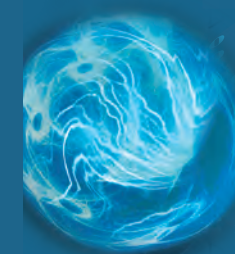


ISSN 1999-5458

# Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 4, т. 12, 2016



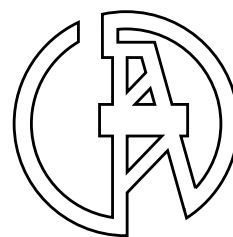
# Electrical and data processing facilities and systems

№ 4, т. 12, 2016



Подписной индекс:  
91824 в каталоге «Пресса России»

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УГНТУ

№ 4, т. 12, 2016

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.ugues.ru](http://www.ugues.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, 2016.

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

Цена свободная. 12+

Подписано в печать 26.12.2016 г. Формат 60x84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,74.  
Тираж 1 000 экз. Заказ № 34.

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

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

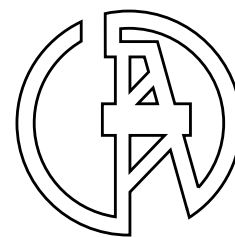
Материалы приводятся в авторской редакции.

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

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

# ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE PETROLEUM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY



USPTU

№ 4, v. 12, 2016

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)

### 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)



### 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)

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 Citig (RISC).

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

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

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

Price is free. **12+**

Publishing authorized on 26.12.2016. Paper format 60x84/8. Offset printing. 16,74 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 34.

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>Пентегов И.В., Рымар С.В.</i> Применение метода тепловых источников при учете распределения источников тепла при индукционном нагреве	5
<i>Аилов Р.С., Валишин Д.Е.</i> Математическая модель линейного асинхронного привода плунжерного насоса с периодической коммутацией фазы источника трёхфазного напряжения	13
<i>Кольцов А.В., Ковтун Г.Н., Горюшин Ю.А., Жернаков Ю.В., Салихзянов Р.М., Лебедев И.А.</i> Новые решения в системах плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения 220 и 330 кВ	21
<i>Кушнир В.Г., Кошкин И.В., Кошкина А.И., Кушнир А.С.</i> Имитационное моделирование системы «ветронасос — гидротурбина»	28
<i>Линенко А.В., Туктаров М.Ф., Сираев Ш.Ф., Байназаров В. Г.</i> Нечеткий регулятор в системе управления линейным электроприводом зерноочистительной машины	34
<i>Копылов К.Н., Решетняк С.Н., Кубрин С.С.</i> Пути модернизации выемочного комбайна угольной шахты	41
<i>Суханов П.И., Савотин О.А., Павлов А.И., Репин А.И.</i> Универсальная быстромонтируемая опора для проведения аварийно-восстановительных работ	47
<i>Конесев С.Г., Хазиева Р.Т.</i> Анализ динамики патентования индуктивно-емкостных преобразователей для систем стабилизации тока	55

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Имильбаев Р.Р., Крымский В.Г., Юнусов А.Р.</i> Использование интервальных временных рядов для прогнозирования состояния газораспределительной сети	62
<i>Гвоздев В.Е., Костюкова А.П., Кириллов К.В.</i> Статистическое оценивание показателей надежности систем обработки данных и управления по неполным сведениям о выборочных данных	73
<i>Нгуен Данг Тао</i> Моделирование адаптивной системы синхронизированных по фазе приемноизлучающих объектов	79
<i>Федосов А.В., Закирова З.А., Ахметшарипова К.Р., Яматова Р.А., Мухаметшин А.К., Макаров К.В.</i> Анализ систем обеспечения промышленной безопасности опасных производственных объектов нефтегазовой отрасли	87
<i>Хасанишин В.Р., Виноградова И.Л.</i> Повышение эффективности управления сетями связи с применением chirпированных оптических импульсов	96

## МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

<i>Петрова И.Ю., Ураксеев М.А., Николаев А.В.</i> Классификация погрешностей информационно-измерительной системы для бесконтактного контроля технического состояния зоны резания при механической обработке углеродсодержащих материалов	105
--	-----

## НАНОЭЛЕКТРОНИКА И КВАНТОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

<i>Леонов В.В., Денисова О.А.</i> Электрохимический метод исследования процессов микробной коррозии	111
<i>Доломатов М.Ю., Шамова Н.А., Трапезникова Е.Ф., Ильина Е.Г.</i> Полуэмпирические модели «структура — свойство» для расчетов критических параметров фазовых переходов «жидкость — пар»	120
<b>Об авторах</b>	126



# CONTENT

## ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Pentegov I.V., Rymar S.V.</i> Application of the heat sources method with account for the heat sources' distribution in the case of induction heating	5
<i>Aipov R.S., Valishin D.E.</i> Mathematical model of linear induction drive plunger pump with periodic switching phases of three-phase voltage source	13
<i>Koltsov A.V., Kovtun G.N., Goryushin Y.A., Zhernakov Y.V., Salihzyanov R.M., Lebedev I.A.</i> New ice-melting solutions for 220 and 330 kV AC overhead transmission lines	21
<i>Kushnir V.G., Koshkin I.V., Koshkina A.I., Kushnir A.S.</i> Simulation of «wind pump — water turbine» system	28
<i>Linenko A.V., Tuktarov M.F., Siraev Sh.F., Baynazarov V.G.</i> Fuzzy controller in the control system of linear inductor drive of grain cleaning machine	34
<i>Kopylov K.N., Reshetnyak S.N., Kubrin S.S.</i> Way of coal mining complex modernization	41
<i>Suhanov P.I., Savotin O.A., Pavlov A.I., Repin A.I.</i> Emergency restoration kit for restoring faulty overhead transmission lines	47
<i>Konesev S.G., Khazieva R.T.</i> Analysis of patenting of inductive-capacitive transducers for current stabilization systems	55

## DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Imilbaev R.R., Krymsky V.G., Yunusov A.R.</i> Application of interval time series to forecasting the state of gas distribution network	62
<i>Gvozdev V.E., Kostyukova A.P., Kirillov K.V.</i> Statistical estimation of reliability indices of data processing and management systems based on incomplete information on sample data	73
<i>Nguyen Dang Tao</i> Simulation of an adaptive system is synchronized with the phase of the transmitting and receiving objects	79
<i>Fedosov A.V., Zakirova Z.A., Ahmetsharipova K.R., Yamatova R.A., Muhametshin A.K., Makarov K.V.</i> Analysis systems of industrial safety of dangerous objects in oil and gas industry	87
<i>Khasanshin V.R., Vinogradova I.L.</i> Improving of efficiency of the communication networks management using chirped optical pulses	96

## METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES

<i>Petrova I.Y., Urakseev M.A., Nikolaev A.V.</i> Classification of errors the information-measuring system for noncontact inspection of the technical condition of the cutting zone when machining carbon-containing materials	105
---	-----

## NANOELECTRONICS AND QUANTUM DATA SYSTEMS

<i>Leonov V.V., Denisova O.A.</i> Electrochemical method of the microbial corrosion research	111
<i>Dolomatov M.Yu., Shamova N.A., Trapeznikova E.F., Ilina E.G.</i> Semi-empirical model «structure — property» parameters for calculating critical phase transition «liquid — vapor»	120
<b>About the authors</b>	126



**Пентегов И. В.**  
**Pentegov I. V.**

*доктор технических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник отдела  
электротермии Института электросварки  
им. Е.О. Патона НАН Украины,  
г. Киев, Украина*



**Рыман С. В.**  
**Ryman S. V.**

*доктор технических наук, старший  
научный сотрудник, ведущий научный  
сотрудник отдела электротермии  
Института электросварки  
им. Е.О. Патона НАН Украины,  
г. Киев, Украина*

УДК 536.12:621.78.01

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТЕПЛОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ПРИ УЧЕТЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

**Цель.** Разработка алгоритма применения модернизированного метода тепловых источников с учетом распределения источников тепла при индукционном нагреве.

**Методология.** Метод основывается на научных положениях теоретической теплофизики — теории распространения тепла в сплошных средах для определения распределения тепловых потоков в массивных телах, математических методах и способах интегрирования.

**Результаты.** Использование модернизированного метода тепловых источников, базирующегося на новом методе суммирования радиус-векторов, при расчете тепловых процессов при индукционном нагреве позволяет получать как точные решения, требующие большого времени счета, так и приближенные решения с малым временем счета. Проведено сравнение точности расчетов тепловых процессов при индукционном нагреве при различных модификациях метода тепловых источников. На примере пакета MathCAD даны рекомендации по использованию встроенных в программные продукты функций «erf», позволяющих отказаться от явных функций интегрирования и резко сократить время счета. Рассчитаны относительные погрешности, получаемые при приближенном решении с использованием модели с равномерным распределением источников тепла по всему объему, ограниченному глубиной проникновения, и при приближенном решении с использованием модели чисто поверхностного нагрева с равномерным распределением поверхностных источников тепла по поверхности тела под индуктором, по сравнению с точным решением при различных рабочих частотах индуктора. Даны рекомендации по уменьшению погрешностей до приемлемого уровня.

**Оригинальность.** Ускорение расчетов тепловых процессов с использованием разработанных алгоритмов интегрирования в модернизированном методе тепловых источников столь существенно, что позволяет рассчитывать распространение тепла в нагреваемом изделии в режиме реального времени с точностью расчета, приемлемой для практических задач.

**Практическая ценность.** При оптимальном выборе расчетной модели погрешность вычислений тепла не будет превышать 0,6 %. Если такая погрешность не устраивает, то всегда можно перейти к точному решению [7, рисунок 5].

**Ключевые слова:** тепловые расчеты, тепловая мощность, распространение тепла, модернизированный метод тепловых источников, алгоритмы интегрирования, повышение скорости расчетов, точность вычислений, высокочастотный индукционный нагрев.

## APPLICATION OF THE HEAT SOURCES METHOD WITH ACCOUNT FOR THE HEAT SOURCES' DISTRIBUTION IN THE CASE OF INDUCTION HEATING

**Purpose.** Development of the algorithm of application of the modernized method of heat sources to the process of induction heating with account for the heat sources distribution.

**Methodology.** The method is based on scientific principles of theoretical thermal physics — theories of heat propagation in continuous medium, used for determination of distribution of thermal flows in massive bodies, and also on mathematical methods and integration procedures.

**Results.** The utilization of the modernized method of heat sources, which is based on the new method of summation of position vectors, for the calculation of thermal processes caused by induction heating, allows obtaining both the exact solutions requiring time-consuming computations and the approximate solutions with small computational times. Comparison of the accuracy of calculations of thermal processes caused by induction heating is conducted for various modifications of the method of heat sources. By the example of the MathCAD engineering software recommendations are given concerning the use of the functions «erf» built into software packages, which make explicit integrations unnecessary and sharply cut the computation times. The relative errors are calculated at various operating frequencies of the inductor for the approximate solution using the model with a uniform distribution of heat sources in the volume, restricted by the penetration depth, and for the approximate solution using the model of surface heating with a uniform distribution of heat sources on the surface under the inductor, in comparison with the exact solution. Recommendations are given concerning the error reduction.

**Originality.** The speed-up of calculations of thermal processes with the use of the developed integration algorithms in the modernized method of heat sources is so significant, that it allows conducting a real-time computation of the heat propagation in heated body with accuracy, which is adequate for the practical purposes.

**Practical value.** With the optimum choice of computational model the error in the heat propagation calculations will not exceed 0.6 %. If such an error is still unacceptable, it is always possible to revert to the exact solution [7, figure 5].

**Key words:** thermal calculations, heat rating, heat propagation, modernized method of thermal sources, integration algorithms, acceleration of computations, accuracy of computations, high-frequency induction heating.

В работе [1] был приведен новый способ суммирования радиус-векторов в методе тепловых источников [2, 3], позволяющий избежать бесконечно высоких температур в точке возникновения импульса энергии и тем самым существенно повысить точность расчетов. Модернизированный метод базируется на интегральном подходе при решении задачи распространения тепла. В работе [4] приведены алгоритмы интегрирования в модернизированном методе тепловых источников, обеспечивающие ускорение счета, и выполнено сравнение времен, затрачиваемых на тепловые расчеты в различных задачах. На примере пакета MathCAD [5] показано, что скорость расчетов в разработанном модернизированном методе, по сравнению с традиционными методами расчетов, в зависимости от сложности функции удельной мощности,

увеличивается от нескольких десятков до нескольких тысяч раз.

Важно сравнить точность расчетов тепловых процессов при распространении тепла при различных модификациях метода тепловых источников и дать рекомендации к их использованию. Этот вопрос актуален при решении прикладных задач распространения тепла в электротермии, сварке, электротехнических системах.

*Целью и задачей* статьи является разработка алгоритма применения модернизированного метода тепловых источников при учете распределения источников тепла при индукционном нагреве.

В статье рассмотрено сравнение результатов расчета тепловых процессов при индукционном нагреве при различных модификациях метода тепловых источников. Даны

рекомендации по использованию функций «erf», встроенных в пакеты программ для математических и инженерных расчетов и позволяющих отказаться от интегрирования и резко сократить время счета.

