tau = D \cdot L \cdot \Delta\lambda,$$

где D — показатель хроматической дисперсии среды распространения; L — длина дисперсионной среды; $\Delta\lambda$ — расстояние между оптическими несущими.

Передаточная характеристика Лайот фильтра выглядит следующим образом:

$$|H_{coherent}(f)| = \left| \cos^2 \left(\frac{\pi \cdot DGD \cdot f}{n} \right) \right|, \quad (3)$$

где DGD — это величина дифференциальной групповой задержки; n — порядок Лайот фильтра.

Значения FSR обоих фильтров должны строго удовлетворять следующему условию:

$$FSR_{coherent} = m \cdot FSR_{incoherent}, \quad (4)$$

где m — целое число.

Показателем эффективности системы является отношение добротностей комбинированных фильтра с традиционным КИХ-фильтром. Добротность, или Q-фактор, фильтра связывает величину FSR с шириной пропускания главной гармоники по уровню -3 дБ:

$$Q = \frac{FSR}{BW}.$$

Соотношение добротностей комбинированного фильтра и КИХ-фильтра определяется следующим выражением:

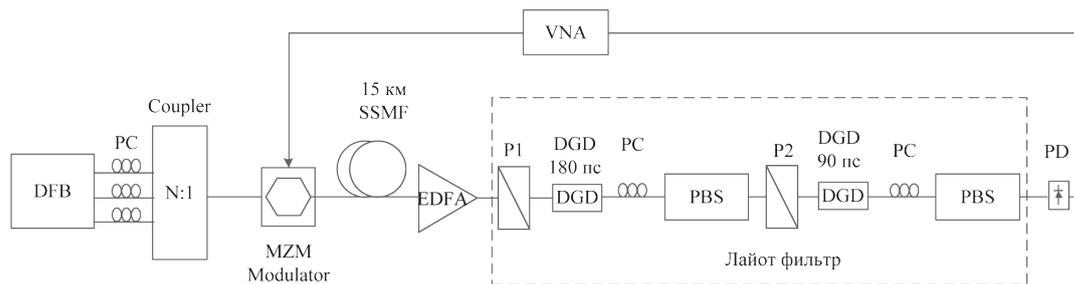
$$\frac{Q_{cascaded}}{Q_{КИХ}} = m. \quad (5)$$

Экспериментальные результаты

Экспериментальная установка, изображенная на рисунке 1, использовалась для подтверждения работоспособности предложенной схемы фильтрации.

КИХ-фильтр был реализован при помощи трех DFB-лазеров. Модулятор Маха-Цендера использовался для амплитудной модуляции оптического сигнала. Была использована однополосная модуляция (ОБП), чтобы избежать эффекта подавления несущей. В качестве дисперсионной среды распространения было выбрано одномодовое оптическое волокно SMF-28e длиной 15 км. Для компенсации оптических потерь использовался EDFA усилитель.

Спектральный отклик трехотводного КИХ-фильтра изображен на рисунке 2, где теоретический спектральный отклик был получен из выражения (2) и изображен в виде пунктирной линии. Согласно полученным результатам, значение FSR фильтра равно 2,7 ГГц.



DFB — лазер с распределённой обратной связью; PC — поляризационный контроллер; SSMF — стандартное одномодовое оптическое волокно; EDFA — волоконно-оптический усилитель на оптическом волокне, легированном ионами эрбия; DGD — устройство дифференциальной групповой задержки; P1, P2 — оптические поляризаторы; PBS — поляризационный делитель потока; PD — фотодетектор; VNA — векторный анализатор цепей

Рисунок 1. Экспериментальная установка трехотводного КИХ-фильтра, комбинированного с Лайот фильтром второго порядка

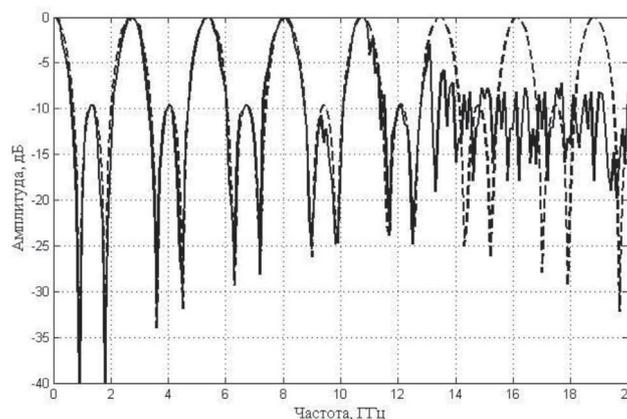


Рисунок 2. Экспериментальные (сплошная линия) и теоретические (пунктирная линия) отклики трехотводного КИХ-фильтра. Величина FSR равна 2,7 ГГц

Оптический Лайот фильтр второго порядка реализован на основе устройства перестраиваемой дифференциальной групповой задержки с временными задержками 180 и 90 пс. Оптические поляризаторы (P1 и P2) были использованы для формирования угла поляризации в 45° по отношению к главной оси распространения. На рисунке 3 изображен отклик Лайот фильтра второго порядка. Результаты симуляции также изображена на рисунке 3. В данном случае величина FSR соответствует величине 10,75 ГГц.

Спектральный отклик комбинированных когерентного и некогерентного фильтров изображен на рисунке 4, реализованных по схеме, изображенной на рисунке 1. Сравнивая полученный результат с откликом КИХ-фильтра, можно сделать вывод, что нежелательные спектральные повторения в рабочем

диапазоне фильтра были подавлены, а полоса пропускания основной гармоники сохранилась на прежнем уровне (около 700 МГц по уровню -3 дБ), величина FSR увеличилась до 10,75 ГГц.

В данном эксперименте величина добротности КИХ-фильтра составляет около 3,8, в то время как добротность комбинированного фотонного фильтра, спектральный отклик которого изображен на рисунке 4, составляет примерно 14,5, что согласно (6) почти в 4 раза превышает значение добротности изначального СВЧ фотонного КИХ-фильтра. Чтобы получить такое значение добротности, используя только КИХ-фильтр, необходимо увеличить количество источников излучения на 4, что приведет к последующему повышению экономических затрат, размеров, а также повышенным энергозатратам.

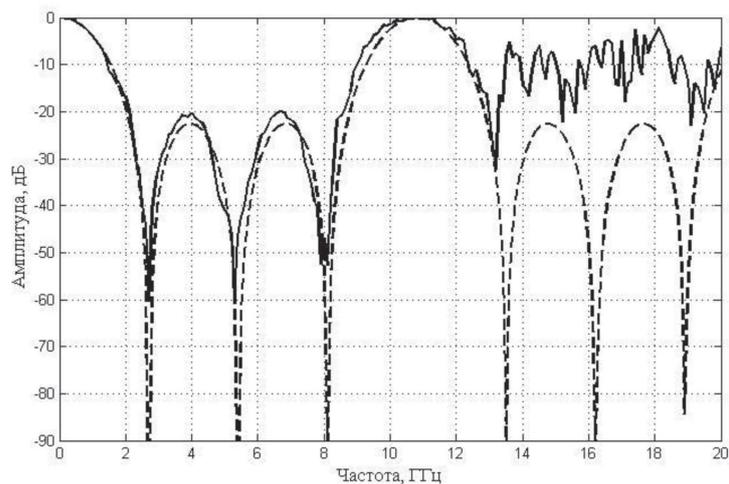


Рисунок 3. Экспериментальные (сплошная линия) и теоретические (пунктирная линия) отклики Лайот фильтра второго порядка. Величина FSR равна 10,75 ГГц

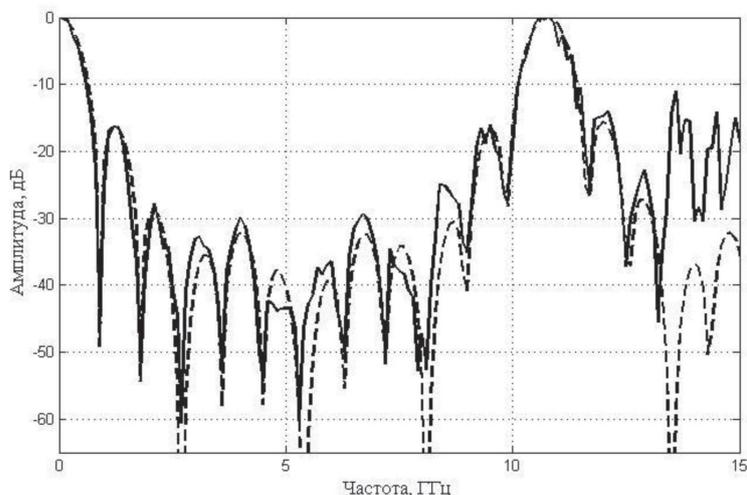


Рисунок 4. Экспериментальные (сплошная линия) и теоретические (пунктирная линия) отклики однополосного фотонного СВЧ-фильтра, полученного путем комбинирования трехотводного КИХ-фильтра (рисунок 2) и Лайот фильтра второго порядка (рисунок 3)

Вывод

В работе предложен и экспериментально продемонстрирован метод подавления спектральных повторений СВЧ фотонного КИХ-фильтра, что позволило получить полосовой фотонный фильтр и использовать КИХ-фильтры в приложениях с более широкой рабочей полосой.

Сочетание метода получения полосового многоотводного КИХ-фильтра и повышения эффективности фильтров данного типа [5] с интеграцией целостной структуры когерентного и некогерентного фильтров [6] позволило получить продукт, способный конкурировать с классическими фильтрами, основанными на СВЧ-технологиях.

Список литературы / References

1. Yao J. Photonics to the rescue: A fresh look at microwave photonic filters // *IEEE Microwave Magazine*. 2015. Vol. 16. No. 8. P. 46–60.
2. Iezekiel S., Burla M., Klamkin J., Marpaung D., Capmany J. RF Engineering Meets Optoelectronics: Progress in Integrated Microwave Photonics // *IEEE Microwave Magazine*. 2015. Vol. 16. No. 8. P. 28–45.
3. Norton D., Johns S., Keefer C., Soref R. Tunable microwave filtering using high dispersion fiber time delays // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 1994. Vol. 6. No. 7. P. 831–832.
4. Vidal B., Piqueras M.A., Martí J. Photonic microwave filter based on spectrum slicing with reconfiguration capability // *IEE Electronics Letters*. 2005. Vol. 41. No. 23. P. 1286–1287.
5. Vidal B., Corral J.L., Martí J. All-optical WDM multi-tap microwave filter with flat bandpass // *Optics Express*. 2006. Vol. 14. No. 2. P. 581–586.
6. Sancho J., Bourderionnet J., Lloret J., Combrié S., Gasulla I., Xavier S., Sales S., Colman P., Lehoucq G., Dolfi D., Capmany J., de Rossi A. Integrable microwave filter based on a photonic crystal delay line // *Nature Communications*. 2012. Vol. 3. P. 1–9.
7. Rasras M.S., Tu K.Y., Gill D.M., Chen Y.K., White A.E., Patel S.S., Pomerene A., Carothers D., Beattie J., Beals M., Michel J., Kimerling L.C. Demonstration of a tunable microwave-photonic notch filter using low-loss silicon ring resonators // *Journal of Lightwave Technology*. 2009. Vol. 27. No. 12. P. 2105–2110.
8. Palací J., Pérez-Millán P., Villanueva G.E., Cruz J.L., Andrés M.V., Martí J., Vidal B. Tunable photonic microwave filter with single bandpass based on a phase-shifted fiber bragg grating // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2010. Vol. 22. No. 19. P. 1467–1469.
9. Vidal B., Polo V., Corral J.L., Martí J. Harmonic suppressed photonic microwave filter // *Journal of Lightwave Technol.* 2003. Vol. 21. No. 12. P. 3150–3154.
10. Mora J., Ortega B., Diez A., Cruz J.L., Andres M.V., Capmany J., Pastor D. Photonic microwave tunable single-bandpass filter based on a Mach-Zehnder Interferometer // *Journal of Lightwave Technol.* 2006. Vol. 24. No. 7. P. 2500–2509.
11. Ge J., Fok M.P. Frequency band selectable microwave photonic multiband bandpass filter based on lyot filter // *Proc. Lasers and Electro-Optics Conf.* 2015. Vol. STh3F.2, P. 1–2.
12. Ge J., Feng H., Scott G., Fok M.P. High-speed tunable microwave photonic notch filter based on phase modulator incorporated Lyot filter // *Optical Letters*. 2015. Vol. 40. No. 1. P. 48–51.
13. Zhang A.L., Huang C., Wu X.J. A band-pass microwave photonic filter based on Lyot-Sagnac filter and cascaded optical structures // *Optoelectronics Letters*. 2014. Vol. 10. No. 1. P. 5–8.
14. Griffel G. Vernier effect in asymmetrical ring resonator arrays // *IEEE Photonics Technology Lett.* 2000. Vol. 12. P. 1642–1644.



Ураксеев М. А.
Urakseev M. A.

*доктор технических наук, профессор
кафедры «Информационно-измерительная
техника», ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный авиационный
технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Закурдаева Т. А.
Zakurdaeva T. A.

*аспирант кафедры «Информационно-
измерительная техника», филиал
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический
университет» в г. Кумертау,
г. Кумертау, Российская Федерация*

УДК 621.383.8 + 535.8

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И СТАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ПРИБОРА

Исследованиям и разработкам волоконно-оптических датчиков электрического напряжения и напряженности электрического поля посвящено достаточно большое количество работ. Это обусловлено необходимостью разработки новых, более современных методов измерения электрического напряжения и напряженности электрического поля. На сегодняшний день для измерения электрического напряжения и напряженности электрического поля используется множество измерительных преобразователей, основанных на различных принципах. В последние годы нашли широкое применение используемые измерительные оптические трансформаторы напряжения, основанные на линейном электрооптическом эффекте Погкельса. Они способны измерять напряжения в широком диапазоне от малых величин до (110–750) кВ .

Эффект Погкельса — явление возникновения двойного лучепреломления в оптических средах при наложении постоянного или переменного электрического поля. При подаче напряжения на электроды электрооптической ячейки, в межэлектродном пространстве которой находится электрооптический материал, в последнем электрическое поле создает анизотропию, порождающую двойное лучепреломление. Данное лучепреломление изменяет поляризацию электромагнитной волны (луча света, создаваемого лазером или лазерным диодом), а изменение поляризации используют для модуляции света.

Линейно поляризованный свет можно представить в виде двух составляющих по осям x и y , имеющих одинаковые фазы. Направленное движение световой волны — по оси z . Когда поле отсутствует, направление поляризации света после прохождения через кристалл сохраняется, и анализатор, расположенный перпендикулярно входному поляризатору, не дает свету выйти из прибора. Если к кристаллу приложить электрическое поле, изменяются коэффициенты преломления по осям x и y , что приведет к различию скорости света вдоль этих осей, а это, в свою очередь, — к различию фаз проходящего света по составляющим x и y . Разность фаз будет нарастать по мере прохождения через кристалл. На выходе из кристалла результатом суммирования колебаний по составляющим будет эллиптически поляризованный свет. При этом только часть энергии выйдет из прибора через анализатор — это энергия колебаний, имеющих плоскость поляризации, параллельную заданной анализатором.

Ключевые слова: линейный электрооптический эффект, ячейка Погкельса, датчики, электрическое напряжение и напряженность, электрооптика, двойное лучепреломление.

MATHEMATICAL MODEL, SENSITIVITY AND STATIC CHARACTERISTICS OF ELECTRO-OPTICAL DEVICE

Research and development of fiber-optic sensor of electric voltage and electric field devoted quite a lot of work. This is due to the need to develop new and more modern methods of measuring voltage and electric field strength. To date, for the measurement of voltage and electric field uses many transducers based on different principles. In recent years, widely used in optical measuring voltage transformers, based on the linear electro-optical Pockels effect. They are able to measure voltages in a wide range from low values to (110–750) kV.

Pockels effect — the phenomenon of occurrence of birefringence in optical media with the imposition of direct or alternating electric field. When voltage is applied to the electrodes of electro-optical cell in which the interelectrode space is electrooptic material in the latter field generates electric anisotropy generating birefringence. This refraction changes the polarization of electromagnetic waves (light beam generated by a laser or a laser diode). A change in polarization is used for light modulation.

Linearly polarized light can be represented by two components along the axes x and y have the same phase. Directional movement of light waves — along the z axis. When a field is absent, the polarization direction of the light after passing through the analyzer crystal and is retained, perpendicularly to the input polarizer, the light does not exit from the device. If the crystal an electric field, by changing the refractive indices x and y axes, resulting in a difference in the speed of light along these axes, and this, in turn, — a phase difference of transmitted light by components x and y . The difference in phase will increase as it passes through the crystal. The output of the crystal oscillation by the result of the summation of components will be elliptically polarized light. However, only part of the energy released from the device through analyzer — the energy vibrations, having a plane of polarization parallel to a given analyzer.

Key words: linear electro-optic effect, Pockels cell, sensors, electrical stress and tension, electro-optics, birefringence.

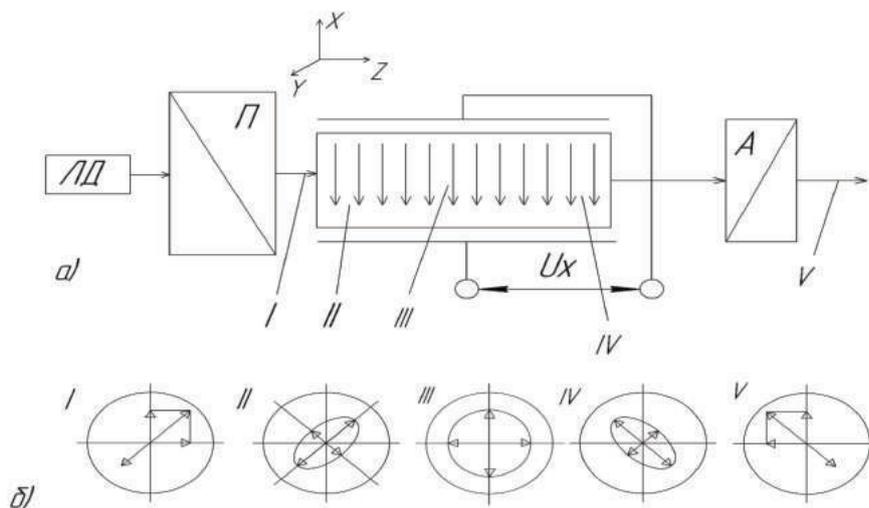
Введение

Исследованиям и разработкам волоконно-оптических датчиков электрического напряжения и напряженности электрического поля посвящено достаточно большое количество работ [1-3]. Это обусловлено необходимостью разработки новых, более современных методов измерения электрического напряжения и напряженности электрического поля. На сегодняшний день для измерения электрического напряжения и напряженности электрического поля используется множество измерительных преобразователей, основанных на различных принципах. В последние годы нашли широкое применение используемые измерительные оптические трансформаторы напряжения, основанные на линейном электрооптическом эффекте Поккельса. Они способны измерять напряжения в широком диапазоне от малых величин до (110–750) кВ [4, 5].

Эффект Поккельса — явление возникновения двойного лучепреломления в оптических средах при наложении постоянного или

переменного электрического поля. При подаче напряжения на электроды электрооптической ячейки (рисунок 1, а), в межэлектродном пространстве которой находится электрооптический материал, в последнем электрическое поле создает анизотропию, порождающую двойное лучепреломление. Данное лучепреломление изменяет поляризацию электромагнитной волны (луча света, создаваемого лазером или лазерным диодом), а изменение поляризации используют для модуляции света.

Линейно поляризованный свет можно представить в виде двух составляющих по осям x и y , имеющих одинаковые фазы (рисунок 1, а). Направленное движение световой волны — по оси z . Когда поле отсутствует, направление поляризации света после прохождения через кристалл сохраняется, и анализатор, расположенный перпендикулярно входному поляризатору, не дает свету выйти из прибора. Если к кристаллу приложить электрическое поле, изменяются коэффициенты преломления по осям x и y , что приве-



а) структурная схема прибора; б) эллипсоид рефракции по зонам: I — линейная поляризация света после поляризатора; II, III и IV — эллиптическая поляризация света в кристалле и после кристалла; V — линейная поляризация света после анализатора

Рисунок 1. Модуляция света на электрооптическом эффекте Поккельса

дет к различию скорости света вдоль этих осей, а это, в свою очередь, — к различию фаз проходящего света по составляющим x и y . Разность фаз будет нарастать по мере прохождения через кристалл. На выходе из кристалла результатом суммирования колебаний по составляющим будет эллиптически поляризованный свет. При этом только часть энергии выйдет из прибора через анализатор — это энергия колебаний, имеющих плоскость поляризации, параллельную заданной анализатором [6].

При изменении напряжения, приложенного к кристаллу, будет меняться форма эллипса поляризации света (рисунок 1, б).

Для анализа и синтеза электрооптического прибора и системы необходимо разработать их математическую модель, проанализировать основные характеристики, статическую характеристику и чувствительность; исследовать источники погрешностей и разработать основы проектирования.

2. Математическая модель электрооптического прибора

Рассмотрим подробнее процесс прохождения световой волны через электрооптический модулятор, в котором между двумя электродами находится электрооптическая среда в виде электрооптического кристалла, обладающего анизотропией — неодинаковостью свойств в разных направлениях при приложе-

нии электрического напряжения U к электродам. При этом между ними возникает электрическое поле, силовые линии которого условно показаны на рисунке 1, а в виде вертикальных стрелок.

Если поляризованный луч света с вектором J электрического поля падает на среду (рисунок 2), обладающую двойным лучепреломлением, таким образом, что направление луча света не совпадает с оптической осью вещества, то в среде будут распространяться с разной скоростью две волны, у которых плоскости колебаний электрического вектора параллельны осям соответствующего сечения оптической индикатрисы [7]. Одна из волн, распространяясь, обгоняет другую. Следовательно, на выходе из кристалла обе волны будут иметь некоторую разность фаз φ , которая вычисляется по формуле:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} l (n_1 - n_2), \quad (1)$$

где l — толщина кристалла;

n_1 и n_2 — показатели преломления обеих лучей;

$l(n_1 - n_2) = \Delta$ — разность хода, равная разности оптических путей двух волн в кристалле.

Таким образом, разность фаз между световыми волнами тем больше, чем больше разность между коэффициентами преломления n_1 и n_2 и чем больше толщина кристалла l .

Разность хода, приходящаяся на единицу пути в анизотропном веществе, равна разности двух показателей преломления:

$$B_{12} = \frac{\Delta}{l} = n_1 - n_2. \quad ; \quad (2)$$

Величина B_{12} называется двупреломлением кристалла в данном его положении по отношению к исходному световому лучу.

Вместо обозначений n_o и n_e (показатели преломления одноосных кристаллов) в литературе об электрооптическом эффекте часто используются другие — ω и ε , которые мы и будем использовать в дальнейшем.

Когда свет распространяется вдоль оси Z пластинки, изготовленной из кристалла XH_2PO_4 , и к пластинке приложено электрическое поле E_z , то плоскости колебаний электрического вектора будут параллельны осям X' и Y' оптической индикатрисы.

Амплитуды колебаний $J_{x'}$ и $J_{y'}$ представляют собой проекции вектора J на направления осей X' и Y' . Разность фаз φ колебаний формулы (1) может быть преобразована с учетом выражений (1) и (2):

$$\varphi = B_{z'} \frac{\pi l}{\lambda} = \frac{\pi}{\lambda} \omega^3 r_{63} E_z l = \frac{\pi}{\lambda} \omega^3 r_{63} U, \quad (3)$$

где $B_{z'} = n_{x'} - n_{y'} = \omega^3 r_{63} E_z = 2\Delta n$;

Δn — искусственное двойное лучепреломление;

r_{63} — коэффициент преломления, служит для описания эффекта при поле, параллельном оптической оси.

При сложении двух колебаний, имеющих одинаковые амплитуды и разность хода $\frac{\lambda}{4}$, получаем круговое колебание. Свет, выходящий из кристаллической пластины, которая находится в электрическом поле, будет поляризованным по эллипсу. После кристаллической пластины устанавливаем второй поляризатор — анализатор. Тогда в зависимости от величины эллиптической поляризации через анализатор будет проходить различное количество света, так как кристалл пропустит лишь колебания, являющиеся проекциями на его сечение (направление ZA на рисунке 2) [6, 7].

На рисунке 2 приняты обозначения: β — угол между плоскостями поляризатора и анализатора; $Z\Pi$ — плоскость поляризации поляризатора; ZA — плоскость поляризации анализатора. Обозначим F_n — световой поток, выходящий из поляризатора; F_a — световой поток, выходящий из анализатора. Световой поток на выходе анализатора определяется зависимостью:

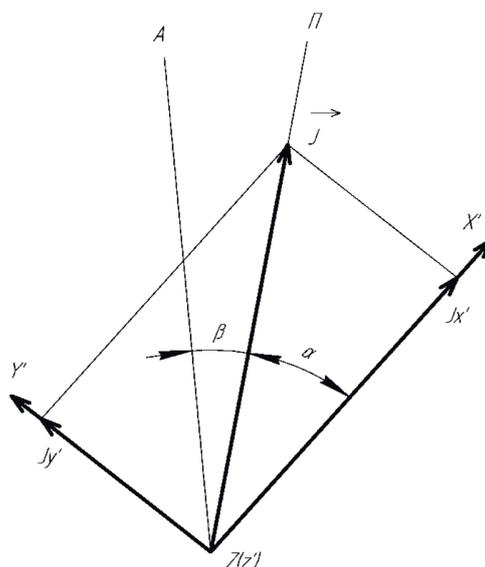


Рисунок 2. Взаимное расположение плоскостей колебаний в элементах модулятора

$$F_a = F_n [\cos^2 \beta - \sin 2\alpha \sin 2(\alpha + \beta) \sin^2 \frac{\varphi}{2}]. \quad (4)$$

Здесь α угол между плоскостью колебаний электрического вектора J в падающем плоскополяризованном луче света и осью X' (или осью Y') оптической индикатрисы.

Световой поток на выходе анализатора зависит от разности фаз φ . Данное устройство может быть положено в основу создания модуляции света при управляемом двойном лучепреломлении. Максимальное изменение интенсивности света на выходе устройства при изменении разности фаз φ от 0 до π будет происходить в двух случаях:

$$\begin{aligned} \beta = \frac{\pi}{2}; \alpha = \frac{\pi}{4}; \\ \beta = 0; \alpha = \frac{\pi}{4}. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом (5) формула (3) принимает вид:

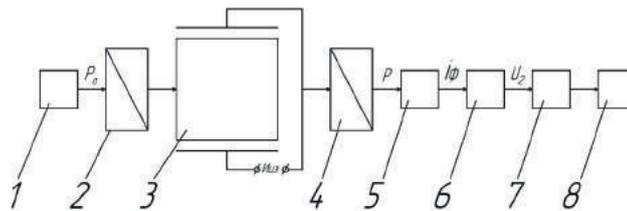
$$F_a = F_n \sin^2 \frac{\varphi}{2}; \quad (6)$$

$$F_a = F_n (1 - \sin^2 \frac{\varphi}{2}). \quad (7)$$

При $\beta = \frac{\pi}{2}$ — это случай скрещенных поляризаторов $\frac{\pi}{2}$ более выгоден, так как он обеспечивает полную глубину модуляции.

Если электрическое поле присутствует, то из-за возникшей анизотропии кристалла в направлении поля показатель преломления волны, поляризованный параллельно полю, изменяется на величину Δ , определяемую по формуле (1).