Распределение приращений температур в неограниченном трехмерном пространстве при источниках тепла, равномерно распределенных внутри прямоугольного параллелепипеда со сторонами  $X, Y, Z$ , и началом координат в центре параллелепипеда при новом методе суммирования радиус-векторов описывается уравнением (17) работы [1] и уравнением (8) работы [4], справедливых для случая отсутствия теплоотвода вверх от полупространства. При удельной мощности  $p_V$ , Вт/м<sup>3</sup>, выделяемой в элементе объема, не являющейся функцией координат и времени ( $p_V = \text{const}$ ), эти уравнения примут вид:

$$\Theta_1(x, y, z, t) = \frac{p_V}{8c\gamma} \int_0^t \int_{-X/2}^{X/2} \int_{-Y/2}^{Y/2} \int_{-Z/2}^{Z/2} \frac{e^{-\frac{(x_0-x)^2}{4a(t-\tau)}}}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} dx_0 \times$$

$$\times \int_{-Y/2}^{Y/2} \frac{e^{-\frac{(y_0-y)^2}{4a(t-\tau)}}}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} dy_0 \int_{-Z/2}^{Z/2} \frac{e^{-\frac{(z_0-z)^2}{4a(t-\tau)}}}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} dz_0 d\tau, \quad (1)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  $\gamma$  — плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  — текущее время, отсчитываемое от начала процесса нагрева;  $a = \lambda/(c\gamma)$  — коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\tau$  — момент времени, отсчитываемый от начала процесса нагрева, когда в точке с координатами  $(x_0, y_0, z_0)$  выделяется энергия  $dQ$  (эта энергия равна  $dQ = p_V \cdot dt \cdot dV$ , где  $dV$  — элементарный объем  $dV = dx_0 \cdot dy_0 \cdot dz_0$  в области распределенных источников тепла [1]);  $(t-\tau)$  — время распространения тепла, связанного с выделившейся энергией  $dQ$ ;  $(x, y, z)$  — координаты точки тела, в которой определяется температура. В расчете обычно принимают средние значения теплофизических параметров за время нагрева.

Истинная температура в точке  $(x, y, z)$  в момент времени  $t$  будет равна

$$T_I(x, y, z, t) = \Theta_I(x, y, z, t) + T_0 \quad (2)$$

Здесь  $T_0$  — температура окружающей среды (начальные температуры всех точек нагреваемого изделия также равны  $T_0$ ).

Здесь и далее номера цифровых индексов при параметрах температур  $\Theta$  и  $T$  соответствуют номеру определяющей  $\Theta$  формулы.

Переход к новому методу суммирования радиус-векторов в методе источников позволяет сократить расчетное время в 50–60 раз по сравнению с классическим методом.

Рассмотрим решение гипотетической задачи поверхностного нагрева нижнего неограниченного полупространства (немагнитная сталь) прямоугольным высокочастотным индуктором площадью  $XZ$  и длиной  $Z$ , расположенным над полупространством с центром в начале координат (см. рисунок 1). Теплоотвод вверх от полупространства отсутствует.

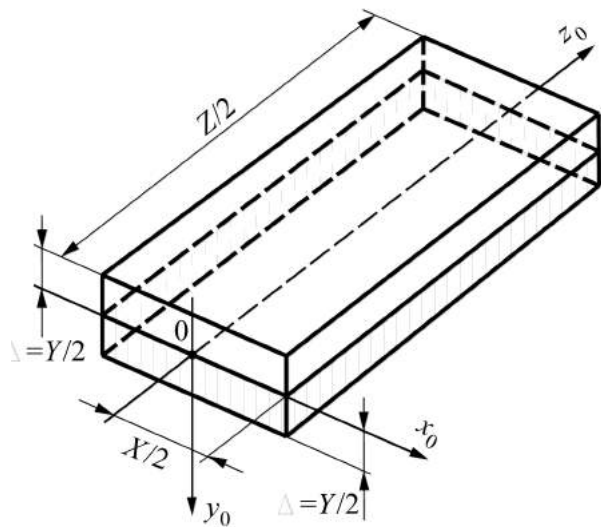


Рисунок 1. Геометрия области с источниками тепла под индуктором (сечение по  $z_0 = 0$ , индуктор не показан)

Размеры высокочастотного индуктора примем равными:  $X=0,1$  м — ширина настила тока;  $Z=0,5$  м — длина. Частота тока индуктора  $f=1,6$  кГц, его угловая частота  $\omega=2\pi f=10^4$  рад/с. Средние значения теплофизических параметров стали равны:  $\lambda=47,14$  Вт/(м·К);  $a=1,05 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с;  $\gamma=7860$  кг/м<sup>3</sup>;  $c=572,5$  Дж/(кг·К). Среднее значение удельного электрического сопротивления стали  $\rho=6,45 \cdot 10^{-7}$  Ом·м.

Глубина проникновения магнитного поля в немагнитную сталь  $\Delta = Y/2 = \sqrt{2\rho/(\omega\mu_0)} = 0,01$  м,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная. Здесь уже учтено зеркальное отражение  $\Delta$  вверх от плоскости  $y_0=0$  для запираания этой границы для потока тепла вверх ( $Y=2\Delta$ ) [1].



Удельная поверхностная мощность тепловоголожения постоянна и равна  $p_s = 600$  кВт/м<sup>2</sup>; эквивалентная, равномерно распределенная по глубине проникновения удельная мощность объемного тепловоголожения  $p_v = 2p_s/Y = 60$  мВт/м<sup>3</sup>; активная мощность индуктора  $P = p_s XZ = p_v XYZ/2 = 30$  кВт; начальная температура  $T_0 = 293$  К; время нагрева  $t = 90$  мин = 5400 с.

Внутренние интегралы в формуле (1) безразмерны и, как показано в работах [1, 4], выражаются через встроенные в MathCAD интегралы вероятности [5]:

$$\int_{-X/2}^{X/2} \frac{e^{-\frac{(x_0-x)^2}{4a(t-\tau)}}}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} dx_0 = \operatorname{erf} \left[ \frac{x + \frac{X}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{x - \frac{X}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] = \operatorname{Erf} (x, X, a, t, \tau); \quad (3)$$

$$\int_{-Y/2}^{Y/2} \frac{e^{-\frac{(y_0-y)^2}{4a(t-\tau)}}}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} dy_0 = \operatorname{erf} \left[ \frac{y + \frac{Y}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{y - \frac{Y}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] = \operatorname{Erf} (y, Y, a, t, \tau); \quad (4)$$

$$\int_{-Z/2}^{Z/2} \frac{e^{-\frac{(z_0-z)^2}{4a(t-\tau)}}}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} dz_0 = \operatorname{erf} \left[ \frac{z + \frac{Z}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{z - \frac{Z}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] = \operatorname{Erf} (z, Z, a, t, \tau). \quad (5)$$

В дальнейшем будем применять краткие обозначения «Erf» вместо разностей интегралов вероятности и везде, где это возможно, переходить от интегрирования к встроенным функциям «erf». Произведя замены в уравнении (1), получим формулу (24) работы [1] и (12) работы [4], дающую приращение температуры в точке  $(x, y, z)$ :

$$\Theta_6(x, y, z, t) = \frac{p_v}{8c\gamma} \int_0^t \operatorname{Erf}(x, X, a, t, \tau) \times \operatorname{Erf}(y, Y, a, t, \tau) \cdot \operatorname{Erf}(z, Z, a, t, \tau) d\tau. \quad (6)$$

Данный интеграл позволяет рассчитывать температуру в процессе нагрева массивного тела (неограниченного полупространства) сверху плоским высокочастотным индуктором, у которого  $Z$  — длина индуктора,  $X$  — ширина настила тока под индуктором,  $Y/2$  — глубина проникновения тока в массивное тело, при отсутствии потерь тепла с поверхности тела в верхнее полупространство на излучение и конвекцию. При этом верхняя половина параллелепипеда с размерами  $X, Y/2, Z$  должна рассматриваться как «зеркальное отражение», которое «запирает» для прохода тепловых потоков верхнюю границу нижнего полупространства и обеспечивает требуемые граничные условия [1]. Реальная активная мощность, передаваемая от индуктора в нижнее полупространство в момент времени  $\tau$ , при этом будет равна  $p_v(\tau) XYZ/2$ .

Вычисление этой функции не связано с взятием четырехкратного интеграла и время вычисления чрезвычайно мало.

Если удельная мощность  $p_v$ , выделяемая в элементе объема, зависит от одной из координат, например  $p_v = p_v(y_0, \tau)$ , то интеграл (1) может быть записан в виде

$$\Theta_7(x, y, z, t) = \frac{1}{8c\gamma} \int_0^t \int_{-Y/2}^{Y/2} \frac{p_v(y_0, \tau) e^{-\frac{(y_0-y)^2}{4a(t-\tau)}}}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} dy_0 \times \operatorname{Erf}(x, X, a, t, \tau) \cdot \operatorname{Erf}(z, Z, a, t, \tau) d\tau. \quad (7)$$

Здесь внутренний интеграл, связанный с  $y_0$ , в общем случае не может быть выражен через интегралы вероятности.

Остановимся более подробно на наиболее часто встречающемся случае индукционного нагрева, когда мощность тепловых источников (потерь от вихревых токов) экспоненциально уменьшается по мере проникновения электромагнитного поля от поверхности в глубь нагреваемого тела.

Зависимость действующего значения плотности вихревых токов от  $y_0$  определяется выражением [6]:

$$J(y_0) = J_0 e^{-\frac{|y_0|}{\Delta}}, \quad (8)$$

где  $J_0 = J(0)$  — плотность вихревых токов на поверхности металла.

Модуль  $|y_0|$  взят для того, чтобы было правильно учтено верхнее зеркальное отражение при расчете процессов нагрева.

Настил мощности под индуктором определяется по формуле [6]:

$$p_s = \rho \cdot \int_0^{\infty} \left( J_0 e^{-\frac{|y|}{\Delta}} \right)^2 dy = \rho J_0^2 \frac{\Delta}{2}. \quad (9)$$

Если величина  $p_s$  задана, то из выражения (9) можно определить величину  $J_0$ :

$$J_0 = \sqrt{\frac{2p_s}{\rho \Delta}}. \quad (10)$$

Например, при  $p_s = 600 \text{ кВт/м}^2$ ,  $\rho = 6,45 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $f = 1,6 \text{ кГц}$  и  $\Delta = 1 \text{ см}$  величина  $J_0 = 1,364 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2$ .

Если учесть, что  $p_s$  есть ни что иное, как среднее за период значение вектора Пойнтинга  $S_{sr}$  на поверхности рассматриваемого полупространства, то можно записать [7]:

$$p_s = S_{sr} = \sqrt{\frac{\rho \omega \mu_0}{2}} \cdot \frac{H_m^2}{2} = \frac{\rho}{\Delta} \cdot \frac{H_m^2}{2}. \quad (11)$$

Здесь  $H_m$  — амплитуда тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности металла. Приравнивая правые части выражений (9) и (11), получим:

$$H_m = \Delta \cdot J_0. \quad (12)$$

Для рассматриваемого примера  $H_m = 1,364 \cdot 10^5 \text{ А/м}$ .

Обозначим через  $w$  количество витков индуктора. Действующее значение ампервитков индуктора в рассматриваемом примере при  $X=0,1 \text{ м}$  равно

$$I \cdot w = X \cdot H_m \cdot \sqrt{2} = 9645 \text{ А}. \quad (13)$$

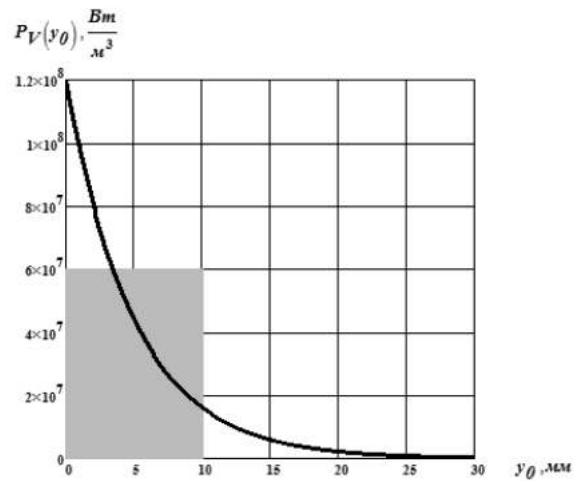
Этой же величине равно действующее значение индуцированного в нагреваемом теле тока. Используя формулу (8), получим

$$p_v(y_0) = \rho J(y_0)^2 = \rho \left( J_0 e^{-\frac{|y_0|}{\Delta}} \right)^2. \quad (14)$$

Зависимость (14) при указанных выше параметрах построена на рисунке 2. Отметим, что настил мощности в металле под индуктором равен площади под кривой на рисунке 2. Используя выражения (9) и (14), найдем интеграл, определяющий удельную поверхностную мощность тепловложения:

$$\int_0^{\infty} p_v(y_0) dy_0 = \frac{\rho J_0^2}{2} \cdot \Delta = p_s. \quad (15)$$

Для рассматриваемого примера  $p_s = 6 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ .



**Рисунок 2.** Экспоненциальное распределение по глубине мощности тепловыделения от вихревых токов под индуктором при:

$$f = 1,6 \text{ кГц}, \Delta = 1 \text{ см}, t = 5400 \text{ с}, p_s = 6 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2, p_v(0) = 1,2 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3, p_v = 6 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^3$$

Так как  $\rho J_0^2/2 = 6 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^3 = p_v$ , то площадь закрашенного прямоугольника равна площади под утолщенной кривой, его ширина равна  $\Delta$ , а высота равна  $p_v$ , и температура при одном и том же настиле мощности может быть рассчитана трояким способом:

1) при точном решении, когда мощность тепловыделения в металле пропорциональна площади под экспоненциальной кривой на рисунке 2;

2) при приближенном решении с использованием модели с равномерным распределением источников тепла ( $p_v = \text{const}$ ) по всему объему, ограниченному глубиной проникновения  $\Delta$ ;

3) при приближенном решении с использованием модели чисто поверхностного нагрева с равномерным распределением поверхностных источников тепла ( $p_s = \text{const}$ ) по поверхности тела под индуктором.

Эти три способа дают различные приближения и требуют использования различных формул.

В случае 1 воспользуемся формулой, аналогичной формуле (7):

$$\Theta_{16}(x, y, z, t) = \frac{1}{8c\gamma} \int_0^t \int_{-n\Delta}^{n\Delta} \frac{p_v(y_0) e^{-\frac{(y_0 - y)^2}{4a(t - \tau)}}}{\sqrt{\pi a(t - \tau)}} dy_0 \times \text{Erf}(x, X, a, t, \tau) \cdot \text{Erf}(z, Z, a, t, \tau) d\tau. \quad (16)$$

Пределы интегрирования  $-n\Delta$  и  $n\Delta$  взяты для убыстрения счета вместо  $-\infty$  и  $\infty$  (на результатах вычислений это не отражается).

Для конкретного примера достаточно принять  $n=3$ , поскольку при больших значениях  $n$  точность вычислений практически не повышается, а время счета увеличивается).

В случае 2 воспользуемся формулой (6) (или формулой (24) работы [1], либо формулой (12) работы [2], при  $p_V = \text{const}$ ).

В случае 3 воспользуемся формулой (29) работы [1], но запишем ее в несколько измененной форме:

$$\Theta_{17}(x, y, z, t) = \frac{p_s}{4c\gamma} \int_0^t e^{-\frac{(y_0 - y)^2}{4a(t-\tau)}} \times \text{Erf}(x, X, a, t, \tau) \cdot \text{Erf}(z, Z, a, t, \tau) d\tau. \quad (17)$$

Время счета по формулам (6) и (17) практически одинаково, а точное решение по формуле (16) требует приблизительно в 50 раз большего времени [4].

Относительная погрешность расчета температуры в % по отношению к точному решению (16):

$$\Delta T_V(x, y, z, t) = \left( \frac{\Theta_6(x, y, z, t) + T_0}{\Theta_{16}(x, y, z, t) + T_0} - 1 \right) \cdot 100\%; \quad (18)$$

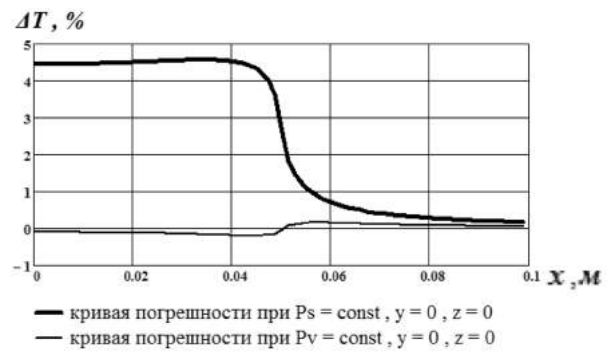
$$\Delta T_S(x, y, z, t) = \left( \frac{\Theta_{17}(x, y, z, t) + T_0}{\Theta_{16}(x, y, z, t) + T_0} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (19)$$

Здесь индекс  $V$  соответствует случаю 2, а индекс  $S$  — случаю 3.

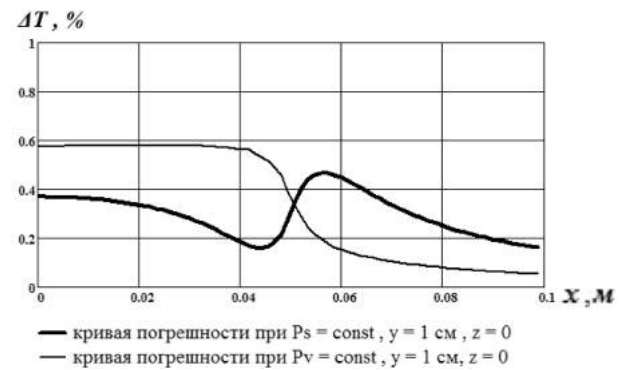
Эти кривые построены на рисунке 3 при  $f=1,6$  кГц и  $\Delta=1$  см для трех различных величин  $y$ : а) на поверхности; б) на глубине проникновения  $\Delta$ ; в) на глубине  $2\Delta$  (температурные кривые подобны кривым, приведенным в работе [1]).

Из анализа рассмотрения кривых следует, что при сравнительно низкой частоте наибольшую погрешность на поверхности (до 4,5 %) дает модель поверхностного нагрева (случай 3), в то время как модель с равномерно распределенной по глубине проникновения объемной удельной мощностью  $p_V = \text{const}$  дает погрешность не более 0,2 %.

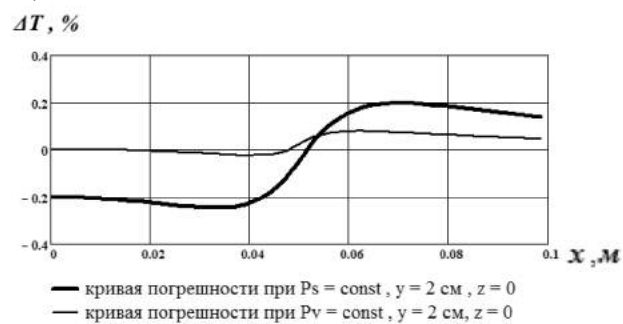
С ростом  $y$  погрешности уменьшаются, поэтому, если нас интересуют температуры вне зоны глубины проникновения, можно использовать все подходы, в зоне с  $y < \Delta$  допустимо применять формулы (16) и (6), по совокупности критериев «быстрота — точность» предпочтение нужно отдать самой простой формуле (6).



а)



б)

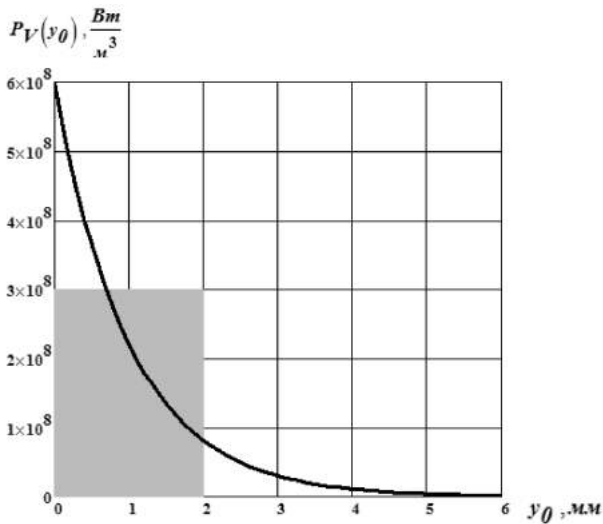


в)

**Рисунок 3.** Погрешности в % при :  $f=1,6$  кГц,  $\Delta=1$  см,  $t=5400$  с,  $p_s=6 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>,  $p_V=6 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>3</sup> при двух различных приближениях к точному решению

При высокой частоте индуктора, когда  $\Delta \leq 2$  мм, и при  $y \gg \Delta$  на первое место выходит формула (17), так как погрешности при переходе к чисто поверхностному нагреву становятся пренебрежимо малыми.

Для пояснения сказанного пересчитаем пример с  $f=1,6$  кГц, приведенный выше, при повышенной частоте индуктора  $f=40$  кГц. Глубина проникновения при этом уменьшается в 5 раз и будет равна  $\Delta=2$  мм (все остальные параметры оставляем неизменными). Согласно формулам (10), (12) и (14), при сохранении того же настила мощности  $6 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> величина  $J_0$  увеличится в  $\sqrt{5}$  раз,  $H_m$  уменьшится в  $\sqrt{5}$  раз, а  $p_V=3 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>3</sup> (случай 2) возрастает в 5 раз. Эти изменения показаны на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Экспоненциальное распределение по глубине мощности тепловыделения от вихревых токов под индуктором при:  
 $f = 40$  кГц,  $\Delta = 2$  см,  $t = 5400$  с,  $p_s = 6 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>,  
 $p_V(0) = 6 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>3</sup>,  $p_V = 3 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>3</sup>

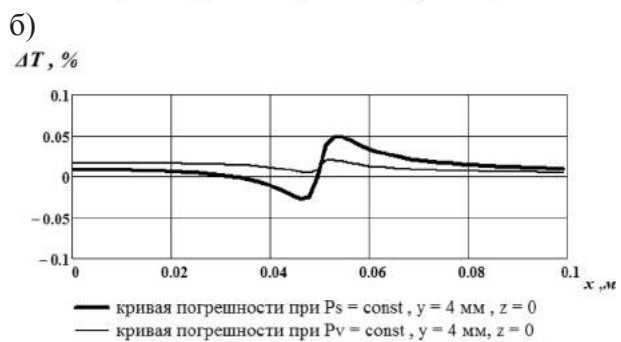
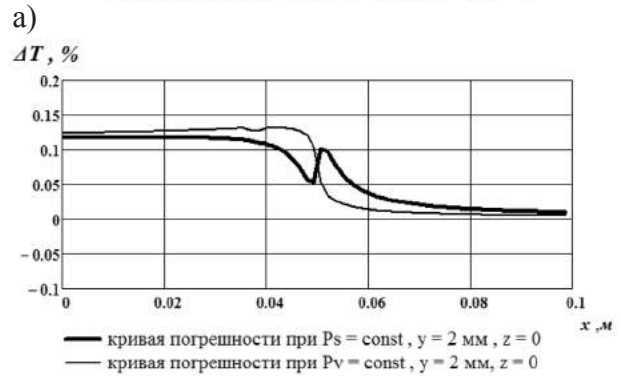
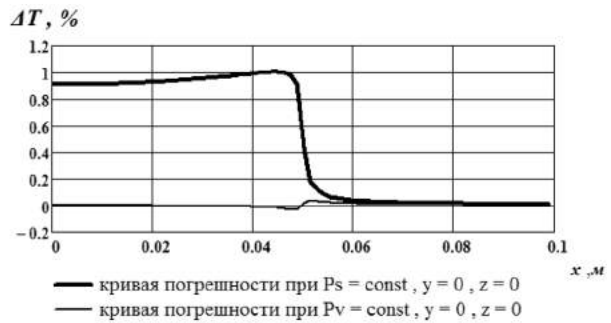
Несмотря на кажущееся подобие геометрии на рисунках 4 и 2, подобия тепловых процессов не наблюдается. Об этом говорит и характер кривых погрешности, построенных на рисунке 5 при  $f = 40$  кГц и  $\Delta = 2$  мм для трех различных величин  $y$ : а) на поверхности; б) на глубине проникновения  $\Delta$ ; в) на глубине  $2\Delta$ .

При повышенной частоте 40 кГц на поверхности при  $y = 0$  погрешность при модели с чисто поверхностным нагревом (утолщенные кривые) хотя и уменьшается по сравнению со случаем 1,6 кГц, но остаётся самой большой (порядка 1 %).

При частотах 1,6 кГц и 40 кГц на поверхности при  $y = 0$  меньшую погрешность дает модель с равномерно распределенной по глубине проникновения объемной удельной мощностью. Причем, при  $y > \Delta$  уровни рассматриваемых погрешностей конкурируют друг с другом и при  $y > 2\Delta$  становятся пренебрежимо малыми.

При расчете температурных кривых суммарные тепловложения во всех случаях принимались одинаковыми и равными  $p_s = 6 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>.

Погрешности были вычислены для истинной температуры  $T(x, y, z, t) = \Theta(x, y, z, t) + T_0$ . При этом максимальная погрешность вычислений не превышает 0,6 % для модели с равномерно распределенной по глубине проникновения объемной удельной мощностью.



**Рисунок 5.** Погрешности в % при:  
 $f = 40$  кГц,  $\Delta = 2$  см,  $t = 5400$  с,  $p_s = 6 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>,  
 $p_V = 3 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>3</sup> при двух различных приближениях к точному решению

Если такая погрешность не устраивает, то всегда можно перейти к точному решению.

*Авторы признательны кандидату физико-математических наук Всеволоду Игоревичу Пентегову за высказанные им замечания при просмотре статьи.*

**Выводы**

1. Использование модернизированного метода тепловых источников, базирующегося на новом методе суммирования радиус-векторов, при расчете тепловых процессов при индукционном нагреве позволяет получать как точные решения, требующие большого времени счета, так и приближенные решения с малым временем счета.



2. Проведено сравнение точности расчетов тепловых процессов при индукционном нагреве при различных модификациях метода тепловых источников. На примере пакета MathCAD даны рекомендации по использованию встроенных в программные продукты функций «erf», позволяющие отказаться от явных функций интегрирования и резко сократить время счета.

3. Рассчитаны относительные погрешности, получаемые при приближенном решении с использованием модели с равномерным распределением источников тепла по всему объему, ограниченному глубиной проникно-

вения, и при приближенном решении с использованием модели чисто поверхностного нагрева с равномерным распределением поверхностных источников тепла по поверхности тела под индуктором, по сравнению с точным решением при различных рабочих частотах индуктора.

4. Даны рекомендации по уменьшению погрешностей до приемлемого уровня. Показано, что при оптимальном выборе расчетной модели погрешность вычислений не будет превышать 0,6 %. Если такая погрешность не устраивает, то всегда можно перейти к точному решению.

### Список литературы

1. Пентегов И.В. К теории метода тепловых источников, используемого при анализе тепловых процессов в электротехнических системах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 3. С. 5–15.
2. Fourier J.B. Théorie analytique de la chaleur. Paris: Chez Firmin Didot, père et fils, 1822. 639 p.
3. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: машгиз, 1951. 297 с.
4. Пентегов И.В., Рымар С.В. Практическое применение метода тепловых источников при анализе тепловых процессов в электротехнических системах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12. № 3. С. 11–17.
5. Кирьянов Д.В. MathCAD 14. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 704 с.
6. Ламмеранер Й., Штафль М. Вихревые токи: пер. с чешск. М.-Л.: Энергия, 1967. 208 с.
7. Теоретические основы электротехники: в 3 т.: учебник для вузов. 4-е изд. / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. СПб.: Питер, 2003. Т. 3. 377 с.

### References

1. Pentegov I.V. K teorii metoda teplovykh istochnikov, ispol'zuemogo pri analize teplovykh protsessov v elektrotekhnicheskikh sistemakh // Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. 2014. T. 10. № 3. S. 5–15.
2. Fourier J.B. Théorie analytique de la chaleur. Paris: Chez Firmin Didot, père et fils, 1822. 639 p.
3. Rykalin N.N. Raschety teplovykh protsessov pri svarke. M.: Mashgiz, 1951. 297 s.
4. Pentegov I.V., Rymar S.V. Prakticheskoe primeneniye metoda teplovykh istochnikov pri analize teplovykh protsessov v elektrotekhnicheskikh sistemakh // Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. 2016. T. 12. № 3. S. 11–17.
5. Kir'ianov D.V. MathCAD 14. SPb.: BKhV-Peterburg, 2007. 704 s.
6. Lammeraner I., Shtafli' M. Vikhrevye toki: per. s cheshsk. M.-L.: Energiia, 1967. 208 s.
7. Demirchian K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: v 3 t.: uchebnik dlia vuzov. 4-e izd. SPb.: Piter, 2003. T. 3. 377 s.