Суперпозиция когерентных взаимно перпендикулярных поляризованных волн, имеющих разность хода, приводит к образованию



1 — лазерный диод; 2 — поляризатор; 3 — электрооптическая ячейка Поккельса; 4 — анализатор; 5 — фотодиод; 6 — преобразователь «ток — напряжение» на базе операционного усилителя; 7 — АЦП (аналогово-цифровой преобразователь); 8 — ЖКИ (жидкокристаллический индикатор)

Рисунок 3. Структурная схема датчика на основе эффекта Поккельса

эллиптически поляризованной волны с различным значением эллиптичности (рисунок 1, б).

При приложении к кристаллу электрического поля линейно поляризованный свет, падающий на него, станет эллиптически поляризованным и будет проходить через поляризатор, при этом амплитуда электрического поля задается формулой:

$$E = E_0 \sin^2 \frac{\varphi}{2}. \quad (8)$$

Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды, поэтому

$$J = J_0 \sin^2 \frac{\varphi}{2}, \quad (9)$$

где J — интенсивность прошедшего через поляризатор света; J_0 — интенсивность падающего на кристалл света. Подставляя в формулу (9) выражение (3), получаем:

$$J = J_0 \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} \omega^3 r_{63} U \right). \quad (10)$$

Считая внешнее электрическое поле однородным, имеем

$$E_{\text{вн.}} = \frac{U_{\text{вн.}}}{d}, \quad (11)$$

где d — расстояние между электродами; $U_{\text{вн.}}$ — напряжение, прикладываемое к электродам. Учитывая (11), окончательно получаем:

$$J = J_0 \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} \omega^3 r_{63} E_z U_{\text{вн.}} \right). \quad (12)$$

3. Основные характеристики электрооптических приборов и систем

Рассмотрим основные характеристики (статическую характеристику и чувствительность) для датчика на эффекте Поккельса (рисунок 3) [8, 9].

На рисунке 3 приведена структурная схема датчика на эффекте Поккельса. Неполаризованный свет лазера передается на поляризатор с помощью оптического волокна. Через поляризатор световая волна с линейной поляризацией попадает в электрооптическую ячейку Поккельса, где под воздействием

электрического поля имеет место анизотропия кристалла и происходит поляризация света, как пояснено в тексте к рисунку 1, а и б. Математическая модель имеет вид формулы (12). Здесь J — интенсивность света, попадающего на фотодиод. Выходной ток фотодиода имеет вид:

$$i_{\phi} = J S_{\text{сп.}}, \quad (13)$$

где $S_{\text{сп.}}$ — спектральная чувствительность фотодиода.

3.1. Статическая характеристика

Под статической характеристикой будем понимать аналитическую зависимость выходного напряжения U_2 преобразователя 6 «ток — напряжение» на базе операционного усилителя: $U_2 = f U_{\text{из}}$, от измеряемого напряжения $U_{\text{из}}$ (рисунок 3), приложенного к электродам электрооптической ячейки Поккельса [10].

Фототок поступает на выход преобразователя 6 «ток — напряжение», выполненного на базе операционного усилителя, выходное напряжение которого имеет вид:

$$U_2 = K_{\text{ус}} U_1, \quad (14)$$

где $U_1 = i_{\phi} R$ — напряжение входного тока на выходе усилителя; R — сопротивление порядка 100 Ом; $K_{\text{ус}}$ — коэффициент усилителя.

3.2. Чувствительность

Чувствительность — это степень изменения выходной величины измерительного прибора изменению входной величины:

$$S = \frac{d U_{\text{изм.}}}{d U_{\pi}}, \quad (15)$$

где $d U_{\text{изм.}}$ — приложенное электрическое напряжение; $d U_{\pi}$ — полуволновое электрическое напряжение.

С учетом выражений (12) и (13) формула (14) примет вид:

$$U_2 = J S_{\text{спектр.}} R K_{\text{ус.}} = S_{\text{спектр.}} R K_{\text{ус.}} J_0 \left(1 + \sin \pi \frac{d U_{\text{изм.}}}{d U_{\pi}} \right). \quad (16)$$

Вывод

Таким образом, используя понятие «разность фаз», можно найти выражения для определения состояния поляризации и интен-

сивности света на выходе любого оптического датчика. Анализ полученных выражений позволяет оценить их влияние на статические характеристики датчиков.

Список литературы

1. Окоси Т. и др. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Гонда С., Сэко Д. Оптоэлектроника в вопросах и ответах: Пер. с яп. Л.: Техническая книга, 1980. 287 с.
3. Вострокнутов Н.Г. Основы информационно-измерительной техники. М., 1972. 237 с.
4. Байбородин Ю.И., Гаража С.А. Электрооптический эффект в кристаллах и его применение в приборостроении. М.: Машиностроение, 1967. 79 с.
5. Савельев И.В. Курс общей физики. М.: Наука, 1982. Т. 2. 496 с.
6. Патент 71441 Российская Федерация, МПК G 01 R 13/40. Устройства для измерения напряженности электрического поля и напряжения / М.А. Ураксеев, О.А. Михина, Д.Г. Хамета; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет». 2007138535/22; заявл. 16.10.2007; опубл. 10.03.2008.
7. Патент 67723 Российская Федерация, МПК G 01 R 13/40. Волоконно-оптическое информационно-измерительное устройство / М.А. Ураксеев, О.А. Михина, Д.Г. Хамета; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет». 2007122139/22; заявл. 13.06.2007; опубл. 27.10.2007.
8. Патент 149868 Российская Федерация, МПК G 01 B 7/06. Информационно-измерительная система контроля толщины диэлектрических пленок и плоских изделий / М.А. Ураксеев, Н.А. Авдоница, Т.А. Закурдаева, А.Ф. Бардынов; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса». 2014136598/28; заявл. 009.09.2014; опубл. 20.01.2015.
9. Патент 161789 Российская Федерация, МПК G 01 F 23/26. Электрооптическая информационно-измерительная система кон-

троля уровня жидкости / М.А. Ураксеев, Н.А. Авдоница, Т.А. Закурдаева, Д.А. Савченко; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса». 2015122562/28; заявл. 2015122562/28; опубл. 10.05.2016.

10. Патент 166014 Российская Федерация, МПК G 01 F 23/26. Волоконно-оптические информационно-измерительные устройства расхода электропроводящих жидкостей / М.А. Ураксеев, Н.А. Авдоница, Т.А. Закурдаева, А.Т. Бактыгереев; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». 2016117618/28; заявл. 2016117618/28; опубл. 10.11.2016.

References

1. Okosi T. i dr. Volokonno-opticheskie datchiki. L.: Energoatomizdat, 1990.
2. Gonda S., Seko D. Optoelektronika v voprosakh i otvetakh: Per. s yap. L.: Tekhnicheskaya kniga, 1980. 287 s.
3. Vostroknutov N.G. Osnovy informatsionno-izmeritel'noi tekhniki. M., 1972. 237 s.
4. Baiborodin Yu.I., Garazha S.A. Elektroopticheskiy effekt v kristallakh i ego primeneniye v priborostroenii. M.: Mashinostroeniye, 1967. 79 s.
5. Savel'ev I.V. Kurs obshchei fiziki. M.: Nauka, 1982. T. 2. 496 s.
6. Patent 71441 Rossiiskaya Federatsiya, MPK G 01 R 13/40. Ustroistva dlya izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya i napryazheniya / M.A. Urakseev, O.A. Mikhina, D.G. Khameta; Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdeniye vysshego professional'nogo obrazovaniya «Ufimskii gosudarstvennyi aviatsionnyi tekhnicheskii universitet». 2007138535/22; zayavl. 16.10.2007; opubl. 10.03.2008.
7. Patent 67723 Rossiiskaya Federatsiya, MPK G 01 R 13/40. Volokonno-opticheskoye informatsionno-izmeritel'noye ustroystvo / M.A. Urakseev, O.A. Mikhina, D.G. Khameta;

Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Ufimskii gosudarstvennyi aviatsionnyi tekhnicheskii universitet». 2007122139/22; zayavl. 13.06.2007; opubl. 27.10.2007.

8. Patent 149868 Rossiiskaya Federatsiya, MPK G 01 V 7/06. Informatsionno-izmeritel'naya sistema kontrolya tolshcheny dielektricheskikh plenok i ploskikh izdelii / M.A. Urakseev, N.A. Avdonina, T.A. Zakurdaeva, A.F. Bardynov; Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Ufimskii gosudarstvennyi universitet ekonomiki i servisa». 2014136598/28; zayavl. 009.09.2014; opubl. 20.01.2015.

9. Patent 161789 Rossiiskaya Federatsiya, MPK G 01 F 23/26. Elektroopticheskaya informatsionno-izmeritel'naya sistema kontrolya

urovnya zhidkosti / M.A. Urakseev, N.A. Avdonina, T.A. Zakurdaeva, D.A. Savchenko; Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Ufimskii gosudarstvennyi universitet ekonomiki i servisa». 2015122562/28; zayavl. 2015122562/28; opubl. 10.05.2016.

10. Patent 166014 Rossiiskaya Federatsiya, MPK G 01 F 23/26. Volokonno-opticheskie informatsionno-izmeritel'noe ustroistva raskhoda elektroprovodyashchikh zhidkosti / M.A. Urakseev, N.A. Avdonina, T.A. Zakurdaeva, A.T. Baktygereev; Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Ufimskii gosudarstvennyi neftyanoi tekhnicheskii universitet». 2016117618/28; zayavl. 2016117618/28; opubl. 10.11.2016.



Муратшин А. М.
Muratshin A. M.

директор Федерального бюджетного учреждения «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Республике Башкортостан», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой стандартизации и метрологии, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



Волков С. Ю.
Volkov S. Yu.

генеральный директор Автономной некоммерческой организации «Центр сертификации продукции и систем менеджмента в сфере наноиндустрии», г. Москва, Российская Федерация



Холодова Е. М.
Kholodova E. M.

руководитель Центра оценки квалификаций Автономной некоммерческой организации «Центр сертификации продукции и систем менеджмента в сфере наноиндустрии», г. Москва, Российская Федерация

УДК 331.543

РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К СПЕЦИАЛИСТАМ ПО МЕТРОЛОГИИ В НАНОИНДУСТРИИ

Развитие наноиндустрии и появление новых видов продукции, произведенной с применением нанотехнологий, требует формирования квалифицированного рынка труда, способного адаптироваться к постоянным изменениям в высокотехнологичных секторах экономики. В настоящее время возрастает потребность в высококвалифицированных специалистах по метрологии в сфере наноиндустрии, являющейся одним из важнейших обеспечивающих направлений в развитии нанотехнологий. В статье рассмотрены требования к специалистам по метрологии в сфере наноиндустрии, сформулированные в рамках разработки проекта профессионального стандарта «Специалист по метрологии в наноиндустрии».

Ключевые слова: нанотехнологии, наноиндустрия, инновационная продукция, метрология, средства измерений, методика измерений, поверка средств измерений, калибровка средств измерений, метрологическая экспертиза, профессиональный стандарт, трудовые функции.

DEVELOPMENT OF REQUIREMENTS FOR SPECIALISTS ON METROLOGY IN NANOINDUSTRY

Development of nanoindustry and the emergence of new types of products produced with the use of nanotechnologies require the formation of skilled labor market able to adapt to the constant changes in high-tech sectors of the economy. Currently, there is an increasing need in highly qualified specialists in metrology in the field of nanotechnology, which is one of the most important providing direction in the nanotechnology development. The article deals with the requirements for specialists in metrology in the field of nanotechnologies, designed within the development of the professional standard draft «Specialist in the field of metrology in nanotechnology».

Key words: nanotechnology, nanoindustry, innovative products, metrology, measuring instruments, measurement procedure, verification of a measuring instrument, calibration of a measuring instrument, metrological expertise, professional standards, labor functions.

Продукция nanoиндустрии относится к сфере инноваций, в ней находят применение последние достижения науки и техники, данная продукция обладает набором принципиально новых свойств и характеристик [1, 2]. Развитие nanoиндустрии и появление новых видов продукции, произведенной с применением нанотехнологий, требует формирования квалифицированного рынка труда, способного адаптироваться к постоянным изменениям в высокотехнологичных секторах экономики [3].

В настоящее время в России происходит формирование и становление национальной системы профессиональных квалификаций. Необходимость создания такой системы обусловлена потребностями экономики в квалифицированных кадрах, отвечающих современным требованиям [4, 5]. С начала 2017 г. вступил в силу Федеральный закон № 238-ФЗ «О независимой оценке квалификаций», устанавливающий правовые и организационные основы и порядок проведения независимой оценки квалификации работников, претендующих на осуществление определенного вида трудовой деятельности. Созданы советы по профессиональным квалификациям в основных отраслях экономики. В рамках формирования национальной системы профессиональных квалификаций проводится разработка профессиональных стандартов, устанавливающих требования к профессиональной деятельности специалистов.

Для содействия формированию рынка квалифицированных кадров в сфере nanoиндустрии создан Совет по профессиональным квалификациям в nanoиндустрии. Для реализации данного направления принята Программа «Развитие системы оценки профессиональных квалификаций в nanoиндустрии на период 2016-2018 годы», предусматривающая комплекс работ по созданию центров оценки квалификаций, разработке процедур оценки квалификаций, вовлечению специалистов предприятий nanoиндустрии в систему оценки квалификаций.

Метрология является одним из важнейших обеспечивающих направлений для развития нанотехнологий [6, 7]. Измерения являются основным источником информации

о фактических значениях параметров и характеристиках продукции и составляют неотъемлемую часть деятельности по обеспечению безопасности, качества, надежности и конкурентоспособности продукции на всех стадиях её жизненного цикла. С развитием нанотехнологий потребность в высококвалифицированных специалистах по метрологии в сфере nanoиндустрии возрастает. В данной ситуации опыт и профессиональная подготовка специалистов-метрологов играют существенную роль для формирования кадрового потенциала nanoиндустрии.

Метрологическое обеспечение современной нанотехнологической продукции характеризуется большим разнообразием видов измерений, применяемых методов и средств измерений [8, 9]. Измерения в nanoиндустрии ставят ряд новых специфических задач, обусловленных малыми размерами элементов и структур, с которыми имеют дело нанотехнологии. При этом важно обеспечить необходимую точность, сопоставимость и доверие к результатам измерений. Особенности требований к специалистам по метрологии в nanoиндустрии являются наличие знаний, умений и навыков в общих аспектах метрологии, а также знания нормативных документов в сфере nanoиндустрии и смежных областях, знания свойств, параметров и характеристик продукции nanoиндустрии, знания возможностей современных методов и технических средств, применяемых в сфере nanoиндустрии.

В настоящей статье рассмотрены требования к специалистам по метрологии в сфере nanoиндустрии, сформулированные в рамках разработки проекта профессионального стандарта «Специалист по метрологии в nanoиндустрии».

Разработка профессионального стандарта «Специалист по метрологии в nanoиндустрии» проводилась в соответствии с Методическими рекомендациями по разработке профессиональных стандартов, утвержденными Приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 29 апреля 2013 г. № 170н и № 665н от 29 сентября 2014 г.

В проекте профессионального стандарта определены различные категории требований к специалистам по метрологии в nanoиндустрии, включающие:

— требования к уровню квалификации специалистов-метрологов, работающих на различных должностях;

— требования к условиям осуществления их трудовой деятельности;

— требования к профессиональному образованию и обучению, необходимому для соответствия определенной квалификации;

— требования к содержанию и качеству труда специалистов-метрологов, соответствующих определенным квалификациям.

В проекте стандарта определены пять обобщенных трудовых функций, которые описывают деятельность специалистов-метрологов различных категорий в nanoиндустрии. Каждая из обобщенных трудовых функций разделена на конкретные трудовые функции, устанавливающие функциональные обязанности, знания и умения специалистов по метрологии в nanoиндустрии.

Обобщенными трудовыми функциями являются:

- метрологическое обеспечение средств измерений для контроля характеристик инновационной продукции nanoиндустрии;
- нормативное обеспечение работ по метрологическому обеспечению инновационной продукции nanoиндустрии;
- метрологическое обеспечение разработки, производства и испытаний инновационной продукции nanoиндустрии;
- проектирование и разработка средств измерений, стандартных образцов, эталонного и измерительного оборудования для производства инновационной продукции nanoиндустрии;
- организация работ по метрологическому обеспечению инновационной продукции nanoиндустрии на предприятии.

Обобщенная трудовая функция «Метрологическое обеспечение средств измерений для контроля характеристик инновационной продукции nanoиндустрии» устанавливает требования к специалистам, выполняющим работы по поверке и калибровке средств измерений, аттестации оборудования, текущему ремонту и техническому обслужива-

нию средств измерений. В их обязанности входят: подготовка графиков поверки (калибровки) средств измерений; подготовка средств измерений к проведению поверки (калибровки); выполнение операций поверки (калибровки) в соответствии с действующими методиками поверки (калибровки); оформление результатов поверки (калибровки) средств измерений; проведение технического обслуживания средств измерений.

Специалисты данной категории в обобщенном виде должны знать: принципы работы и технические характеристики обслуживаемых средств измерений; методики поверки (калибровки) средств измерений, применяемых в области нанотехнологий; требования нормативных и методических документов, регламентирующих вопросы выбора методов и средств измерений; требования нормативных и методических документов, регламентирующих вопросы поверки (калибровки) и технического обслуживания средств измерений и измерительного оборудования.

Обобщенная трудовая функция «Нормативное обеспечение работ по метрологическому обеспечению инновационной продукции nanoиндустрии» устанавливает требования к специалистам, выполняющим работы по разработке нормативных и методических документов на предприятии по метрологическому обеспечению выпуска инновационной продукции nanoиндустрии. В их обязанности входит разработка методик измерений, методик поверки (калибровки) средств измерений, метрологическая экспертиза разрабатываемых документов различного типа для метрологического обеспечения инновационной продукции nanoиндустрии, разработка программ и методик аттестации оборудования, применяемого при производстве инновационной продукции в nanoиндустрии.

Специалисты данной категории в обобщенном виде должны знать: законодательство Российской Федерации по обеспечению единства измерений; нормативные и методические документы, регламентирующие вопросы разработки и аттестации методик измерений; физические принципы работы,

область применения и принципиальные ограничения методов и средств измерений параметров инновационной продукции наноиндустрии; параметры продукции и технологических процессов, подлежащие измерениям; нормативные и методические документы, регламентирующие вопросы метрологической экспертизы.

Обобщенная трудовая функция «Метрологическое обеспечение разработки, производства и испытаний инновационной продукции наноиндустрии» устанавливает требования к специалистам, отвечающим за обеспечение деятельности метрологических служб предприятий. В обязанности данной категории специалистов входит проведение технического обслуживания эталонов и подготовка их к проведению аттестации; оценка соответствия эталонов заданным метрологическим и техническим требованиям; оформление результатов аттестации эталонов; разработка комплекта документов для аккредитации в области обеспечения единства измерений; оформление паспортов средств измерений; систематизация данных по эксплуатации и поверке (калибровке) средств измерений; инвентаризация средств измерений, контроля и испытаний, рабочих эталонов, стандартных образцов и методик измерений, применяемых на предприятии; анализ и оценка необходимости и достаточности имеющихся на предприятии средств измерений для контроля характеристик выпускаемой продукции; анализ наличия методик поверок, калибровок, методик измерений; подготовка предложений по совершенствованию метрологического обеспечения выпускаемой продукции.

Специалисты данной категории в обобщенном виде должны знать: законодательство Российской Федерации по обеспечению единства измерений; нормативные и правовые акты, действующие в наноиндустрии и смежных областях; методики аттестации эталонов; нормативные и методические документы, регламентирующие вопросы учета средств измерений, эталонов, стандартных образцов и методик измерений, применяемых на предприятии; физические принципы работы, область применения и принципиаль-

ные ограничения методов и средств измерений; нормативные и методические документы, регламентирующие вопросы хранения и обслуживания эталонов; общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий; вопросы проведения аккредитации в области обеспечения единства измерений.

Обобщенная трудовая функция «Проектирование и разработка средств измерений, стандартных образцов, эталонного и измерительного оборудования для производства инновационной продукции наноиндустрии» определяет требования к специалистам, отвечающим за проектирование и разработку средств измерений, стандартных образцов, эталонного и измерительного оборудования для производства инновационной продукции наноиндустрии. В их обязанности входит разработка технических заданий на проектирование и разработку средств измерений для производства инновационной продукции наноиндустрии, определение параметров и метрологических характеристик разрабатываемых средств измерений, проведение разработки и испытаний средств измерений с целью утверждения типа.

Специалисты данной категории в обобщенном виде должны знать: законодательство Российской Федерации по обеспечению единства измерений; нормативные и правовые акты, действующие в наноиндустрии и смежных областях; достижения отечественной и зарубежной науки, техники и технологии в наноиндустрии; возможности современных методов и технических средств по измерению параметров и характеристик инновационной продукции наноиндустрии; физические принципы работы, области применения, технические характеристики, конструктивные особенности, назначение и принципы работы средств измерений; методы оценки и расчета метрологических характеристик средств измерений для контроля параметров инновационной продукции наноиндустрии; нормативные и методические документы, регламентирующие проведение испытаний средств измерений с целью утверждения типа.

Обобщенная трудовая функция «Организация работ по метрологическому обеспечению инновационной продукции наноиндустрии на предприятии» определяет требования к специалистам, отвечающим за планирование, управление и организацию работ по метрологическому обеспечению инновационной продукции наноиндустрии. К данной категории специалистов относятся главные метрологи, руководители отделов метрологии и метрологических служб на инновационных нанотехнологических предприятиях. В их обязанности входят организация и проведение работ по обеспечению единства и требуемой точности измерений на инновационных нанотехнологических предприятиях.

Специалисты данной категории в обобщенном виде должны знать: законодательство Российской Федерации по обеспечению единства измерений; нормативные и правовые акты, действующие в наноиндустрии и смежных областях; нормативные и методические

документы, регламентирующие работы по метрологическому обеспечению на предприятии; требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий; квалификационные требования к специалистам, выполняющим работы по метрологическому обеспечению на предприятии, достижения отечественной и зарубежной науки, техники и технологии в наноиндустрии; возможности современных методов и технических средств по измерению параметров и характеристик инновационной продукции наноиндустрии.

Вывод

В настоящее время проводится публичное обсуждение проекта профессионального стандарта «Специалист по метрологии в наноиндустрии», в котором могут принять участие все заинтересованные стороны. С текстом проекта профессионального стандарта можно ознакомиться на сайте АНО «Наносертифика» (<http://nanocertifica.ru>).

Список литературы

1. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию: Пер. с яп. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 134 с.
2. Быков В.А. Нанотехнологический потенциал России // Наука в России. 2003. № 6. С. 8–12.
3. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 декабря 2001 г. № 197-ФЗ (ред. от 03.07.2016).
4. Федеральный закон Российской Федерации «Об образовании в Российской Федерации» от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ.
5. Федеральный закон «О независимой оценке квалификаций» от 3 июля 2016 г. № 238-ФЗ.
6. Окрепилов В.В. Стандартизация и метрология в нанотехнологиях. СПб: Наука, 2008. 260 с.
7. Белобрагин В.Я., Зажигалкин А.В., Зворыкина Т.И. Основы стандартизации. М.: РИА «Стандарты и качество», 2015. 464 с.
8. Тодуа П.А. Метрология в нанотехнологии // Российские нанотехнологии. 2007. Т. 2, № 1–2. С. 61–69.

References

1. Kobayasi N. Vvedenie v nanotekhnologiyu: Per. s yap. M.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2005. 134 s.
2. Bykov V.A. Nanotekhnologicheskii potentsial Rossii // Nauka v Rossii. 2003. № 6. S. 8-12.
3. Trudovoi kodeks Rossiiskoi Federatsii ot 30 dekabrya 2001 g. № 197-FZ (red. ot 03.07.2016).
4. Federal'nyi zakon Rossiiskoi Federatsii «Ob obrazovanii v Rossiiskoi Federatsii» ot 29 dekabrya 2012 g. № 273-FZ.
5. Federal'nyi zakon «O nezavisimoi otsenke kvalifikatsii» ot 3 iyulya 2016 g. № 238-FZ.
6. Okrepilov V.V. Standartizatsiya i metrologiya v nanotekhnologiyakh. SPb: Nauka, 2008. 260 s.
7. Belobragin V.Ya., Zazhigalkin A.V., Zvorykina T.I. Osnovy standartizatsii. M.: RIA «Standarty i kachestvo», 2015. 464 s.
8. Todua P.A. Metrologiya v nanotekhnologii // Rossiiskie nanotekhnologii. 2007. T. 2, № 1–2. S. 61–69.



Денисова О. А.
Denisova O. A.

*доктор физико-математических наук,
доцент, профессор кафедры «Физика»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Абрамишвили Р. Л.
Abramishvili R. L.

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

УДК 621.38:669

ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ ЯЧЕЙКА ДЛЯ ИНДИКАЦИИ КОНТРОЛЯ И ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКИХ СРЕД

В статье описывается обновленная система измерения и контроля уровня жидких сред. Модернизирован хорошо известный емкостной метод определения уровня жидкостей. В новой схеме предлагается использование электрооптической ячейки с нематическим жидким кристаллом. Гомеотропно ориентированный жидкий кристалл помещается между двух пластин, одна из которых стеклянная, а другая — кристалл — фотопроводник сульфид кадмия CdS. ЖК-ячейка служит в качестве индикатора, светопропускание которого зависит от приложенного напряжения. Конструкция ячейки такова, что зависимость фазовой задержки от напряжения имеет линейный характер. В статье описывается математическая модель, демонстрирующая линейную зависимость, подтвержденную экспериментально. Применение линейного электрооптического эффекта, наблюдаемого в жидких кристаллах, позволяет повысить точность и скорость измерения уровня жидких сред, т.к. жидкий кристалл является анизотропной средой, более чувствительной по сравнению с твердыми кристаллами. Время релаксации ориентационных эффектов в жидких кристаллах порядка 10^{-6} с. С точки зрения практического значения, данный метод будет интересен для использования в топливно-энергетическом комплексе, в частности для нефтегазовой отрасли для коммерческого учета нефтепродуктов.

Ключевые слова: ЖК-ячейка, линейный электрооптический эффект, ЖК-датчик, емкостной метод, эффект Погкельса.

LIQUID CRYSTAL CELLS TO INDICATE THE MONITORING AND MEASURING THE LEVEL OF LIQUID MEDIA

This article describes an updated system for measuring and controlling the level of liquid media. Modernised well-known method for determining the capacitive liquid level. The new scheme proposes the use of electro-optical cell with a nematic liquid crystal. Homeotropically oriented liquid crystal placed between two plates, one of which is glass, and the other — crystal — cadmium sulfide CdS photoconductor. LCD — a cell serves as an indicator light transmittance, which depends on the applied voltage. Cell is designed so that the dependence of the phase delay of the voltage is linear. The paper describes a mathematical model showing linear dependence, confirmed experimentally. Use of linear electrooptic effect in liquid crystals is observed, to improve the accuracy and speed of measurement of liquids, as the liquid crystal is an anisotropic medium more sensitive than solid crystals. The relaxation time of orientation effects in liquid crystals of the order of 10^{-6} . In terms of practical implications, this method will be of interest for use in the energy sector, in particular for the oil and gas industry for commercial accounting of petroleum products.

Key words: LCD-cell, linear electro-optic effect, LCD-sensor, a capacitive method, Pockels effect.