***Аипов Р. С.***  
***Aipov R. S.***

*доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Электрические  
машины и электрооборудование»,  
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный  
аграрный университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*



***Валишин Д. Е.***  
***Valishin D. E.***

*старший преподаватель кафедры  
«Электрические машины  
и электрооборудование»,  
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный  
аграрный университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 621.65

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ПРИВОДА ПЛУНЖЕРНОГО НАСОСА С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ КОММУТАЦИЕЙ ФАЗЫ ИСТОЧНИКА ТРЕХФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Несомненным достоинством плунжерных насосов являются высокий КПД, независимость производительности от развиваемого напора, т.е. возможность подачи небольшого количества жидкости под сколь угодно высоким давлением. Также преимуществом плунжерных насосов является возможность самовсасывания без необходимости заливки всасывающего трубопровода и рабочего цилиндра перекачиваемой жидкостью.

Плунжерные насосы обладают, одновременно, рядом значительных недостатков, сильно ограничивающих область их применения. К их числу относятся: массивность; большая металлоемкость и значительная цена; неравномерность подачи, обусловленная принципом действия; большая занимаемая площадь (сам насос, электродвигатель и промежуточная передача между насосом и двигателем).

Уменьшения металлоёмкости, расширения возможностей регулирования подачи, увеличения надежности, снижения стоимости плунжерных насосов можно добиться применением цилиндрического линейного асинхронного двигателя (ЦЛАД) в приводе, что позволяет получить непосредственно поступательное движение, без промежуточной передачи между плунжерным насосом и электродвигателем.

Разработка конструкций плунжерных насосов с ЦЛАД, а также решение проблем частых коммутаций двигателя, работающего в импульсном режиме, остаются актуальной задачей, для решения которой необходимо провести исследования и определить возможности повышения их показателей за счет рационального управления и выбора частоты импульсного питания.

Постоянная работа в режиме включения-выключения негативно сказывается на самом двигателе. Поэтому для облегчения работы ЦЛАД предлагается применение неполнофазного режима работы: только одна фаза двигателя периодически отключается от источника питания, две оставшиеся фазы остаются подключёнными к источнику питания.

В статье рассматривается математическая модель плунжерного насоса с ЦЛАД в приводе с периодической коммутацией одной фазы.

**Ключевые слова:** плунжерный насос, цилиндрический линейный асинхронный двигатель (ЦЛАД), линейный электропривод, неполнофазный режим, математическая модель, переходной процесс, уравнения движения плунжера, КПД плунжерного насоса с ЦЛАД, Matlab Simulink.

## MATHEMATICAL MODEL OF LINEAR INDUCTION DRIVE PLUNGER PUMP WITH PERIODIC SWITCHING PHASES OF THREE-PHASE VOLTAGE SOURCE

The undoubted advantages of piston pumps are high efficiency, independence of performance from developed pressure, i.e. the ability to supply small quantities of fluid under arbitrarily high pressure. Also has the advantage that the piston pump is self-suction ability without the need to fill the suction line and the master cylinder for the fluid.

Plunger pumps have, simultaneously, a number of significant shortcomings, severely limiting their application. This includes: massive, high metal consumption and significant cost, uneven supply due to the principle of action; large footprint (the pump itself, the motor and the intermediate transmission between the pump and the engine).

The reduction of metal consumption, empowerment of feed control, increased reliability, lower cost piston pumps can be achieved by application cylindrical linear induction motor (CLIM) in the actuator. This allows to obtain directly the translational motion, without intermediate transfers between the plunger pump and motor. As the main advantages of linear induction motor is simplicity, manufacturability, low cost, reliability and a large number of constructive solutions.

Development of construction of plunger pumps for CLIM and solution to the problems of frequent switching of the engine operating in a pulse mode, remains an urgent task for which you want to conduct research and identify opportunities to improve performance through rational control and frequency selection switching supply.

Continuous work in a mode on-off, that is, transient conditions have a negative impact on the engine itself. Therefore, to facilitate the work CLIM is the use of open-phase mode of operation. Only one phase of the motor is periodically disconnected from the power source, the remaining two phases remain connected to the power source permanently. CLIM pump periodically from the three-phase mode of operation translates into a two-phase, thereby reducing inrush currents and improving power characteristics.

The article deals with mathematical model of piston pump with a cylindrical linear induction motor in the drive, the model is composed based on the differential equations of motion of the plunger.

**Key words:** plunger pump, cylindrical linear induction motor (CLIM), linear actuator, open-phase operating conditions, mathematical model, transient process, the equations of motion of the piston, the efficiency piston pump with CLIM, Matlab Simulink.

В плунжерном насосе с цилиндрическим линейным асинхронным двигателем (ЦЛАД) в приводе [1], с учетом специфики работы плунжера, рациональным является при движении плунжера в скважину коммутация только одной фазы источника трехфазного напряжения. При такой организации работы привода уменьшаются пусковые токи, повышается надежность работы двигателя. В работе [2] рассматриваются кинематическая схема насоса с ЦЛАД [3] и подход к математическому моделированию работы ЦЛАД без учета динамических сил, действующих в приводе.

В приводе с ЦЛАД плунжерного насоса присутствуют следующие основные факторы:

— силы, развиваемые двигателем при трехфазном и двухфазном питании;

— масса плунжера;

— масса поднимаемой жидкости в трубопроводе;

— гидравлические потери в нагнетательном трубопроводе;

— трение подвижных частей насоса.

Наибольшее значение на работу ЦЛАД в приводе плунжерного насоса оказывает динамическая составляющая силы, требуемая для разгона столба воды в нагнетаемом трубопроводе, до скорости движения воды по трубопроводу. В отличие от обычных насосов центробежного действия, в которых разгон происходит на начальном этапе работы насоса, а затем происходит лишь поддержание скорости, в плунжерном насосе скорость в трубе будет меняться от полной остановки

до установившейся скорости с каждым новым рабочим ходом плунжера. Механическая энергия, потребляемая на разгон столба воды, компенсируется упругими элементами и также запасенной кинетической энергией. При этом энергетические характеристики ЦЛАД снижаются вследствие того, что на участке разгона двигатель имеет низкие энергетические показатели [4]. Скорость движения воды в трубопроводе намного ниже скорости движения плунжера и прямо пропорциональна отношению сечения плунжера к сечению нагнетательного трубопровода. Для простоты в уравнениях динамики можно принять, что движение воды происходит в трубопроводе с таким же сечением, что и сечение плунжера и, соответственно, с такой же скоростью.

Для математического моделирования работы ЦЛАД в приводе насоса примем режим одинарного действия. В этом случае на установку будет влиять усилие, определяемое массой нагнетаемой воды, поднимаемой насосом при движении плунжера вверх  $m_g$ .

Для математического моделирования работы плунжерного насоса с ЦЛАД в приводе выберем режим одинарного действия. В этом случае на плунжерный насос будет влиять усилие, выраженное через массу столба жидкости, поднимаемую насосом при движении плунжера вверх  $m_g$ :

$$m_g = H \cdot F \cdot \rho, \quad (1)$$

где  $H$  — высота подъема воды;  
 $F$  — площадь сечения плунжера;  
 $\rho$  — плотность поднимаемой жидкости.

Опишем работу плунжерного насоса. Для этого воспользуемся уравнениями механического движения. Основным значением является зависимость силы от скорости, развиваемой ЦЛАД. Начало координат и направление каждой стадии движения плунжера принимается от крайних положений плунжера (ротора) ЦЛАД (с амплитудой  $-1$ ). Начальное значение времени для прямого (вверх) и обратного (вниз) движения плунжера берется индивидуальным. Переключение ЦЛАД производится по сигналам от конечных выключателей, установленных в точках  $X_{к1}$  и  $X_{к2}$  насоса по необходимой амплитуде движения плунжера. На основании изложенного можно

записать систему дифференциальных уравнений движения плунжера:

$$\begin{cases} Fdv(v) - m_a - F_{всас}(v) - F_{внутр}(v) - m_0 \cdot g + F_{упруг} = \\ = (m_0 + m_g) \cdot \frac{dv}{dt}; \\ F'dv(v') - F_{внутр}(v') + m_0 \cdot g + F_{упруг} = m_0 \cdot \frac{dv'}{dt}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $Fdv(v)$  — зависимость развиваемого усилия ЦЛАД от скорости при полнофазном режиме [2];

$F'dv(v)$  — усилие ЦЛАД при неполнофазном режиме [2];

$F_{всас}(v)$  — сопротивление при всасывании в камеру насоса;

$F_{труб}(v)$  — характеристика сопротивления в нагнетаемом трубопроводе;

$F_{внутр}(v)$  — характеристика внутреннего сопротивления ЦЛАД и насоса;

$F_{упруг}$  — характеристика упругого накопителя механической энергии;

$v$  — скорость плунжера при полнофазном режиме;

$v'$  — скорость плунжера при неполнофазном режиме;

$m_0$  — масса подвижных частей насосного агрегата без массы вытесняемой жидкости;

$m_g$  — масса нагнетаемой воды в нагнетательном трубопроводе;

$g$  — ускорение свободного падения.

Решение дифференциальных уравнений приводит к определению временных зависимостей скорости при прямом и обратном ходах плунжера:  $v(t)$  и  $v'(t)$ .

Зависимость перемещения плунжера от времени находится при прямом и обратном ходах следующим образом:

$$\begin{cases} x_1(t) = \int_0^t v(t) dt + x_{к1}; \\ x_2(t) = \int_0^t v'(t) dt + x_{к2}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  — координаты начального положения при прямом и обратном ходах плунжера.

При наступлении координаты  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  до положения конечных выключателей система управления дает команду ЦЛАД на движение плунжера в обратном направлении.

Время отключения и включения одной фазы для этих уравнений находится по следующим условиям:

$$\begin{cases} x_1(t_{откл}) = l - x_{откл}; \\ x_2(t'_{вкл}) = l - x'_{вкл}. \end{cases} \quad (4)$$



Далее находим время полной остановки двигателя из следующих условий:

$$\begin{cases} v_{откл}(t_{ост} - t_{откл}) = 0; \\ v'_{вкл}(t'_{ост} - t'_{вкл}) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Значения  $t_{ост}$  и  $t'_{ост}$  отсчитываются от начала движения плунжера, в то время как для  $v_{откл}$  и  $v'_{откл}$  начало отсчета времени идет от начала переключения с трехфазного режима питания на двухфазный.

Скорость двигателя и текущие координаты на участках после переключения (выбега) — ( $t_{откл} < t_{ост}$  и  $t'_{вкл} < t'_{ост}$ ) определяются по формулам:

$$\begin{cases} v(t) = v_{откл}(t - t_{откл}); \\ v'(t) = v'_{вкл}(t - t'_{вкл}); \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_1(t) = \int_{t_{откл}}^{t_{ост}} v(t) dt + x_{откл}; \\ x_2(t) = \int_{t'_{откл}}^{t'_{ост}} v'(t) dt + x'_{вкл}. \end{cases} \quad (7)$$

По координатам остановки плунжера рассчитываются начальные координаты положения для последующих циклов хода:

$$\begin{cases} x_{H2} = \int_{t_{откл}}^{t_{ост}} v(t) dt + x_{откл}; \\ x_{H1} = \int_{t'_{откл}}^{t'_{ост}} v'(t) dt + x'_{вкл}. \end{cases} \quad (8)$$

Для определения средних потерь за цикл хода воспользуемся зависимостью потерь в индукторе и вторичном элементе от скорости движения  $\Delta P_{инд}(v)$  и  $\Delta P_{втор}(v)$ :

$$\begin{cases} \Delta P1 = \frac{\int_0^{t_{ост}} \Delta P_{инд}(v) dt + \int_0^{t'_{ост}} \Delta P_{инд}(v') dt}{t_{ост} + t'_{ост}}; \\ \Delta P2 = \frac{\int_0^{t_{ост}} \Delta P_{втор}(v) dt + \int_0^{t'_{ост}} \Delta P_{втор}(v') dt}{t_{ост} + t'_{ост}}. \end{cases} \quad (9)$$

Для определения энергетических показателей работы ЦЛАД и плунжерного насоса необходимо определить средние значения полезной и потребляемой (активной и полной) энергии за один цикл:

$$\begin{cases} W1 = \int_0^{t_{ост}} P1(v) dt + \int_0^{t'_{ост}} P1(v') dt; \\ W2 = \int_0^{t_{ост}} P2(v) dt + \int_0^{t'_{ост}} P2(v') dt; \\ Ws = \int_0^{t_{ост}} S(v) dt + \int_0^{t'_{ост}} S(v') dt, \end{cases} \quad (10)$$

где  $P2(v)$  и  $P1(v)$  — потребляемая активная мощность;

$S(v)$  — потребляемая полная мощность.

Суммарный КПД электродвигателя:

$$\eta_{де} = \frac{W2}{W1}. \quad (11)$$

Суммарный коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = \frac{W2}{Ws}. \quad (12)$$

Для определения полного КПД насосной установки необходимо учесть потери в трубопроводе, насосе и потери на всасывание жидкости. Полезную энергию можно определить как работу, выполненную по перемещению столба пластовой жидкости:

$$W2_{пол} = m \cdot g \cdot l. \quad (13)$$

Полный КПД установки получим:

$$\eta_{пол} = \frac{W2_{пол}}{W1}. \quad (14)$$

Для оценки производительности установки рассчитаем максимальный суточный объем выкачиваемой пластовой жидкости.