Введение

В настоящее время все более высокие требования предъявляются к точности измерений. Это связано с тем, что во многих отраслях народного хозяйства актуален вопрос измерения уровня жидкости, в особенности остро он стоит в нефтегазовой отрасли при коммерческом учете продуктов нефтепереработки.

На данный момент существует многообразие приборов и систем измерения уровня жидкости, которые основаны на различных физических явлениях [1]. Все более высокие требования предъявляются к надежности и быстродействию данных систем, что требует новых научно-технических решений. В ряде работ [2-4] авторами изучались экспериментально и теоретически различные эффекты, наблюдаемые в жидких кристаллах, которые могут лечь в основу разработок датчиков, применяемых для различных целей. Жидкие кристаллы (ЖК), как хорошо известно, — вещества очень чувствительные к внешним воздействиям, что позволит существенно повысить эффективность измерительных систем.

Описание метода

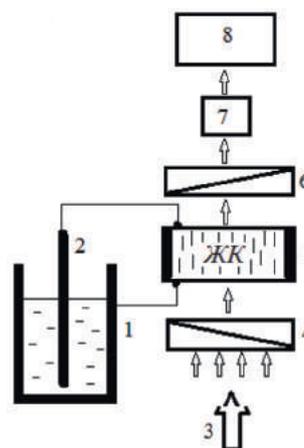
В статье предлагается высокоэффективный метод измерения уровня жидких сред, основанный на линейном электрооптическом эффекте в нематических жидких кристаллах (НЖК) [2-4]. Электрооптическим эффектом называют изменение показателя преломления вещества под действием электрического поля. Они бывают линейные и квадратичные. В твердых кристаллах (например стекле) различают эффект Погеля — линейный электрооптический эффект. Он наблюдается, когда изменение показателя преломления вещества прямо пропорционально первой степени напряженности приложенного внешнего электрического поля $Dn \sim E$. Эффект Керра, или квадратичный электрооптический эффект, имеет место, когда изменение показателя преломления прямо пропорционально квадрату напряженности воздействующего электрического поля $Dn \sim E^2$.

В работе [5] исследовано электрическое двулучепреломление (эффект Керра) в расплаве гребнеобразного полимера с акриловой

основной цепью и мезогенными цианобифенильными боковыми группами при температуре выше фазового перехода смектик — изотропная фаза. Было обнаружено, что постоянная Керра изменяется скачкообразно в зависимости от температуры, что обусловлено изменением ближнего ориентационного порядка.

Использование в предлагаемой системе ЖК-ячейки дало увеличение быстродействия и точности измерений, а также повысило ее функциональные возможности, что стало возможным благодаря сильно выраженному ориентационному эффекту в жидких кристаллах, время релаксации которого 10^{-6} с [2-4].

В данной структурной схеме (рисунок 1) используется коаксиальный конденсатор, электроды которого соединены с ЖК-ячейкой. Он выполнен в виде полого цилиндрического электрода 1 и центрального электрода — стержня 2, соединен с электродами электрооптической ЖК-ячейки. Ячейка освещалась лазером 3, луч которого сначала проходил через поляризатор 4. Далее свет, прошедший через ячейку 5 и анализатор с фотоприемником 6, обрабатывается микроконтроллером 7, в составе которого присутствуют усилитель, аналого-цифровой преобразователь, а также микропроцессор. Данные с микроконтроллера поступают на автоматизированное рабочее



1 — полый цилиндрический электрод; 2 — центральный электрод — стержень; 3 — лазер; 4 — поляризатор; 5 — ЖК-ячейка; 6 — анализатор с фотоприемником; 7 — микроконтроллер, в составе которого имеются усилитель, аналого-цифровой преобразователь и микропроцессор; 8 — экран монитора

Рисунок 1. Структурная схема измерительной системы, основанной на линейном электрооптическом эффекте в НЖК

место оператора, где отображаются на экране монитора δ в любом удобном виде.

Принцип работы электрооптической системы на нематических жидких кристаллах состоит в следующем: изменение уровня диэлектрической жидкости, находящейся между электродами 1 и 2 коаксиального измерительного конденсатора, вызывает изменение емкости данного конденсатора пропорционально изменению уровня жидкости. Это, в свою очередь, ведет к изменению реактивного сопротивления конденсатора и приводит к изменению падения на нем электрического напряжения.

ЖК-ячейка (рисунок 2) представляет собой систему из токопроводящего стекла, кристалла — фотопроводника CdS . На платины крепятся электроды из двуокиси олова SnO_2 . Применение CdS обусловлено тем, что он является фотопроводником, и его проводимость можно изменять с помощью света различной интенсивности. Между платинами помещалась смесь нематического жидкого кристалла n - n -бутил- n -гептаноила-оксibenзол + МББА.

Молекулы жидкого кристалла имели гомеотропную ориентацию. Такая ориентация получалась в результате ионной бомбардировки аргоном поверхностей SnO_2 и CdS . Фазовая задержка света, проходящего через ЖК-ячейку, линейно зависит от напряжения, приложенного к пластинам ячейки [2-4].

Математическая модель.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Рассмотрим математическую модель линейного электрооптического эффекта, наблюдаемого в нематических жидких кристаллах. Поскольку у нематика диэлектрическая проницаемость $\epsilon_a \approx 0$, то его можно считать полубесконечным при условии, что при

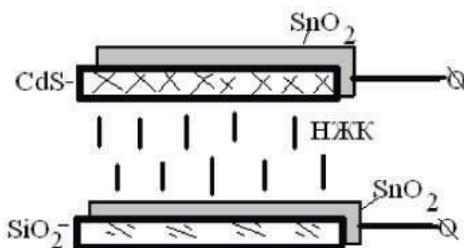


Рисунок 2. Экспериментальная электрооптическая ЖК-ячейка

толщине жидкого кристалла $z \rightarrow \infty$ угол наклона молекул ЖК $\theta \rightarrow 0$.

С учетом параметра дальнего порядка

$$S_1^*(z) = S_{10} \frac{Sh(-\lambda z)}{Sh(\lambda h/2)} + S_{1\infty},$$

где S_{10} — параметр порядка вблизи поверхности при отсутствии поля; h — толщина жидкого кристалла; $\lambda = \left(\frac{C_3}{\alpha T - C_1} \right)^{-1/2}$, т.е. распределение дипольного момента p уменьшается от электрода в глубь жидкого кристалла, как $|p| = p_0 S_1 = p_0 S_{10} e^{bz}$; $b = -1/d$, d^{-1} — эффективная глубина существования поверхностной поляризации; $C_1 = \frac{a}{2}$ и $C_3 = -le^{-kb} - \frac{a}{2}(1 + e^{-2kb})$ — константы, где $a = \frac{p_0 S_{10} E}{k}$, k — коэффициент упругости, E — напряженность электрического поля.

Уравнение состояния нематического жидкого кристалла будет иметь вид:

$$k\theta_{xx} + Ep_0 S_{10} e^{-\lambda z} \theta = 0.$$

Введем обозначения $y = \eta(\xi)$, $\xi = e^{-\lambda z}$, получим уравнение:

$$\lambda^2 \xi \frac{d^2 \eta}{d\xi^2} - \lambda \frac{d\eta}{d\xi} + a\eta = 0,$$

его решение

$$\eta[\theta] = \eta_0 [\theta_0] (d'-1)(d'-3)...(d'-2n+1) e^{\pm \lambda z},$$

$$d' = z \frac{d}{dz}, \quad v = 1/c = -\lambda/a,$$

далее при $a \ll 1$ получаем для изменения показателя преломления

$$\Delta n \sim \frac{p_0 S_{10} E}{k} = \frac{p_0 S_{10} U}{kh}, \quad (1)$$

т.е. изменение показателя преломления ЖК зависит от приложенного напряжения электрического поля прямо пропорционально, что соответствует рисунку 3, б).

На рисунке 3 представлены кривые для фазовой задержки и интенсивности прошедшего через ЖК-ячейку света (длина волны 550 нм) в зависимости от напряжения. Они с большой точностью (< 10 %) (рисунок 3, б) описывают линейное изменение двойного лучепреломления ячейки (1).

Значение угла наклона молекул ЖК q_0 определяется из условия слабого сцепления на поверхности выражением $\vec{n} \times \vec{g}$ [2-4]. Согласно предложенной математической модели, при наличии границ и анизотропного взаимодействия молекул ЖК с твердой подложкой в нематическом жидком кристалле образуется

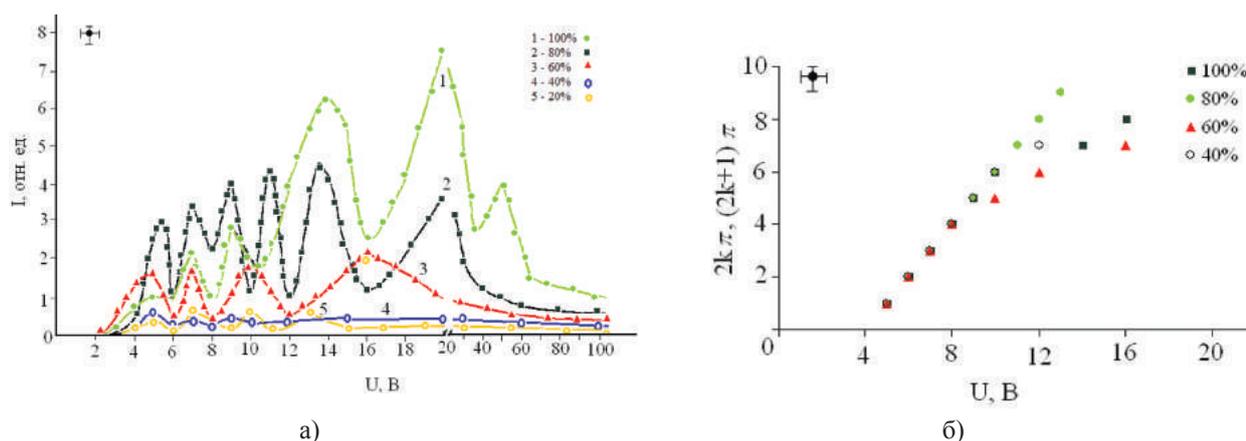


Рисунок 3. Зависимости оптического сигнала от напряжения для различных величин засветки подложки (а); фазовой задержки от напряжения, величины засветки подложки (в процентах) (б)

поляризованный слой — поверхностная поляризация с эффективной толщиной $d_{эф} \sim l^1$. При воздействии электрического поля в объеме НЖК индуцируется поляризация, прямо пропорциональная параметру порядка $P \sim S_p$, величина которой в полях $E \approx 5 \cdot 10^4$ В/см по расчетам достигает $P_p \approx 10^1 - 10^2$ ед. СГСЕ/см³, а значение дальнего дипольного порядка в этом случае равно от $2 \cdot 10^2$ до $5 \cdot 10^2$.

Заключение

Таким образом, в статье предложена модернизированная емкостная система контроля и измерения уровня жидких сред. В этой системе в качестве индикатора применяется ЖК-ячейка, использование которой позволяет повысить эффективность измерений, т.е. быстроедействие, чувствительность метода, а также его функциональные возможности. Данный метод может быть использован в топливно-энергетическом комплексе.

Список литературы

1. Раннев Г.Г. Методы и средства измерений. М.: Академия, 2008. 336 с.
2. Денисова О.А., Чувывров А.Н. Линейный продольный электро-оптический эффект в нематических жидких кристаллах // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2011. № 2. С. 59–61.
3. Денисова О.А., Чувывров А.Н. Структурные переходы в жидких кристаллах. Влияние осциллирующих потоков и электрических полей. Германия, Lap Lambert, 2012. 267 с.
4. Денисова О.А., Чувывров А.Н. Влияние электрофотовозбуждения поверхности на граничные условия и ориентацию молекул нематического жидкого кристалла // Башкирский химический журнал. 2011. Т. 18. № 3. С. 77–79.
5. Алексеев А.М., Бузин А.И. Методы СЗМ исследований полимеров // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 3. С. 75–79.

References

1. Rannev G.G. Metody i sredstva izmerenii. M.: Akademiya, 2008. 336 s.
2. Denisova O.A., Chuvyrov A.N. Lineinyi prodol'nyi elektro-opticheskiy effekt v nematicheskikh zhidkikh kristallakh // Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie. 2011. № 2. S. 59–61.
3. Denisova O.A., Chuvyrov A.N. Strukturnye perekhody v zhidkikh kristallakh. Vliyanie ostsiliruyushchikh potokov i elektricheskikh polei. Germaniya, Lap Lambert, 2012. 267 s.
4. Denisova O.A., Chuvyrov A.N. Vliyanie elektrofotovozbuzhdeniya poverkhnosti na granichnye usloviya i orientatsiyu molekul nematicheskogo zhidkogo kristalla // Bashkirskii khimicheskii zhurnal. 2011. T. 18. № 3. S. 77–79.
5. Alekseev A.M., Buzin A.I. Metody SZM issledovaniy polimerov // Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal. 1998. № 3. S. 75–79.



Доломатов М. Ю.
Dolomatov M. Yu.

кандидат технических наук, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры «Технология нефти и газа», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», профессор кафедры «Физическая электроника и нанофизика», ФГБОУ ВО «Бакирский государственный университет», г. Уфа, Российская Федерация



Журавлева Н. А.
Zhuravleva N. A.

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



Казиков М. А.
Kazakov M. A.