Определим объем выкачиваемой жидкости за один цикл работы насоса:

$$V_{цикла} = Sn \cdot l. \quad (15)$$

Количество циклов за одну минуту определим по формуле:

$$N_{циклов} = \frac{60}{t_{ост} + t'_{ост}}. \quad (16)$$

Суточная производительность насоса составит ( $\text{м}^3/\text{сут}$ ):

$$Q_{сут} = V_{цикла} \cdot N_{циклов} \cdot 60 \cdot 24. \quad (17)$$

Для оценки энергетической эффективности определим энергопотребление на  $1 \text{ м}^3$  выкачиваемой жидкости.

Количество активной электроэнергии на  $1 \text{ м}^3$  выкачиваемой жидкости ( $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ ):

$$\mathcal{E}_{активн} = \frac{W1}{V_{цикла} \cdot 1000 \cdot 3600}. \quad (18)$$

И количество полной электроэнергии, потребляемой на  $1 \text{ м}^3$  выкачиваемой жидкости, ( $\text{кВА} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ ):

$$\mathcal{E}_{полн} = \frac{S1}{V_{цикла} \cdot 1000 \cdot 3600}. \quad (19)$$

Наличие многократного интегрирования в уравнениях (1)–(19) предусматривает значительную нелинейность рассматриваемой задачи. Для решения принята программа Simulink — приложение к пакету Matlab [5, 6].

Основное окно математической модели плунжерного насоса с ЦЛАД в приложении Matlab Simulink представлено на рисунке 1. В нем расположены блоки, реализующие систему уравнений (2), и модули подсистем:

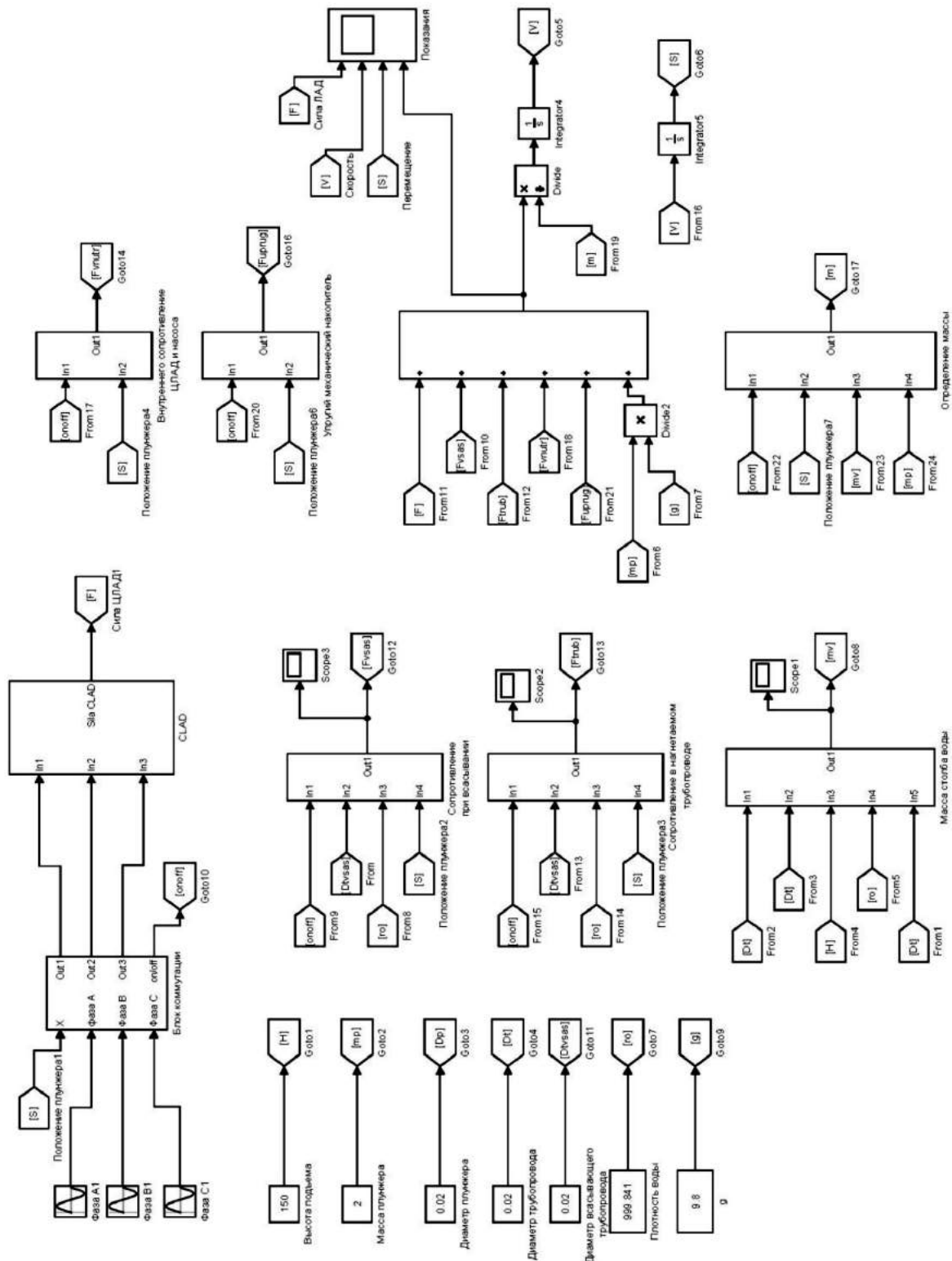


Рисунок 1. Вид математической модели плунжерного насоса с ЦЛАД в среде Matlab Simulink

блок коммутации, ЦЛАД, внутреннее сопротивление ЦЛАД и насоса, сопротивление при всасывании, сопротивление в нагнетательном трубопроводе, упругий механический накопитель, массу столба воды.

Постоянными параметрами являются следующие: высота скважины —  $H$ ; масса плун-

жера —  $m_p$ ; диаметр плунжера —  $D_p$ ; диаметр трубопровода —  $D_t$ ; диаметр всасывающего трубопровода —  $D_{tvsas}$ ; плотность воды —  $\rho_0$ ; полюсное деление —  $\tau$ ; синхронная скорость —  $V_0$  и параметры схемы замещения ЦЛАД.

Моменты включения и отключения ЦЛАД, согласно начальным условиям, задаются в блоке коммутации (подсистема), окно которой показано на рисунке 2 [7]. На входе подсистемы три фазы питания синусоидального вида и координата положения плунжера. Установка координат конечных выключателей производится с помощью блока Relay, настройки которого представлены на рисунке 3 (на примере координат конечных выключателей, которые имеют значения  $X_{k1} = 0,3$  м,  $X_{k2} = 0,1$  м).

Расчет силы тяги линейного двигателя  $F_{\text{ЛАД}}$  и токов производится в блоке «CLAD», расчет электрических и механических мощ-

ностей основных электрических величин:  $P_1$ ,  $Q_1$ ,  $P_{\text{инд}}$ ,  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  согласно математической модели проводится также, в этой же подсистеме. Зависимость силы упругости накопителей механической энергии в  $F_{\text{упруг}}$  по формулам рассчитывает подсистема «Упругий механический накопитель», сила сопротивления при всасывании  $F_{\text{всас}}$  рассчитывается в блоке «Сопротивление при всасывании», сила сопротивления в нагнетаемом трубопроводе  $F_{\text{труб}}$  — в блоке «Сопротивление в нагнетаемом трубопроводе»; характеристика внутреннего сопротивления ЦЛАД и насоса описывается блоком «Внутреннее сопротивление ЦЛАД и насоса». Представленная

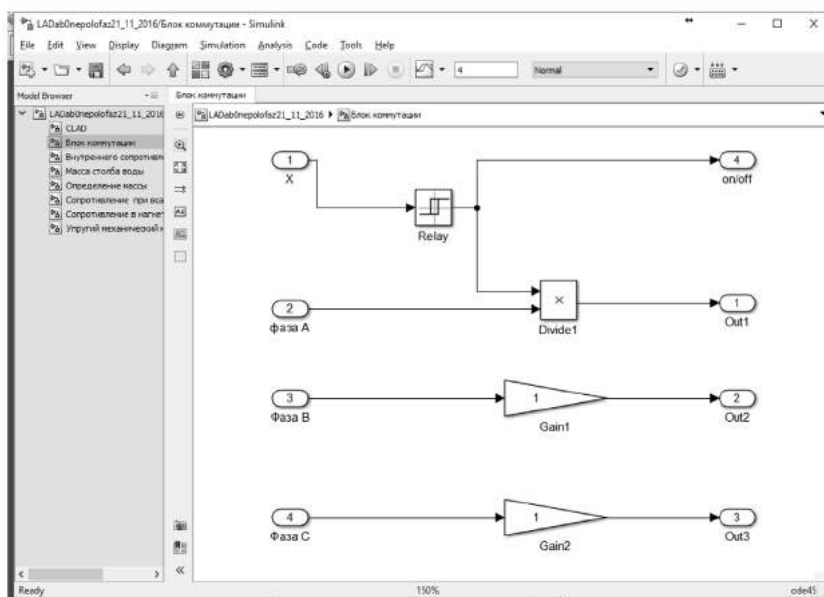


Рисунок 2. Окно блока коммутации

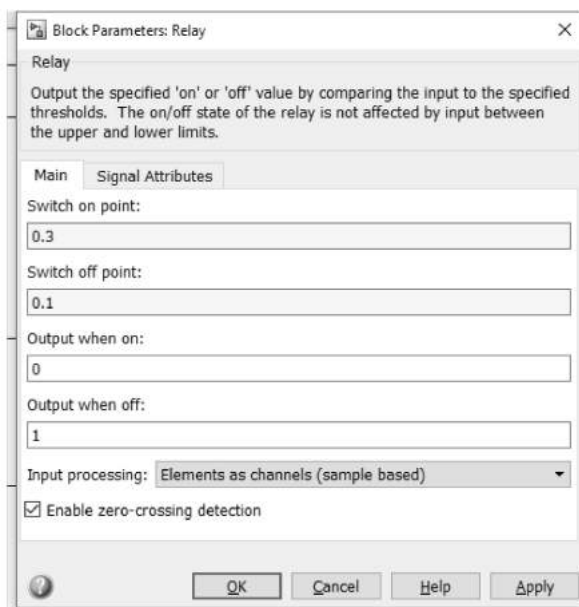
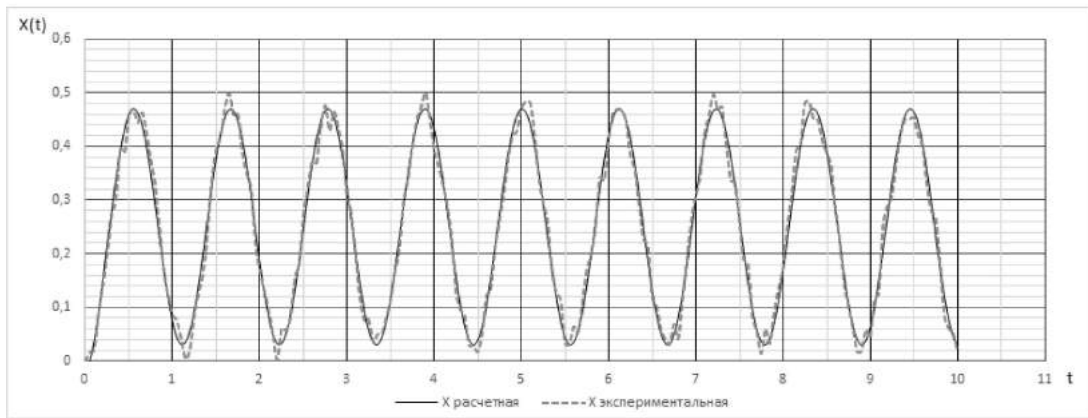


Рисунок 3. Окно блока включения-отключения неполнофазного режима



**Рисунок 4.** График движения плунжера от времени (эксперименты проводились при следующих условиях: диаметр плунжера-ротора  $D_p = 20$  мм; ход плунжера  $l = 0,45$  м, параметры питания  $U = 220$  В,  $f = 50$  Гц)

электромеханическая модель рассчитывает временные зависимости всех переменных, входящих в (1)–(19). Оценку адекватности работы плунжерного насоса можно произвести по смоделированным временным зависимостям перемещения плунжера (рисунок 4).

Проведенные исследования математической модели плунжерного насоса с ЦЛАД показывают хорошую сходимость с результатами исследования на экспериментальной лабораторной установке. Сопоставление теоретических и экспериментальных зависимостей показало, что их расхождение не превышает 5 %, что позволяет считать ее адекватно отражающей физические процессы.

Исследуя математическую модель плунжерного насоса с цилиндрическим линейным

асинхронным электроприводом можно подобрать параметры, при которых будет достигаться рациональные соотношения потребления электроэнергии, КПД, расхода, напора, амплитуды колебаний и мощности ЦЛАД.

### Выводы

Разработана математическая модель электропривода плунжерного насоса с ЦЛАД.

Разработана и реализована в среде объектно-визуального моделирования Matlab (приложение Simulink) математическая модель плунжерного насоса, позволяющая исследовать взаимосвязи в приводе с учетом электромеханических переходных процессов ЦЛАД, работающего в неполнофазном режиме.

### Список литературы

1. Пат. 2578746 Российская Федерация, МПК F 04 В 47/06, F 04 В 17/04. Насосная установка / Р.С. Аипов, Д.Е. Валишин, Д.С. Леонтьев (RU). 2015106455/06; заявл. 25.02.2015; опубл. 27.03.2016. Бюл. № 9.

2. Аипов Р.С., Валишин Д.Е., Леонтьев Д.С. Математическая модель плунжерного насоса с цилиндрическим линейным асинхронным двигателем в приводе // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. Краснодар: КубГАУ, 2014. № 02 (096). IDA [article ID]: 0961401040. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2014/02/pdf/40.pdf>.

3. Пат. 2370671 Российская Федерация, МПК F 04 В 47/06. Насосная установка / Р.С. Аипов, В.Ф. Гильванов, Д.С. Леонтьев, А.В. Линенко (RU). 2008130485/06; заявл. 22.07.2008; опубл. 20.10.2009, Бюл. № 29. 4 с.