аспирант кафедры «Экономическая информатика», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

УДК 519.21

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ С ХАОСОМ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТОХАСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

В результате имитационного моделирования одномерной и двумерной функциями распределения вероятности сложных природных и техногенных систем с хаосом химического состава, к которым относятся сложные углеводородные смеси, например, нефтяные углеводородные системы, газоконденсаты, тяжелые нефти и продукты их переработки, установлено, что нормальное распределение состава наблюдается при вероятности различия компонентов в интервале от 0,2 до 0,8. Это означает, что законы нормального распределения состава по свободным энергиям, а также температурам кипения выполнимы в системах, в которых отношение числа компонентов, различающихся по свойствам, к общему числу компонентов составляет 20–80 %. Установлены границы вероятности различия, определяющие принадлежность систем к различным видам распределения. При доле отличающихся по свойствам компонентов 1–8,5 % распределение близко к распределению Пуассона. При вероятности различия химического состава в интервале от 0,085 до 0,2 наблюдается область неустойчивого распределения.

Ключевые слова: системы с хаосом химического состава, имитационное моделирование, одномерная функция распределения, двумерная функция распределения, нормальное распределение Гаусса, свободная энергия Гельмгольца.

SIMULATION OF SYSTEMS WITH CHAOS OF CHEMICAL COMPOSITION USING STOCHASTIC METHODS

As a simulation result of functions of a probability distribution in one-dimensional and two-dimensional systems with chaos in chemical composition, to which difficult natural and technogenic mixes, for example, oil hydrocarbonic systems belong, it is established that normal distribution of composition is observed at probability of components differences in the range from 0.2 to 0.8. This means that the normal distribution of free energy, and the boiling temperatures are achievable in systems where the ratio of number of components with different properties to the total number of components is 20–80 %. The borders of difference probability are established, which define the belonging of systems to different types of distribution. At a share of the differing on properties components of 1–8.5 % the distribution is close to Poisson's distribution. When the probability components differences in range from 0.085 to 0.2 it is observed the region of unstable distribution.

Key words: system with chaos of chemical composition, simulation, one-dimensional distribution function, two-dimensional distribution function normal (Gaussian) distribution law, Helmholtz free energy.

Введение

В химической технологии известны процессы, связанные с переработкой сложных многокомпонентных смесей. Примером таких систем являются системы нефтепереработки и нефтехимии. В работах [1–5] выделяется особый тип природных и техногенных систем с хаосом химического состава, состав которых подчиняется закону случайного распределения. Согласно работам [1–5], к таким системам относятся природные системы: нефть, природный газ, компоненты биогеоценозов, а также межзвездные молекулярные облака [6–9]. Среди техногенных систем к таким системам принадлежат продукты переработки нефти, топлива, ряд высокомолекулярных систем и т.д. Многокомпонентные системы с хаосом состава (МСХС) имеют особенные термодинамические и физико-химические свойства (ФХС), связанные с различием компонентов (дисперсии свойств). Знание этих различий позволяет судить о стабильности, химической устойчивости и совокупности физико-химических свойств системы, что чрезвычайно важно в инженерных и научных расчетах их свойств. Несмотря на попытки описания этих систем законом нормального распределения и использования этих законов на практике [10, 11] вопрос о характере распределения компонентного и фракционного состава по свойствам остается открытым.

Цель данной работы — моделирование компонентно-фракционного состава систем и построение обобщенных одномерных и двумерных функций распределения состава по термодинамическим свойствам с использованием генераторов случайных чисел. В качестве объектов исследований выбрана свободная энергия образования компонентов (свободная энергия Гельмгольца ΔG), которая определяет совокупность ФХС и стабильность системы.

Теоретический анализ

Для имитационного моделирования термодинамических свойств веществ необходимо знать закон, по которому они изменяются. Данный закон обычно задается при помощи соответствующих теоретических либо эмпирических функций распределения. При этом необходимо использовать генераторы псевдослучайных чисел для имитации случайности тех или иных событий.

Для определения закона распределения термодинамических свойств рассмотрим статистическую модель вещества как МСХС.

Пусть имеются различные по масштабу и структуре системы вещества. Предположим, что эти системы неоднородны также по физико-химическим условиям, число которых k . Кроме того, каждая из систем содержит Δn фракций, различаемых по свойствам Z , число которых λ . Разобьем неоднородную, макроскопическую систему вещества (хими-

ческого универсума) на однородные по комплексу физико-химических условий области. Выделим внутри этой области однородную среду. Пусть n — общее число компонентов вещества, каждый из которых характеризуется определенным значением, зависящим от числа компонентов качественным признаком (экстенсивным свойством); \bar{Z}_i — среднее свойство системы как единого целого. Определим вероятность существования Δn компонентов со свойством Z_i . Очевидно, что вероятность такого события определяется биномиальным (бернуллиевским) распределением (1):

$$\frac{\Delta n}{n} = C_n^{\Delta n} p^{\Delta n} (1-p)^{n-\Delta n}, \quad (1)$$

где $C_n^{\Delta n}$ — число сочетаний: n по Δn ; p — вероятность химического различия компонентов, при $p = 1$ система построена из совершенно разных компонентов, при $p = 0$ система — однокомпонентная. В системах с хаосом состава в соответствии с изложенным реализуется широкий спектр вероятностей $0 < p < 1$. Так, в пространственно неоднородных по физическим свойствам (полям, температурам, давлениям и т.д.) макроскопических областях системы реализуется комплекс k условий и, соответственно, k вероятностей существования и возникновения компонентов p . Поэтому в общем случае вероятность совместного события описывается суммой

$$f\left(\frac{\Delta n}{n}\right) = \sum_{i=1}^k C_n^{\Delta n} p_i^{\Delta n} (1-p_i)^{n-\Delta n}. \quad (2)$$

Рассмотрим некоторые особенности функции распределения свойств. При $p=0$ система состоит из одного компонента, такая ситуация практически невозможна, так как согласно 2-му закону термодинамики происходит рост энтропии разнообразия компонентов. Для тех из k областей макросистемы, в которых реализуется комплекс физико-химических условий малого химического различия или высокого выхода одного из компонентов $p \rightarrow 0$, согласно теореме Пуассона, при $n \rightarrow \infty$ из (2) имеем систему с пуассоновским характером распределения термодинамических характеристик (3). В таких системах число компонентов бесконечно велико, но так как концентрация компонентов очень мала, рассматриваем только доминирующий компонент. Эту пуассоновскую систему в

химии именуют чистым веществом или дальтоном:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{\Delta n!} (pn)^{\Delta n} \exp(-pn). \quad (3)$$

Определим вероятность различия компонентов в распределении Пуассона. Предположим, что один компонент изменяет среднее свойство системы Z_i на ΔZ_i , тогда вероятность различия компонентов $p_i = (\Delta n \Delta Z_i)/Z$, где Δn — число соответствующих групп компонентов. Тогда вероятность того, что Δn_i компонентов имеют свойство Z_i при условии выполнения закона (2.8), равна (2.9):

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{\Delta n!} \left(\frac{\Delta n \Delta Z}{\beta}\right)^{\Delta n} \exp\left(-\frac{\Delta n \Delta Z}{\beta}\right). \quad (4)$$

Постоянная β в уравнении (4) имеет смысл среднего вклада одного компонента в величину свойства Z системы $\beta \approx Z/n$.

Таким образом, существует разделение систем с хаосом состава в зависимости от вероятности различия компонентов на бернуллиевские, гауссовские и пуассоновские системы, в последнем случае имеем два так называемых индивидуальных вещества. В любом веществе можно выделить бесконечное число бернуллиевских систем с хаосом компонентного состава, которые в зависимости от условий и локализации в пространстве разделяют на гауссовские и пуассоновские подсистемы (статистические ансамбли).

Также не исключены ситуации, когда функции имеют различные распределения по независимым параметрам. Такая возможность следует из локальной теоремы Муавра-Лапласа и локальной теоремы Пуассона. Рассмотрим функцию распределения $F(x, y)$, которая в свою очередь является функцией от двух независимых случайных параметров распределения X и Y . Свойства двумерной функции распределения:

$$1) 0 \leq F(x, y) \leq 1.$$

2) $F(x, y)$ есть неубывающая функция по каждому аргументу:

$$F(x_2, y) \geq F(x_1, y), \text{ при } x_2 > x_1;$$

$$F(x, y_2) \geq F(x, y_1), \text{ при } y_2 > y_1.$$

$$3) F(-\infty, y) = 0; F(x, -\infty) = 0; F(-\infty, -\infty) = 0; F(\infty, \infty) = 1.$$

$$4) F(x, \infty) = F_1(x); F(\infty, y) = F_2(y).$$

Пусть $F(x)$ и $F(y)$ — одномерные функции распределения случайных величин, тогда $F(x, y) = F(x) * F(y)$ — двумерная функция рас-

пределения. При условии, когда вероятность того, что функция распределения $F(x)$ принимает какое-либо значение, находится между 0 и 1, то, как следует из теории (теорема Муавра-Лапласа), функция должна иметь вид нормального распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (5)$$

Для второй функции $F(Y)$ предположим, что вероятность события близка к 0. Тогда согласно теореме Пуассона функция должна иметь вид

$$f(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}. \quad (6)$$

Тогда общий вид функции распределения $F(x, y)$ будет гауссово-пуассоновский, т.е.

$$f(x_1, x_2) = f(x_1) \times f(x_2) = \frac{\lambda^{x_1} e^{-\lambda}}{x_1!} \times \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_2-\mu)^2}{2\sigma^2}} = \frac{\lambda^{x_1} e^{-\lambda}}{\sqrt{2\pi\sigma} x_1!} e^{-\left(\frac{(x_2-\mu)^2}{2\sigma^2} - \lambda\right)}, \quad (7)$$

где $\lambda = p_1 n_1$,

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} x_2 f(x_2) dx,$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x_2 - \mu_2)^2 f(x_2) dx.$$

Интерес представляет исследование динамики систем, описываемых двумерным распределением случайных величин: гауссовым по одной из физических величин и пуассоновским — по другой. Теории таких систем в литературе уделяется недостаточное внимание, так как считается, что такие системы мало проявляются в природе и технике. Однако такие системы существуют. Нап-

пример, когда распределение частиц по скорости подчинено гауссовому закону распределения, а распределение частиц по плотности имеет пуассоновский характер, причем плотность слабо зависит от скорости движения частиц.

Практически во всех разделах физики и техники можно найти примеры таких систем. Нас интересуют общие закономерности перехода обычных двумерных распределений в смешанные распределения. С этой целью было проведено моделирование систем, подчиненных смешанному двумерному закону распределения.

Описание методики алгоритма

Использовался метод ячеек с фиксированной шкалой свободных энергий и случайной шкалой компонентов. Переменной, определяющей состав системы, служила вероятность различия компонентов. В ходе компьютерного эксперимента значение варьировалось в пределах от 0 до 1. Сетка свободных энергий задавалась при фиксированной температуре 298 К, которая соответствует равновесным условиям исследования системы.

Рассмотрим алгоритм проведения имитационного моделирования МСХС. На компьютере были сгенерированы системы компонентов, обладающих определенной свободной энергией при вероятностях различия химического состава $0 < p < 1$. Размерность системы N равна $10^3 - 10^4$ компонентов.

Для сгенерированного ряда значений свойства ΔG определены следующие параме-

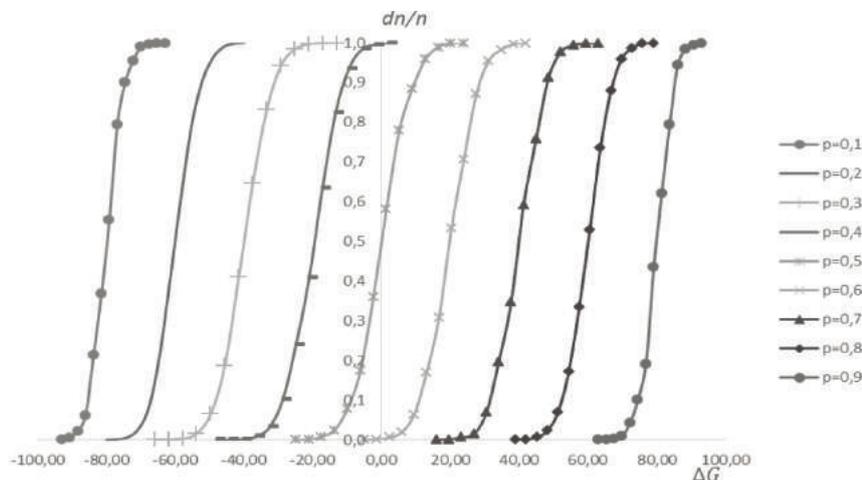


Рисунок 1. Обобщенный график функций распределения состава по свободной энергии при $0 < p < 1$

тры: максимальное и минимальное значения, размах выборки, среднеквадратичное отклонение, математическое ожидание, число интервалов ранжирования, шаг интервалов. Группировка рядов сгенерированных компонентов производилась при помощи формулы Стерджесса, определяющей число ранжированных групп:

$$k = 1 + 3,322 \times \log n. \quad (8)$$

Был построен график функций распределения состава по свободной энергии при значении вероятности различия химического состава от 0,1 до 0,9 (рисунок 1).

Далее производилась проверка сгенерированных компонентов на принадлежность нормальному закону распределения. Проверка нормального закона производилась при помощи критерия согласия Колмогорова. Основанием для вывода о достоверных различиях между выборками по данному критерию служит выполнение условия

$$D_{\text{экс}} \geq D_{\text{крит}}. \quad (9)$$

Расчет эмпирического критерия $D_{\text{экс}}$ производится по формуле

$$D_{\text{экс}} = \max|F_n(x) - F(x)|, \quad (10)$$

где $F_n(x)$ — значение эмпирической функции распределения, $F(x)$ — значение теоретической функции распределения.

В качестве примера приведем значения критериев $D_{\text{экс}}$ и $D_{\text{крит}}$ при вероятности различия состава равного 0,5. Экспериментальное значение критерия Колмогорова-Смирнова $D_{\text{экс}} = 0,0249$. Критическое значение при уровне значимости $\alpha = 0,05$ $D_{0,05} = 0,0147$.

В ходе вычислений определили принадлежность систем при $p \in [0,2; 0,8]$ к нормальному распределению. Таким образом, доказывается принадлежность системы с хаосом химического состава к нормальному распределению при вероятности различия компонентов в интервале от 0,2 до 0,8. Это означает, что законы нормального распределения состава по свободным энергиям, а также температурам кипения выполнимы в системах, в которых отношение числа компонентов, различающихся по свойствам, к общему числу компонентов составляет 20–80 %.

Для характеристики хаоса многокомпонентной среды можно предложить информа-

ционно-энтропийные характеристики, например информационную энтропию состава (ЭИС), H_c многокомпонентной сложной системы. Эта энтропия вычисляется по формуле Шеннона следующим образом:

$$H_c = \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \quad (11)$$

где H_c — информационная энтропия состава; p_i — вероятность присутствия i -ого компонента в сложной системе.

Показатель энтропии позволяет также измерить количество информации о компонентах. Чем больше вероятность присутствия вещества p_i , тем меньше ИЭС. Произведем расчет информационной энтропии для систем с вероятностью химического состава в интервале от 0,2 до 0,8. Для этого воспользуемся формулой информационной энтропии для нормального распределения:

$$H(X) = \ln(\sigma\sqrt{2\pi e}), \quad (12)$$

где σ — среднеквадратическое отклонение.

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Информационная энтропия нормального распределения

p	H(X)
0,2	3,155911
0,3	3,291407
0,4	3,345687
0,5	3,369851
0,6	3,341042
0,7	3,271335
0,8	3,15817

Рассмотрим системы, в которых реализуется комплекс физико-химических условий малого химического различия или высокого выхода одного из компонентов $p \rightarrow 0$. Функции распределения состава по свободной энергии при значении вероятности химического состава от 0,01 до 0,09 представлены на рисунке 2.

Для этих распределений произведем проверку гипотезы о распределении Пуассона при помощи критерия χ^2 . Для каждого сгенерированного ряда компонентов производится расчет критерия Пирсона χ^2 :

$$\chi^2 = \sum \frac{(f_o - f_e)^2}{f_e}, \quad (13)$$

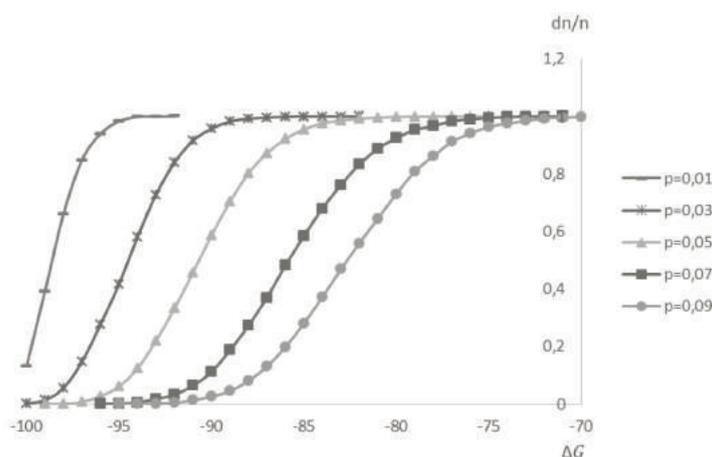


Рисунок 2. Обобщенный график функций распределения состава по свободной энергии при $p \rightarrow 0$

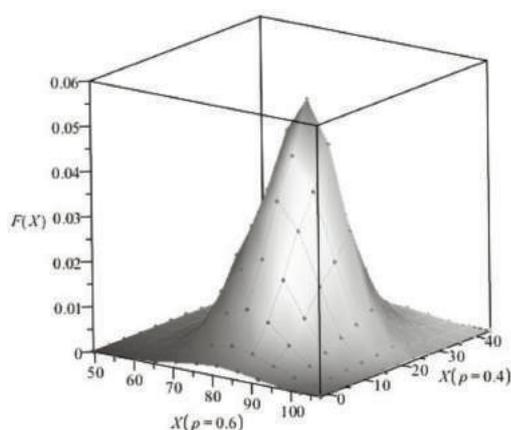


Рисунок 3. График гауссовой двумерной функции плотности распределения

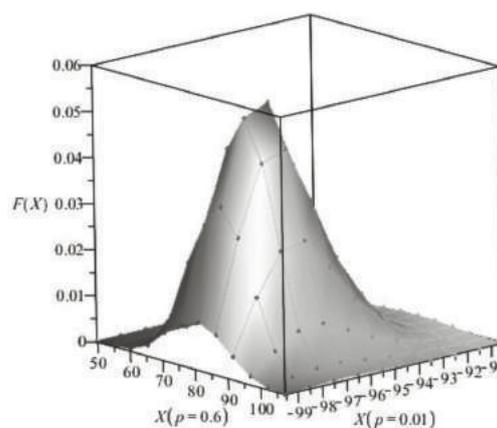


Рисунок 4. График смешанной гауссово-пуассоновской двумерной функции плотности

где f_e — эмпирическое значение частоты, f_0 — теоретическое значение частоты, в данном случае полученное по закону распределения Пуассона. Критическое значение критерия определяется из таблицы [12, 13] при заданном значении степени свободы. Уровень значимости $\alpha = 0,05$.

Гипотеза о распределении Пуассона была подтверждена при $p \in [0,01; 0,085]$. Это говорит о принадлежности систем с хаосом состава, в которых отношение числа компонентов, различающихся по свойствам, к общему числу компонентов составляет 1–8,5 %, к распределению Пуассона. Таким образом, можно говорить об области неустойчивого распределения в системах с вероятностью различия химического состава в интервале от 0,085 до 0,2.

Далее исследуем двумерные функции распределения при условии независимости свойств. Рассмотрим две случайных вели-

чины $x_1, x_2 \in [-100, 200]$, p_1 и p_2 — вероятности, изменяемые во времени. По этим вероятностям мы будем генерировать значения свойств X и Y. На первом шаге сгенерируем значения двумерной функции по распределению Гаусса, приняв $p_1 = 0,4$, а $p_2 = 0,6$.

$$f(x_1, x_2) = f(x_1) \times f(x_2) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} \times \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_2 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} = \frac{1}{\sigma_1 \sigma_2 2\pi} e^{-\left(\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} + \frac{(x_2 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right)} \quad (14)$$

Для случайных величин x_1 и x_2 значение математического ожидания и дисперсии равны: μ_1 и μ_2 .

На рисунке 3 изображен график двумерной функции распределения.

Далее наблюдаем за возможностью перехода от двумерной функции Гаусса в смешанную гауссово-пуассоновскую функцию. Для этого будем уменьшать значение вероятности p_1 , приближая его к 0. На

рисунке 4 показан график плотности распределения при $p_1 = 0,01$.

Таким образом, показана принципиальная возможность перехода гауссовых двумерных распределений в смешанные гауссово-пуассоновские распределения, которые устойчивы. Разработаны программа и алгоритм, которые позволяют имитировать сложные распределения.

Выводы

В результате имитационного компьютерного моделирования компонентно-фракционного состава многокомпонентных систем были построены обобщенные функции распределения состава по термодинамическим свойствам, в частности по свободной энергии образования компонентов (свободной энергии Гельмгольца), которая определяет совокупность физико-химических свойств и стабильность системы. Экспериментально установлена принадлежность системы с хаосом химического состава к нормальному

распределению при вероятности различия компонентов в интервале от 0,2 до 0,8. Это означает, что законы нормального распределения состава по свободным энергиям, а также температурам кипения выполнимы в системах, в которых отношение числа компонентов, различающихся по свойствам, к общему числу компонентов составляет 20–80 %. Также установлена принадлежность систем с хаосом химического состава, в которых доля отличающихся по свойствам компонентов составляет 1,0–8,5 %, к распределению Пуассона. При вероятности различия химического состава в интервале от 0,085 до 0,2 наблюдается область неустойчивого распределения. Нефть и большинство нефтяных фракций, а также космические углеводородные системы отвечают этим условиям. Также показана принципиальная возможность перехода гауссовых двумерных распределений в смешанные гауссово-пуассоновские распределения. Разработана программа и алгоритм, которые позволяют имитировать сложные распределения.

Список литературы

1. Долوماتов М.Ю. Фрагменты теории реального вещества. От углеводородных систем к галактикам. М.: Химия, 2005. 208 с.
2. Долوماتов М.Ю. Некоторые физико-химические аспекты прогнозирования свойств многокомпонентных систем в условиях экстремальных воздействий // ЖВХО им. Д.И. Менделеева. 1990. Т. 35, № 5. С. 632.
3. Долوماتов М.Ю. Физико-химические основы новых методов исследования сложных многокомпонентных систем. Перспективы практического использования. М.: ЦНИИТЭНефтехим, 1991. 72 с.
4. Долوماتов М.Ю. Химическая физика многокомпонентных систем. Часть 1. Физико-химическая теория сложных органических и нефтехимических систем. Уфа: Ин-т проблем нефтепереработки и нефтехимии АН РБ, Уфимск. технол. ин-т сервиса, 2000. 124 с.
5. Долوماتов М.Ю., Журавлева Н.А. Распределение молекул в межзвездной среде и проблема космогенеза нефти и биосистем. Уфа: Изд-во ГУП ИНХП, 2013. 167 с.
6. Dolomatov M.Yu., Zhuravleva N.A. Thermodynamic models of the distribution of life-related organic molecules in the interstellar medium // *Astrophysics and Space Science, Springer Science+Business Media Dordrecht*. May 2014. Vol. 351. Issue 1. pp. 213. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10509-014-1844-8>.
7. Dolomatov M.Yu., Zhuravleva N.A., Tanatarova D.R. About organic systems origin according to equilibrium thermodynamic models of molecules distribution in interstellar medium // *Applied Physics Research*. 2014. Vol. 6, No. 5.
8. Dolomatov M.Yu., Zhuravleva N.A. The thermodynamic models of molecular chemical compound distribution in the giant molecular clouds medium // *Applied Physics Research*. 2012. Vol. 4, No. 4, November. www.ccsenet.org/apr.
9. Долوماتов М.Ю., Журавлева Н.А. Статистические модели распределения состава органических веществ в гигантских молекулярных облаках // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2012. № 6. С. 32.
10. Эйгенсон А.С. Закономерности компонентно-фракционного состава нефтей //

Химия и технология топлива и масел. 1973. № 1. С. 1.

11. Эйгенсон А.С. О количественном исследовании формирования техногенных и природных углеводородных систем с помощью методов математического моделирования // Химия и технология топлив и масел. 1990. № 9. С. 3.

12. Вентцель Е.С. Теория вероятности. М.: Академия, 2003. 576 с.

13. StatSoft. Таблицы распределений. Критические области для хи-квадрат распределения: электронный учебник по статистике. <http://www.statsoft.ru/home/textbook/modules/sttable.html>.

References

1. Dolomatov M.Yu. Fragmenty teorii real'nogo veshchestva. Ot uglevodorodnykh sistem k galaktikam. М.: Khimiya, 2005. 208 s.

2. Dolomatov M.Yu. Nekotorye fiziko-khimicheskie aspekty prognozirovaniya svoistv mnogokomponentnykh sistem v usloviyakh ekstremal'nykh vozdeistvii // ZhVKhO im. D.I. Mendeleeva. 1990. T. 35, № 5. S. 632.

3. Dolomatov M.Yu. Fiziko-khimicheskie osnovy novykh metodov issledovaniya slozhnykh mnogokomponentnykh sistem. Perspektivy prakticheskogo ispol'zovaniya. М.: TsNIITENeftekhim, 1991. 72 s.

4. Dolomatov M.Yu. Khimicheskaya fizika mnogokomponentnykh sistem. Chast' 1. Fiziko-khimicheskaya teoriya slozhnykh organicheskikh i neftekhimicheskikh sistem. Ufa: In-t problem neftepererabotki i neftekhimii AN RB, Ufimsk. tekhnol. in-t servisa, 2000. 124 s.

5. Dolomatov M.Yu., Zhuravleva N.A. Raspredelenie molekul v mezhzvezdnoi srede i problema kosmogenezа нефти i biosistem. Ufa: Izd-vo GUP INKhP, 2013. 167 s.

6. Dolomatov M.Yu., Zhuravleva N.A. Thermodynamic models of the distribution of life-related organic molecules in the interstellar medium // *Astrophysics and Space Science*, Springer Science+Business Media Dordrecht. May 2014. Vol. 351. Issue 1. pp. 213. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10509-014-1844-8>.

7. Dolomatov M.Yu., Zhuravleva N.A., Tanatarova D.R. About organic systems origin according to equilibrium thermodynamic models of molecules distribution in interstellar medium // *Applied Physics Research*. 2014. Vol. 6, No. 5.

8. Dolomatov M.Yu., Zhuravleva N.A. The thermodynamic models of molecular chemical compound distribution in the giant molecular clouds medium // *Applied Physics Research*. 2012. Vol. 4, No. 4, November. www.ccsenet.org/apr.

9. Dolomatov M.Yu., Zhuravleva N.A. Statisticheskie modeli raspredeleniya sostava organicheskikh veshchestv v gigantских molekulyarnykh oblakakh // *Naukoemkie tekhnologii*. 2012. № 6. S. 32.

10. Eigenson A.S. Zakonomernosti komponentno-fraktsionnogo sostava neftei // *Khimiya i tekhnologiya topliva i masel*. 1973. № 1. S. 1.

11. Eigenson A.S. O kolichestvennom issledovanii formirovaniya tekhnogennykh i prirodnykh uglevodorodnykh sistem s pomoshch'yu metodov matematicheskogo modelirovaniya // *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*. 1990. № 9. S. 3.

12. Venttsel' E.S. Teoriya veroyatnosti. М.: Akademiya, 2003. 576 s.

13. StatSoft. Tablitsy raspredelenii. Kriticheskie oblasti dlya khi-kvadrat raspredeleniya: elektronnyi uchebник po statistike. <http://www.statsoft.ru/home/textbook/modules/sttable.html>.