4. Валишин Д.Е. Плунжерный насос повышенной эффективности с линейным электродвигателем // Отопление. Водоснабжение. Кондиционирование: матер. III Междунар. науч.-практ. конф. в рамках XIX специализир. выставки «Отопление. Водоснабжение. Кондиционирование». Уфа: БГАУ, 2015. С. 36–39.

5. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с.



6. Линенко А.В. Линейные асинхронные электроприводы сложного колебательного движения для технологических машин АПК. Уфа: БашГАУ, 2015. 184 с.

7. Аипов Р.С., Акчурин С.В., Пугачев В.В. Математическая модель вибропривода с линейным асинхронным двигателем // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. Т. 11. № 1. С. 58–63.

### References

1. Pat. 2578746 Rossijskaja Federacija, MPK F 04 B 47/06, F 04 B 17/04. Nasosnaja ustanovka / R.S. Aipov, D.E. Valishin, D.S. Leont'ev (RU). 2015106455/06; zajavl. 25.02.2015; opubl. 27.03.2016. Bjul. № 9.

2. Aipov R.S., Valishin D.E., Leont'ev D.S. Matematicheskaja model' plunzhernogo nasosa s cilindricheskim linejnym asinhronnym dvigatelem v privode // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. Krasnodar: KubGAU, 2014. № 02 (096). IDA [article ID]: 0961401040. Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2014/02/pdf/40.pdf>.

3. Pat. 2370671 Rossijskaja Federacija, MPK F 04 V 47/06. Nasosnaja ustanovka / R.S. Aipov, V.F. Gil'vanov, D.S. Leont'ev,

A.V. Linenko (RU). 2008130485/06; zajavl. 22.07.2008; opubl. 20.10.2009. Bjul. № 29. 4 s.

4. Valishin D.E. Plunzhernyj nasos povyshennoj jeffektivnosti s linejnym jelektrodvigatelem // Otoplenie. Vodosnabzhenie. Kondicionirovanie: mater. III mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkah XIX specializir. vystavki «Otoplenie. Vodosnabzhenie. Kondicionirovanie». Ufa: BGAU, 2015. S. 36–39.

5. Chernyh I.V. Modelirovanie jelektrotehnicheskikh ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink. M.: DMK Press, 2007. 288 s.

6. Linenko A.V. Linejnye asinhronnye jelektroprivody slozhnogo kolebatel'nogo dvizhenija dlja tehnologicheskikh mashin APK. Ufa: BashGAU, 2015. 184 s.

7. Aipov R.S., Akchurin S.V., Pugachev V.V. Matematicheskaja model' vibroprivoda s linejnym asinhronnym dvigatelem // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2015. Т. 11. № 1. С. 58–63.



**Кольцов А. В.**  
**Koltsov A. V.**

генеральный директор  
Филиала ПАО «ФСК ЕЭС»  
— Центр технического  
надзора, г. Москва,  
Российская Федерация



**Ковтун Г. Н.**  
**Kovtun G. N.**

первый заместитель  
генерального директора —  
главный инженер Филиала  
ПАО «ФСК ЕЭС» — МЭС  
Юга, г. Железноводск,  
Российская Федерация



**Горюшин Ю. А.**  
**Goryushin Y. A.**

главный эксперт  
Департамента  
инновационного развития,  
ПАО «ФСК ЕЭС», г. Москва,  
Российская Федерация



**Жернаков Ю. В.**  
**Zhernakov Y. V.**

заместитель директора  
ООО «НПП «ППТ»,  
г. Снежинск,  
Российская Федерация



**Салихзянов Р. М.**  
**Salihzyanov R. M.**

главный специалист отдела  
линий электропередачи  
Филиала АО «НТЦ ФСК  
ЕЭС» — СибНИИЭ,  
г. Новосибирск,  
Российская Федерация



**Лебедев И. А.**  
**Lebedev I. A.**

кандидат технических наук,  
начальник отдела новых  
технологий Филиала  
АО «НТЦ ФСК ЕЭС» —  
СибНИИЭ, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

УДК 621.315.175

## НОВЫЕ РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ПЛАВКИ ГОЛОЛЕДА НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ 220 И 330 КВ

Правила устройства электроустановок рекомендуют применение плавки гололеда на проводах линии электропередачи в районах с толщиной стенки гололеда 25 мм и более, а также в районах с частыми образованиями гололеда или изморози в сочетании с сильными ветрами и в районах с частой и интенсивной пляской проводов. Для проведения плавки гололеда необходимо организовать контур плавки, в определенных случаях это требуется сделать на самой линии электропередачи: в средней части или при заходе на подстанцию. Сегодня эти вопросы решаются с применением закорачивающих распределительных пунктов, что требует высоких финансовых затрат, или временных набрасываемых для закоротки проводниках, что не является достаточно надежным и безопасным решением. Цель разработки — создать устройство, позволяющее выполнять организацию контура плавки надежно и безопасно, а также без привлечения значительных финансовых вливаний. Для достижения поставленной цели рассмотрены различные варианты конструкций и элементов,

позволяющих реализовать необходимый функционал и отвечающих предъявленным требованиям.

В результате разработан линейный комплекс коммутационных аппаратов для размещения на опорах линий электропередачи 220 и 330 кВ, позволяющий управлять входящими в устройство разъединителями без подъема на опору за счет имеющейся системы питания при помощи выносного блока управления. Кроме того, устройство имеет систему самодиагностики, позволяющую оценивать состояние линейного комплекса коммутационных аппаратов удаленно. Предлагаемое решение по использованию разъединителей с увеличенным расстоянием между ножами позволило сократить их количество с трех до двух для одноцепной линии электропередач. Разработанная многоуровневая защита от несанкционированного доступа, заключающаяся в размещении оборудования на высоте, в применении антивандальных термощкафов и защитных ограждений, обеспечивает необходимый уровень безопасности линейного комплекса коммутационных аппаратов от вмешательства третьих лиц.

Разработанный линейный комплекс коммутационных аппаратов является надежным и безопасным решением задачи по организации контура плавки гололеда без существенных финансовых затрат, если такая задача должна быть решена за пределами подстанции.

**Ключевые слова:** воздушные линии электропередачи, плавка гололеда, закорачивающий пункт, линейный комплекс коммутационных аппаратов, защита от несанкционированного доступа.

## NEW ICE-MELTING SOLUTIONS FOR 220 AND 330 KV AC OVERHEAD TRANSMISSION LINES

Electrical Installation Regulations recommend the use of ice melting on wires of power lines in areas with a wall thickness of ice of 25 mm or more, as well as in areas with frequent formations of ice or frost in combination with strong winds and areas with frequent and intense wires' dancing. For ice-melting it is necessary to organize a circuit and in certain cases, for powerful lines it is required to short-circuit overhead transmission lines in the middle or at the entry to the substation. Today these problems are solved with help of shorting distribution stations that require high financial investments, or with help of temporary jumper wires that is not sufficiently reliable and safe. Purpose of discussed development is to create short-circuit device that will allow to carry out ice-melting safely and surely without involvement of significant financial investments. Various options for structures and elements that allow to implement the required functionality and to meet the required specification are considered to achieve this goal.

A linear complex of switching devices with remote control option is developed. The complex is placed on poles of 220 and 330 kV AC power lines. The device has a self-diagnostic system that allows assessing the state of linear complex of switching devices remotely. Number of circuit-breakers has been reduced from three to two for single-circuit transmission line due to increased distance between blades. Multi-level protection system from unauthorized access include placing equipment at altitude, using of vandal-resistant boxes and protective guards, and provide necessary level of security for the linear complex of switching devices.

Designed linear complex of switching devices is reliable and safe solution for ice-melting circuit arrangement outside a substation without significant investment.

**Key words:** overhead transmission lines, ice-melting, short-circuit station, linear complex of switching devices, protection against unauthorized access.

### Введение

Воздушные линии электропередачи (ВЛ) являются наиболее протяженным объектом энергетической системы. В их составе находится множество однотипных элементов, от надежного функционирования которых зависит

работоспособность линии в целом. Согласно [1], за одиннадцатилетний период с 1997 по 2007 гг. 17,5 % технологических нарушений в работе ВЛ произошло из-за воздействия гололеда и ветра. На проводах нарастают ледяные муфты диаметром до 70 мм и весом

до 20–40 т/км, что в 10–20 раз превышает обычный вес. Это приводит к провисанию, обрыву проводов и падению опор [2]. Поэтому для предотвращения таких тяжелых последствий принимают определенные меры и проводят специальные мероприятия: используют усиленные или модернизированные конструкции элементов линии электропередачи, специальные устройства (ограничители гололедообразования, защитные кольца для ограничения налипания снега [3]), проводят механическую обивку гололеда [4], выполняют плавку гололеда электрическим током.

Плавка гололеда постоянным выпрямленным током с применением полупроводниковой техники в настоящее время является наиболее перспективным способом борьбы с гололедом. При этом все, что для этого требуется, — организовать контур плавки на линии электропередачи и подключить устройство плавки гололеда на подстанции.

### 1. Организация контура плавки гололеда

Система плавки постоянными регулируемые токами выполняется по схеме «фаза-фаза» или «фаза-две фазы». Для этого с одной стороны линии электропередачи подключается устройство плавки (на подстанции), а с другой стороны ВЛ производится закорачивание

проводов соответствующих фаз, на которых производится плавка.

Традиционно для этой цели на подстанциях устанавливают закорачивающие пункты (далее — ЗКРП) на основе разъединителей, применение которых является экономически неэффективным при необходимости размещения ЗКРП за пределами подстанции.

Выходом из сложившейся ситуации является применение разъединителей, устанавливаемых на опорах воздушных линий электропередачи.

При этом известно о проектах с применением трехполюсных разъединителей с ручным приводом для организации контура плавки гололеда (см. рисунок 1), также возможны аналогичные варианты с применением однополюсных разъединителей. В этом случае выводы всех трех полюсов с одной стороны соединяются между собой.

Использование разъединителей с ручным приводом имеет ряд недостатков:

- привод разъединителей должен находиться на высоте, позволяющей проводить комфортное оперирование (2–3 м) вручную;
- необходимо наличие повышенной защиты от несанкционированного доступа;
- на опору воздействует несимметричная односторонняя нагрузка от установленных разъединителей.

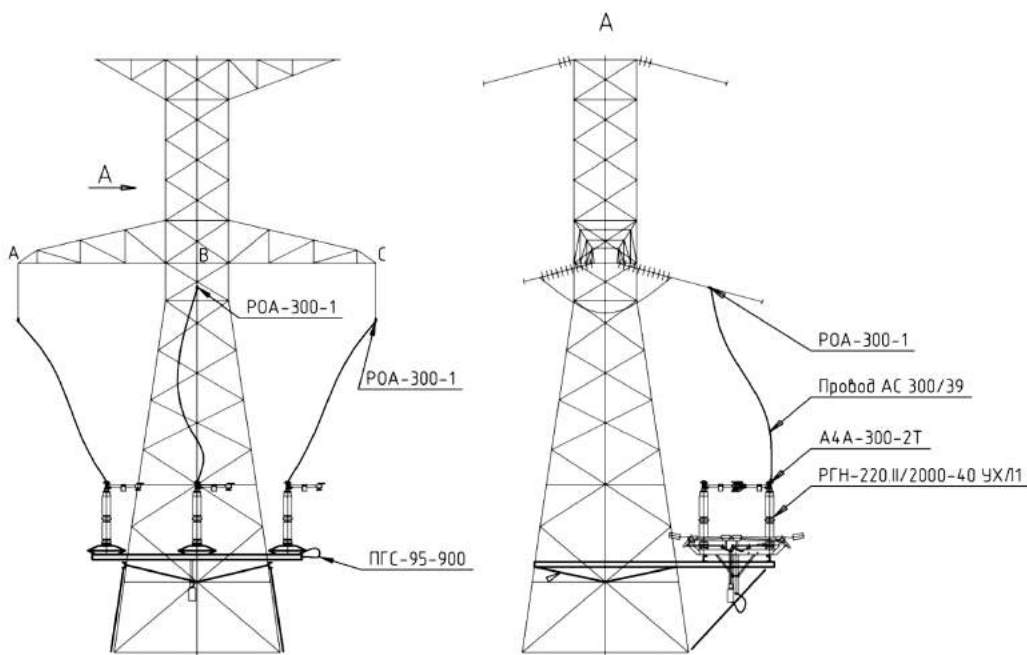


Рисунок 1. Пример расположения трехполюсного разъединителя 220 кВ с ручным приводом на анкерно-угловой опоре



## 2. Линейный комплекс коммутационных аппаратов

Для повышения удобства была инициирована научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа (НИОКР) по заказу ПАО «ФСК ЕЭС» для нужд предприятий Общества — «Разработка конструкторской документации, типовых решений и создание опытного образца комплекса коммутационных аппаратов с дистанционным управлением, устанавливаемого на опорах ВЛ 220–500 кВ для плавки гололеда». В результате реализации указанной НИОКР был разработан способ организации контура плавки гололеда, лишенный приведенных выше недостатков, — линейный комплекс коммутационных аппаратов (ЛККА). Конструктивно ЛККА состоит из однополюсных разъединителей, снабженных системой питания, отличительной особенностью которых является организация контура плавки гололеда за счет закорачивания непосредственно соседних фаз между собой (см. рисунок 2).

Основным вопросом при реализации принципиальной схемы рисунка 2 является возможность установки разъединителей между соседними фазами с соблюдением всех требуемых электроизоляционных расстояний. Такая возможность имеется при применении разъединителей серии РГ [5] напряжением 220 и 330 кВ, имеющих увеличенные расстояния между разомкнутыми контактами — 2000 и 2800 мм. Согласно [6, п. 4.2.55], расстояние в свету при жестких шинах (к ним относятся и межконтактный промежуток разъединителя) и номинальном напряжении 220 кВ между токоведущими частями разных фаз следует принимать 2000 мм, для напряжения 330 кВ указанное расстояние составляет 2800 мм, что позволяет включать разъединители непосредственно между соседними фазами, а также использовать такой способ установки

в линейном комплексе коммутационных аппаратов. В этом случае ЛККА будет иметь вид, представленный на рисунке 3.

Разработанный линейный комплекс коммутационных аппаратов обладает рядом достоинств перед существующими и применяемыми в настоящий момент решениями:

- количество применяемых разъединителей уменьшено на треть;
- дополнительная нагрузка более равномерно распределена в элементах опоры линии электропередачи;
- управление ЛККА осуществляется с выносного блока управления, размещенного в антивандальном шкафу на высоте 3 м;
- оперирование ЛККА возможно только при отсутствии номинального напряжения на линии электропередачи;
- защиту от несанкционированного доступа обеспечивают ограждения, размещение оборудования на высоте, применение антивандальных шкафов.

Места установки оборудования выбраны с учетом электрической прочности воздушной изоляции, а также минимизации объемов кабельно-проводниковой продукции, необходимой для электрического соединения всех элементов ЛККА с фазными проводами и между собой.

## 3. Размещение оборудования ЛККА на опорах линий электропередачи. Защита от несанкционированного доступа

Вопрос размещения ЛККА на опоре является одним из основных вопросов, влияющих на реальную применимость разработанных устройств.

Известно, что при проектировании и эксплуатации используются опоры разного назначения и с разной несущей способностью: промежуточные, угловые, анкерные, транспозиционные и т.д. Рациональным

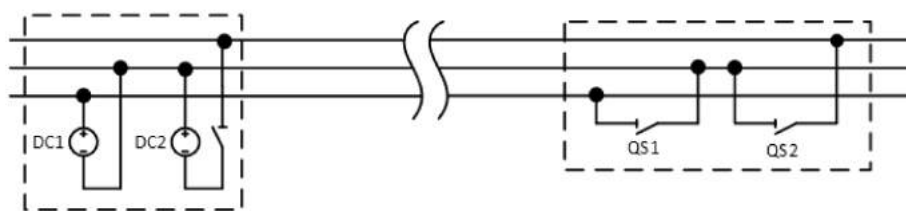
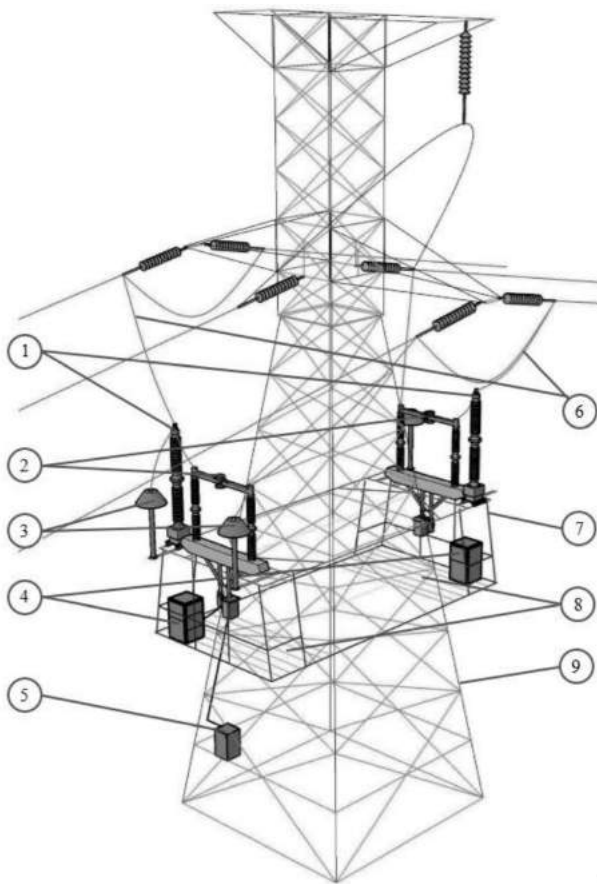


Рисунок 2 Упрощенная принципиальная электрическая схема организации плавки гололеда на линиях электропередачи с помощью ЛККА



1 — емкостной трансформатор напряжения; 2 — разъединитель; 3 — ОПН; 4 — шкаф питания; 5 — шкаф блока управления; 6 — гибкая ошиновка; 7 — опорная конструкция для размещения ЛККА; 8 — площадка обслуживания; 9 — опора

**Рисунок 3.** Схема размещения ЛККА 220 кВ на опоре У220-3+9

решением является размещение ЛККА на опорах с повышенной несущей способностью, что позволит в ряде случаев полностью избежать усиления конструкции опор, и только в особых случаях потребует их усиления. На стандартных трассах к опорам с повышенной несущей способностью относятся анкерно-угловые опоры, размещение на которых ЛККА имеет следующие преимущества:

- анкерные опоры напряжением более 35 кВ должны располагаться на расстоянии не более 10 км друг от друга, а в труднодоступной местности и в местности с особо сложными природными условиями расстояние между опорами не должно превышать 5 км [6], что позволяет использовать этот вид опор при необходимости секционирования линии;

- переход с воздушной линии на портал подстанции осуществляется через концевые опоры, в качестве которых используются в

том числе анкерно-угловые опоры, которые можно использовать в случае необходимости размещения ЛККА у подстанции.

В сетях 220 и 330 кВ наиболее часто встречающимися анкерно-угловыми опорами являются опоры У220-1, У220-3, У330-1, У330-3, которые были рассмотрены в работе (включая подставки +5, +9, +14 под указанные виды опор).

Сами площадки для размещения ЛККА представляют собой пространственную решетчатую конструкцию, состоящую из швеллеров и уголкового профиля различного сортамента. Все конструкции для размещения на опорах 220 и 330 кВ, разработанные в рамках проведенной работы, состоят из:

- площадки обслуживания, выполненной из группы швеллеров и уголков, и уложенного на них просечно-вытяжного листа;
- ограждения;
- конструкции, передающей нагрузки от ЛККА на опору;
- элементов, служащих установочными площадками для оборудования, входящего в состав ЛККА.

Все соединения выполняются на болтах и на монтажной сварке.

Опорные конструкции ЛККА (см. рисунок 3) позволяют разместить все необходимое оборудование (разъединители, емкостные трансформаторы напряжения, шкафы питания, нелинейные ограничители перенапряжений), при этом особенностями конструкций является их разборный характер, а также возможность установки на существующие опоры.

Одной из важных задач по размещению оборудования ЛККА на опорах линии электропередачи является защита от несанкционированного доступа третьих лиц. В ряде случаев — при размещении конструкций на опорах с подставками +5, +9, +14 — высота расположения конструкций (более 4 м) является одним из факторов, ограничивающих доступ посторонних лиц. Однако данного решения недостаточно, т.к. остается возможность подъема на площадку обслуживания по конструкции решетчатой опоры, в т.ч. с помощью степ-болтов.

Для обеспечения защиты от несанкционированного доступа предлагается использо-

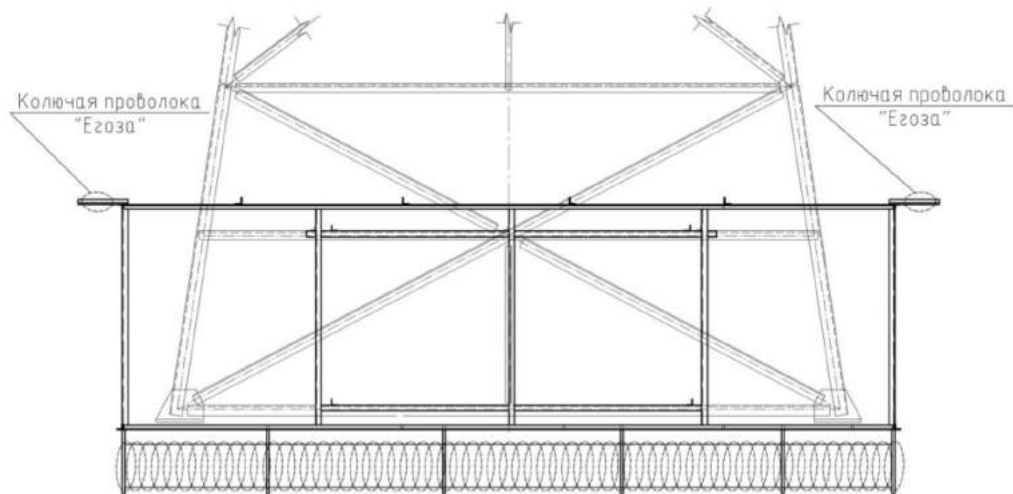


Рисунок 4. Схема установки каркаса ограждения для опор У330-1, У330-3 с подставками

вать металлические заграждения у основания опоры из просечно-вытяжного листа с колючей проволокой поверх ограждения, а также у основания, как показано на рисунке 4 (листы заграждения не показаны).

Разработанное ограждение защищает от несанкционированного доступа третьих лиц, в то же время сохраняется удобство оперирования разъединителями за счет имеющейся дверной секции в ограждении. Для управления ЛККА используется выносной блок управления, находящийся на высоте 3 м внутри защищаемого периметра, что позволяет управлять ЛККА без подъема на опору.

Дополнительной защитой от несанкционированного доступа является применение антивандальных термощкафов как для шкафов питания, так и для выносного блока управления.

#### 4. Испытания опытного образца ЛККА

Осенью 2016 г. на территории испытательного центра Филиала ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» — СибНИИЭ был собран и испытан опытный образец ЛККА на номинальное напряжение 220 кВ (рисунок 5). Основной целью испытаний опытного образца являлась проверка соответствия ЛККА техническим требованиям, в том числе проверка механической прочности опорной конструкции для размещения ЛККА и электрической прочности первичного оборудования, а также опре-

деление необходимых доработок по результатам испытаний.

Комплекс испытаний включал:

- контрольную сборку и механические испытания;
- функциональные и электрические (включая испытания на электромагнитную совместимость) испытания.

Выполнение испытаний позволило проверить работоспособность всех основных принятых конструкторских решений.

#### 5. Заключение

Разработан линейных комплекс коммутационных аппаратов для применения на воздушных линиях электропередачи 220 и 330 кВ. Использование разработанного линейного комплекса коммутационных аппаратов позволяет решить возникающие при плавке гололеда задачи: обеспечение секционирования линий электропередачи и организация контура плавки гололеда без установки оборудования на территории подстанции.

Разработанная конструкция может быть размещена на типовых анкерно-угловых опорах У220-1, У220-3, У330-1, У330-3, в том числе с подставками +5, +9, +14 м, а разработанные мероприятия по защите от несанкционированного доступа позволяют безопасно применять ЛККА в том числе в ненаселенных районах.

**Список литературы**

1. Ефимов Е.Н., Тимашова Л.В., Ясинская Н.В. Причины и характер повреждаемости компонентов воздушных линий электропередачи напряжением 110–750 кВ в 1997–2007 гг. // Энергия единой сети. 2012. № 5. С. 32–41.
2. Гуревич М.К., Козлова М.А., Репин А.В., Шершневу Ю.А. Способы предотвращения аварий, вызванных гололедообразованием на проводах и грозозащитных тросах ВЛ // Известия НИИ Постоянного тока. 2010. № 64. С. 237–249.
3. РД 34.20.568-91. Методические указания по применению устройства ограничения налипания мокрого снега на провода ВЛ 10-220 кВ / ОАО «ВНИИЭ», утв. Минэнерго СССР 15.11.1991.
4. Шкапцов В.А. Системы прогнозирования и мониторинга сброса гололеда // Электроэнергия: передача и распределение. 2011. № 1. С. 24–28.
5. Разъединители серии РГ на напряжение 220 кВ (однополюсная установка): руководство по эксплуатации / ИВЕЖ.674215.108 РЭ, ЗАО «ЗЭТО». 49 с.
6. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: Изд. НИЦ ЭНАС, 2003.

**References**

1. Efimov E.N., Timashova L.V., Jasinskaja N.V. Prichiny i harakter povrezhdaemosti komponentov vozdushnyh linij jelektroperedachi naprjazheniem 110-750 kV v 1997-2007 gg. // Jenergija edinoj seti. 2012. № 5. S. 32-41.
2. Gurevich M.K., Kozlova M.A., Repin A.V., Shershnev Ju.A. Sposoby predotvrashhenija avarij, vyzvannyh goleledoobrazovaniem na provodah i grozozashhitnyh trosah VL // Izvestija NII Postojannogo toka. 2010. № 64. S. 237-249.
3. RD 34.20.568-91. Metodicheskie ukazanija po primeneniju ustrojstva ogranichenija nalipanija mokrogo snega na provoda VL 10-220 kV / ОАО «VNIIJe», utv. Minjenergo SSSR 15.11.1991.
4. Shkapcov V.A. Sistemy prognozirovanija i monitoringa sbrosa goleleda // Jelektrojenergija: peredacha i raspredelenie. 2011. № 1. S. 24-28.
5. Raz#ediniteli serii RG na naprjazhenie 220 kV (odnopoljuskaja ustanovka): rukovodstvo po jekspluatacii / IVEZh.674215.108 RJe, ZAO «ZJeTO». 49 s.
6. Pravila ustrojstva jelektroustanovok. 7-e izd. M.: Izd. NC JeNAS, 2003.





**Кушнир В. Г.**  
**Kushnir V. G.**

*доктор технических наук, профессор,  
заведующая кафедрой «Машины,  
тракторы и автомобили», Костанайский  
государственный университет  
имени А. Байтурсынова,  
г. Костанай, Республика Казахстан*



**Кошкин И. В.**  
**Koshkin I. V.**

*кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Электроэнергетика  
и физика», Костанайский  
государственный университет  
имени А. Байтурсынова,  
г. Костанай, Республика Казахстан*



**Кошкина А. И.**  
**Koshkina A. I.**

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



**Кушнир А. С.**  
**Kushnir A. S.**

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

УДК 621.1

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ «ВЕТРОНАСОС — ГИДРОТУРБИНА»**

В Республике Казахстан имеются большие площади пастбищных угодий. Но большая часть из них не используется в силу проблем обводнения; также многие пастбищные угодия удалены от централизованного энергоснабжения, что является причиной невозможности установки насосных станций для водоснабжения. Немногие из животноводческих хозяйств в подобных ситуациях используют ветронасосные установки для подъема воды либо ветроэнергетические установки для выработки электрической энергии для питания насосных станций.