ОБ АВТОРАХ

Абрамишвили Роман Лаврентьевич

аспирант кафедры «Управление и сервис в технических системах», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: abramishvili.rl@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Абызбаев Ибрагим Измаилович

доктор технических наук, профессор кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газонефтяных месторождений», Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: iktugaes@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Альмухаметов Азат Ахатович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: sharafiev47@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Артюшенко Владимир Михайлович

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Информационные технологии и управляющие системы», Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет», e-mail: artuschenko@mail.ru, г. Королев, Российская Федерация

Багманов Валерий Хусаинович

доктор технических наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Белов Олег Александрович

кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электро- и радиооборудование судов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Камчатский государственный технический университет», e-mail: pantina_anastasia@mail.ru, г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

Волков Сергей Юрьевич

генеральный директор Автономной некоммерческой организации «Центр сертификации продукции и систем менеджмента в сфере nanoиндустрии», e-mail: prm_scmrb@mail.ru, г. Москва, Российская Федерация

Воловач Владимир Иванович

доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Информационный и электронный сервис», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет сервиса», e-mail: ssunrise@mail.ru, г. Тольятти, Российская Федерация

Гизатуллин Фарит Абдулганеевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: elaint@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Горбунов Антон Сергеевич

кандидат технических наук, ассистент кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: svshap@ufacom.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Денисова Ольга Аркадьевна

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Физика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: denisovaolga@bk.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Доломатов Михаил Юрьевич

кандидат технических наук, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры «Технология нефти и газа», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», профессор кафедры «Физическая электроника и нанофизика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: dolomatov@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

Ерофеев Валерий Владимирович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: sharafiev47@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Ерофеев Сергей Валерьевич

кандидат технических наук, директор ООО «Промстандарт», г. Челябинск, Российская Федерация

Журавлева Надежда Александровна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Экономическая информатика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: zhuravlivoa80@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Зайнуллин Айрат Радикович

аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: zainullin.a@list.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Закурдаева Татьяна Алексеевна

аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника», Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» в г. Кумертау, e-mail: zak.tanya@bk.ru, г. Кумертау, Российская Федерация

Игнатъев Андрей Геннадьевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Прикладная механика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный аграрный университет», e-mail: sharafiev47@mail.ru, г. Челябинск, Российская Федерация

Ильин Владимир Кузьмич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», e-mail: ilinwk@ Rambler.ru, г. Казань, Российская Федерация

Исламгулов Руслан Рустемович

студент кафедры «Общенаучные дисциплины», Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, e-mail: tattin76@mail.ru, г. Салават, Российская Федерация

Казаков Максим Андреевич

аспирант кафедры «Экономическая информатика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: kazakov.maxim.a@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

Карабельская Ирина Владимировна

доцент кафедры «Информатика и информационно-коммуникационные технологии», Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: iktugaes@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Курбангалиев Азат Маратович

студент кафедры «Общенаучные дисциплины», Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, e-mail: tattin76@mail.ru, г. Салават, Российская Федерация

Могучев Александр Иванович

кандидат технических наук, доцент, декан горно-нефтяного факультета, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: Moguchev@rusoil.net, г. Уфа, Российская Федерация

Муратшин Амран Мигранович

директор Федерального бюджетного учреждения «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Республике Башкортостан», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой стандартизации и метрологии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: prm_scmrb@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Мухамадиев Айдар Асхатович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и сервис в технических системах» Института экономики и сервиса, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: Aidar80@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Мухаметзянов Эльвир Венерович

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры «Общенаучные дисциплины», Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, e-mail: tattin76@mail.ru, г. Салават, Российская Федерация

Насыров Рустем Айратович

магистрант кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: svshap@ufacom.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Николаева Анастасия Николаевна

студент кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: s2_88@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Пантина Анастасия Игоревна

аспирант кафедры «Электро- и радиооборудование судов», заместитель декана по учебной и научной работе мореходного факультета, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Камчатский государственный технический университет», e-mail: pantina_anastasia@mail.ru, г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

Родионов Артем Сергеевич

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Общенаучные дисциплины», Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, e-mail: tattin76@mail.ru, г. Салават, Российская Федерация

Сабитов Линар Салихзанович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанского государственного энергетического университета», e-mail: l.sabitov@bk.ru, г. Казань, Российская Федерация

Сафаргалин Фадис Салихович

магистрант кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: fadis.safargalin@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

Саяхов Ильдус Финатович

аспирант кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: s2_88@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Стрелков Юрий Михайлович

руководитель проекта ООО «Инженерный центр «Энергопрогресс», г. Казань, Российская Федерация

Стыскин Андрей Владиславович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: styskin.andrei@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Уразбахтина Нэля Гиндулаевна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: urazbah@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Ураксеев Марат Абдуллович

доктор технических наук, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: uma1941@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Федосов Артем Васильевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: pbot@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Федосов Василий Андреевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и сервис в технических системах» Института экономики и сервиса, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: pbot@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Хакимьянов Марат Ильгизович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: hakimyanovmi@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

Хамидуллин Искандер Наилевич

аспирант кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», e-mail: hamidullin@gridcom-rt.ru, г. Казань, Российская Федерация

Холодова Евгения Михайловна

руководитель Центра оценки квалификаций Автономной некоммерческой организации «Центр сертификации продукции и систем менеджмента в сфере nanoиндустрии», e-mail: rtm_scmrb@mail.ru, г. Москва, Российская Федерация

Шапиро Семен Вольфович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры медицинской физики, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный медицинский университет», e-mail: svshap@ufacom.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Шарафиев Роберт Гарафиевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: sharafiev47@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Abramishvili Roman L.

Post-Graduate Student of Management and Service in the Technical Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: abramishvili.rl@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Abyzbaev Ibrahim I.

Dr. Sci. Tech., Professor of Development and Exploitation of Oil and Gas Fields Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: iktugaes@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Almukhametov Azat A.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Computer Engineering and Engineering Cybernetics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: sharafiev47@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Artyushenko Vladimir M.

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Information Technology and Control Systems Chair, State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow Region «University of Technology», e-mail: artuschenko@mail.ru, Korolev, Russian Federation

Bagmanov Valeriy Kh.

Dr. Sci. Tech., Professor of Telecommunication Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», Ufa, Russian Federation

Belov Oleg A.

Cand. Sci. Tech., Head of Electrical and Radio Equipment for Ships Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kamchatka State Technical University», e-mail: pantina_anastasia@mail.ru, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

Denisova Olga A.

Dr. Sci. Phys.-Math., Associate Professor, Professor of Physics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: denisovaolga@bk.ru, Ufa, Russian Federation

Dolomatov Michail Yu.

Cand. Sci. Tech., Dr. Sci. Chem., Professor, Professor of Oil and Gas Technology Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Professor of Physical Electronics and Nanophysics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», e-mail: dolomatov@gmail.com, Ufa, Russian Federation

Erofeyev Sergey V.

Cand. Sci. Tech., Director of Promstandart Ltd., Chelyabinsk, Russian Federation

Erofeyev Valery V.

Dr. Sci. Tech., Professor, Professor of Oil Equipment Technology Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: sharafiev47@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Fedosov Artem V.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Industrial Safety and Labor Protection Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Fedosov Vasily A.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor of Management and Service in the Technical Systems Chair, Institute of Economics and Service, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: pbot@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Gizatullin Farit A.

Dr. Sci. Tech., Professor, Professor of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: elaint@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

Gorbunov Anton S.

Cand. Sci. Tech., Assistant of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: svshap@ufacom.ru, Ufa, Russian Federation

Ignatiev Andrey G.

Dr. Sci. Tech., Associate Professor, Professor of Applied Mechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «South Ural State Agrarian University», e-mail: sharafiev47@mail.ru, Chelyabinsk, Russian Federation

Ilyin Vladimir K.

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Power Supply of Enterprises and Energy Resource Saving Technologies Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power Engineering University», e-mail: ilinwk@rambler.ru, Kazan, Russian Federation

Islamgulov Ruslan R.

Student of General Scientific Disciplines Chair, Branch of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University» in Salavat, e-mail: tattin76@mail.ru, Salavat, Russian Federation

Karabelskaya Irina V.

Assistant Professor of Informatics and Information and Communication Technologies Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: iktugaes@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Kazakov Maksim A.

Post-Graduate Student of Economic Informatics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: kazakov.maxim.a@gmail.com, Ufa, Russian Federation

Khakimyanov Marat I.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: hakimyanovmi@gmail.com, Ufa, Russian Federation

Khamidullin Iskander N.

Post-Graduate Student of Power Supply of Enterprises and Energy Resource Saving Technologies Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power Engineering University», e-mail: hamidullin@gridcom-rt.ru, Kazan, Russian Federation

Kholodova Evgeniia M.

Head of the Qualifications Evaluation Center of the Autonomous Non-Profit Organization «Certification Center for Products and Management Systems in the Sphere of Nanoindustry», e-mail: prm_scmrb@mail.ru, Moscow, Russian Federation

Kurbangaliev Azat M.

Student of General Scientific Disciplines Chair, Branch of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University» in Salavat, e-mail: tattin76@mail.ru, Salavat, Russian Federation

Moguchev Alexander I.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Dean of the Oil Mining Faculty, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: Moguchev@rusoil.net, Ufa, Russian Federation

Mukhamadiev Aydar A.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Management and Service in the Technical Systems Chair, Institute of Economics and Service, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: Aidar80@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Mukhametzyanov Elvir V.

Cand. Sci. Phys.-Math., Senior Lecturer of General Scientific Disciplines Chair, Branch of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University» in Salavat, e-mail: mukhametzuanov.ev@gmail.com, Salavat, Russian Federation

Muratshin Amran M.

Director of the Federal Budgetary Institution «State Regional Center for Standardization, Metrology and Testing in the Republic of Bashkortostan», Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Standardization and Metrology Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: prn_scmrb@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Nasyrov Rustem A.

Master Student of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: svshap@ufacom.ru, Ufa, Russian Federation

Nikolaeva Anastasia N.

Student of Telecommunication Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University» e-mail: s2_88@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Pantina Anastasia I.

Post-Graduate Student of Electrical and Radio Equipment for Ships Chair, Deputy Dean for Academic and Scientific Work of the Nautical Faculty, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kamchatka State Technical University», e-mail: pantina_anastasia@mail.ru, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

Rodionov Artem S.

Cand. Sci. Phys.-Math., Associate Professor of General Scientific Disciplines Chair, Branch of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University» in Salavat, e-mail: tattin76@mail.ru, Salavat, Russian Federation

Sabitov Linar S.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor of Enterprises and Energy Resource Saving Technologies Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power Engineering University», e-mail: l.sabitov@bk.ru, Kazan, Russian Federation

Safargalin Fadis S.

Master Student of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: fadis.safargalin@gmail.com, Ufa, Russian Federation

Sayakhov Ildus F.

Post-Graduate Student of Chair «Electromechanics», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: s2_88@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Shapiro Semen V.

Dr. Sci. Tech., Professor, Professor of Medical Physics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Medical University», e-mail: svshap@ufacom.ru, Ufa, Russian Federation

Sharafiyev Robert G.

Dr. Sci. Tech., Professor, Professor of Oil Equipment Technology Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: sharafiev47@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Strelkov Yury M.

Head of the Project, Engineering Center «Energoprogress» LLC, Kazan, Russian Federation

Styskin Andrey V.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: styskin.andrei@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

Urakseev Marat A.

Dr. Sci. Tech., Professor of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: uma1941@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Urazbakhina Nelja G.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: urazbah@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Volkov Sergey Yu.

General Director of the Autonomous Non-Profit Organization «Certification Center for Products and Management Systems in the Sphere of Nanoindustry», e-mail: prm_scmrb@mail.ru, Moscow, Russian Federation

Volovach Vladimir I.

Dr. Sci. Tech., Associate Professor, Head of Information and Electronic Service Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volga Region State University of Service», e-mail: ssunrise@mail.ru, Togliatti, Russian Federation

Zainullin Ayrat R.

Post-Graduate Student of Telecommunication Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: zainullin.a@list.ru, Ufa, Russian Federation

Zakyrdaeva Tatyana A.

Post-Graduate Student of Information and Measuring Technology Chair, Branch of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University» in the City of Kumertau, e-mail: zak.tanya@bk.ru, Kumertau, Russian Federation

Zhuravleva Nadezhda A.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor, Associate Professor of Economic Informatics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: zhuravlioiva80@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале:

1. Статьи, предоставляемые авторами в журнал, должны соответствовать профилю журнала, обладать новизной, интересовать широкий круг научной общественности.
2. Редакция принимает к публикации только открытые материалы на русском и английском языках (для иностранных авторов).
3. Поля – 2,5 см с каждой стороны; шрифт – Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал – полуторный; ссылки на литературу – в квадратных скобках. При наличии ссылок список литературы обязателен (в порядке цитирования, в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008).
4. В правом верхнем углу жирным курсивом: фамилия, имя, отчество авторов (обязательно полностью), ученая степень, ученое звание, должность, структурное подразделение (обязательно полностью), наименование организации (полностью), город, страна.
5. По центру, жирным шрифтом, заглавными буквами: название статьи, УДК в правом верхнем углу.
6. В конце статьи укажите почтовый адрес с указанием индекса, фамилию и инициалы получателя (по этому адресу будет выслан журнал), телефон (сотовый), e-mail контактного лица. Файл со статьей оформить: Фамилия И.О.doc (или docx). Отправлять по адресу: uor-ugaes@mail.ru.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельными файлами.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (240 слов, определяющих теоретическую ценность и практическую новизну статьи), ключевые слова (не менее 10), список литературы обязателен (не менее 5 источников) на русском и английском языках.
9. Автор дает согласие на воспроизведение на безвозмездной основе в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВО «УГУЭС» 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 FSEI HE «USUES» 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.