Исследование технологий водоснабжения пастбищ с использованием ветронасосных установок, а также современного состояния ветронасосных установок позволяет заключить, что вопрос создания более эффективной системы энергообеспечения удаленных пастбищных угодий является актуальным.

Таким образом, целью работы является повышение эффективности работы системы энергообеспечения удаленных пастбищных угодий путем применения синтеза ветронасосной установки и мини-ГЭС.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: исследованы современные конструкции ветронасосных установок и методы их проектирования; разра-

ботана функциональная модель системы энергоснабжения с использованием ветронасоса как способ повышения эффективности ветронасосной установки и составлением схемы установки; разработан принцип синтеза системы энергоснабжения с использованием ветронасосной установки и мини-ГЭС, составлены зависимости ЭДС от скорости ветра, производительности и напора ветронасосной установки; разработана математическая модель системы энергоснабжения с использованием ветронасоса и гидрогенератора, выявлены основные зависимости ЭДС от внешних факторов, таких как скорость ветра и, как следствие, производительность ветронасосной установки.

**Ключевые слова:** ветровой насос, мини-гидроэлектростанция, электродвижущая сила, скорость ветра, мощность, частота вращения, эксперимент, модель.

## SIMULATION OF «WIND PUMP — WATER TURBINE» SYSTEM

In Kazakhstan, there are large areas of rangeland. But most of them are not used, due to flooding problems; also many of them are away from centralized power supply, which is the reason you can not install pumping stations for water supply. Few of livestock in such situations use of wind pumping stations to lift water or wind power to generate electricity to power the pumping stations.

Research pasture water supply technologies using wind pumping systems, as well as the current state of wind pumping systems, allows to conclude the issue of creating a more effective system of power supply of remote rangeland is relevant.

Thus, the purpose is to increase the efficiency of power supply system of remote rangelands through the use of synthetic wind pumping unit and mini hydroelectric power.

To achieve this goal have been resolved following tasks: to investigate the modern design of wind pumping systems and methods of their design; developed a functional model of the power system with wind pump, as a way to improve the efficiency of the installation, drawing installation scheme; developed the principle of the power supply system synthesis using wind pumping unit and mini hydroelectric power, compiled according to the EMF on the wind speed, performance, and wind pressure pumping unit; developed a mathematical model of the power system with wind and hydro generator pump, identified the main EMF depending on external factors such as wind speed and wind as a consequence of the performance of the pumping unit.

**Key words:** wind pump, mini hydroelectric power, electromotive force wind speed, power, rotational speed, experiment model.

Для решения проблем водоснабжения удаленных пастбищных угодий предлагаем модернизировать систему энергоснабжения с использованием ветронасосной установки. Суть модернизации состоит в том, чтобы использовать потенциальную энергию воды, проходящую по водопроводу посредством мини-гидротурбины. В имеющуюся систему «ветронасос (ВНУ) — водопровод — потребитель» добавляется гидротурбина, которая будет превращать механическую энергию воды, движущейся по водопроводу, в электрическую с использованием электроэнергии для собственных нужд потребителя.

Целью данной работы является исследование параметров системы «ВНУ — мини-ГЭС» при изменениях внешних воздействий.

Объектом исследования является аппаратная система «ветронасос — мини-ГЭС».

Схема ситуационная предлагаемой исследуемой системы представлена ниже на рисунке 1.

Ветронасос посредством энергии ветра поднимает воду из колодца, которая по водопроводу направляется к потребителю, и при установке гидротурбины в водопроводе появляется возможность выработки дополнительной электрической энергии, которая может быть использована как в хозяйственных нуждах потребителя, так и для зарядки аккумуляторных батарей для водоснабжения при отсутствии ветра.

Блок-схема установки представлена на рисунке 2.

Ветронасосная установка (блок 1) за счет энергии ветра и кривошипно-шатунного механизма поднимает воду из скважины, далее по водопроводу с гидротурбиной (блок

2) с определенным напором подает потребителю водной энергии (блок 3). Это может быть поильная система на животноводческой ферме либо емкость для сбора воды.

Вода, передвигаясь по водопроводу, взаимодействует с лопастями гидротурбины, в результате вырабатывается электрическая энергия.

Значение вырабатываемой ЭДС будет зависеть от многих факторов, таких как производительность и мощность ветронасосной установки, напор, частота вращения гидротурбины. Значение ЭДС напрямую зависит от частоты вращения гидротурбины, которая, в свою очередь, зависит от напора и производительности ВНУ.

Синтез системы энергоснабжения с использованием ветронасосной установки и гидротурбины сможет несколько повысить эффективность использования ветронасоса.

Наиболее важными характеристиками ветронасосных установок являются: развиваемая мощность  $N$ , вращающий момент  $M_g$ , коэффициент использования энергии ветра  $\zeta$ , быстроходность  $Z$ , коэффициент полезного действия агрегата  $\eta$  [1].

Мощность, необходимую для подъема воды насосом, рассчитывают по следующей формуле [1, 2]:

$$N = \frac{QH}{75\eta_n}, \quad (1)$$

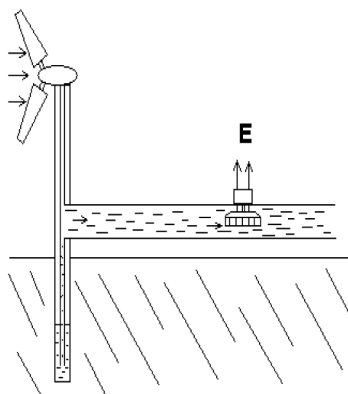
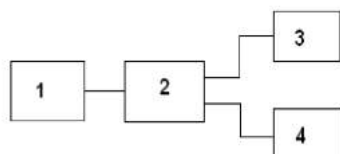


Рисунок 1. Схема ВНУ с гидротурбиной



1 — ВНУ; 2 — система передачи (водопровод);  
3 — потребитель водной энергии;  
4 — потребитель электрической энергии

Рисунок 2. Блок-схема системы ВНУ с гидротурбиной

где  $Q$  — производительность насоса, л/с;

$H$  — полный напор, м;

$\eta_n$  — коэффициент полезного действия водоподъемника (КПД).

Современные компании, выпускающие ветронасосные установки, представляют следующие характеристики для водяных насосов (таблица 1). При этом стартовая скорость равна 1,8–2,0 м/с, номинальная 5–8 м/с.

Предлагаемые технические характеристики на весь ряд машин рассчитаны из усредненных параметров водяных скважин с условиями [1, 3]:

1. Ветронасос установлен непосредственно над скважиной;

2. Высота подъема воды над поверхностью земли до 5 м;

3. Расстояние от поверхности земли до кромки воды в скважине 10 м;

4. Глубина погружения насоса в воду составляет 5 м.

Рассматривается вариант использования потенциальной энергии воды, вырабатываемой ВНУ.

Способ повышения эффективности данным методом заключается в использовании потенциальной энергии воды для выработки ЭДС.

Мощность ветродвигателя определяется по выражению, кВт [1]:

$$P = M_g \omega, \quad (2)$$

где  $M_g$  — вращающий момент, Нм;

$\omega$  — угловая частота вращения.

В свою очередь, момент, Нм [1]:

$$M_g = 0,2R^3v^2, \quad (3)$$

где  $R$  — радиус ветроколеса, м;

$v$  — скорость ветра, м/с<sup>2</sup>;

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n, \quad (4)$$

где  $n$  — частота вращения ротора, об./мин.

Для исследования используется ветронасосная установка с диаметром ветроколеса 2,4 м, двухлопастная, с частотой вращения ротора 105 об./мин, стартовая скорость 2 м/с, минимальный шаг по скорости ветра 2 м/с. Максимальная скорость ветра при работе ВНУ 30 м/с.

Зная частоту вращения турбины, рассчитывается значение вырабатываемой ЭДС в фазе ротора  $E$  [1, 2].

$$E = 4,44 \cdot \left(n \cdot \frac{p}{60}\right) \cdot \omega \cdot K_\omega \cdot \Phi, \quad (5)$$

**Таблица 1.** Технические характеристики водяных насосов

Диаметр ротора (м)	Высота мачты (м)	Диаметр насоса (мм)	Производительность (м <sup>3</sup> /сут) (при скорости ветра 5–8 м/с)	Полный вес с мачтой (кг)	Максимальные обороты ротора	Ход поршня в 2 режимах (мм)
1,2	4,3	50	26,4	125	185	100/50
2,4	12,0	80	57,6	400	105	200/150
3,6	12,0	120	120,0	1015	74	300/225
4,8	12,0	200	300,0	1958	53	400/300
6,0	12,0	250	600,0	3850	49	500/375

где  $4,44 \cdot \left(\frac{P}{60}\right) \cdot \omega \cdot K_{\omega} = C$  — постоянный конструктивный коэффициент;  
 $\Phi$  — магнитный поток, Вб.

Принимается среднее значение произведения конструктивного коэффициента и магнитного потока для данного ряда мощностей  $C \cdot \Phi = 0,33$ .

При известных значениях магнитного потока и частоты вращения турбины определяется значение вырабатываемой ЭДС при стартовой скорости, В:

$$E = 0,166 \cdot 982,6 = 163.$$

Зависимости вырабатываемой ЭДС от частоты вращения турбины мини-ГЭС и скорости ветра при попадании на лопасти ветронасоса представлены на рисунке 3.

Таким образом, количество вырабатываемой ЭДС зависит от напора воды подаваемой ветронасосом, который, в свою очередь, зависит от скорости ветра.

На основании проведенных теоретических расчетов составляется математическая зависимость параметров системы энергоснабжения с использованием ветронасосной установки и гидрогенератора.

Мощность ветронасосной установки, кВт [1]:

$$N_{ВНУ} = 0,2 \cdot R^3 \cdot V^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot n, \quad (6)$$

где  $R$  — радиус ветроколеса, м;  
 $V$  — скорость ветра, м/с;

$N$  — частота вращения ротора ВНУ, об./мин.

Производительность ветронасосной установки, л/ч [1]:

$$Q = \frac{0,2 \cdot R^3 \cdot V^2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot n}{H}, \quad (7)$$

где  $H$  — полный напор, 30 м.

Частота вращения гидрогенератора определяется выражением, об./мин:

$$n = 9,5493 \cdot \frac{V \cdot H \cdot \eta_T \cdot 0,2 \cdot R^3 \cdot V^2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot n}{N_{ГЭС}}, \quad (8)$$

где  $N_{ГЭС}$  — мощность турбины, кВт;

$V$  — вес единицы объема воды, г/м<sup>3</sup>;

$H$  — полный напор, от 30 до 58 м;

$\eta_T$  — КПД турбины, 0,9;

$Q$  — расход воды, м<sup>3</sup>/с.

Значение ЭДС с учетом частоты вращения (8) примет следующий вид, В:

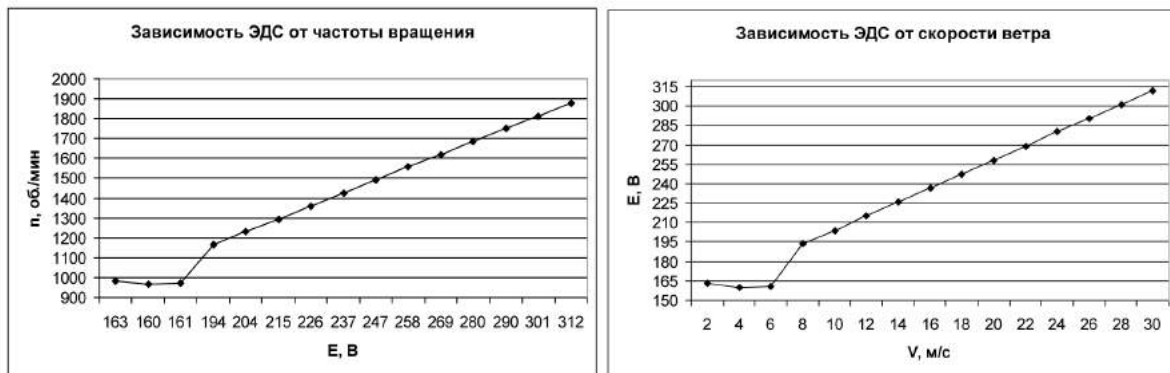
$$E = C \cdot \Phi \cdot \frac{V \cdot H \cdot \eta_T \cdot 0,2 \cdot R^3 \cdot V^2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot n}{N_{ГЭС}}, \quad (9)$$

где  $C$  — постоянный конструктивный коэффициент;  $\Phi$  — магнитный поток, Вб.

Произведение конструктивного коэффициента и магнитного потока (СФ) принимается равным 0,33.

В выражении (9) конструктивный коэффициент, магнитный поток, вес единицы объема воды, радиус ветроколеса, частота вращения ротора ВНУ являются постоянными.

Преобразовав выражение (9), исключив постоянные, получается результирующая



**Рисунок 3.** Зависимости вырабатываемой ЭДС от частоты вращения гидротурбины и скорости ветра



зависимость ЭДС от квадрата скорости ветра при варьируемых величинах мощности мини-ГЭС:

$$\partial E = \frac{\partial V^2}{N_{ГЭС}}. \quad (10)$$

Модель объекта представляет собой математическую зависимость между факторами объекта и его откликом. В регрессионном анализе используются статистические модели, линейные по параметрам.

На основании экспериментальных данных, полученных посредством измерений, проведенных на физической модели, имитирующей гидрогенератор, были проведены расчеты и составлена поверхность отклика математической модели [4].

В результате матрица планирования (МП) для полнофакторного эксперимента типа  $2^2$  приняла следующий вид, указанный в таблице 2.

За входной фактор  $X_1$  принимается скорость ветра ( $V$ ), за входной фактор  $X_2$  — производительность ( $Q$ ) ветронасосной установки.

За выходной фактор принимается значение ЭДС.

Фиктивный фактор  $X_0$  вводят для удобства машинного расчета свободного члена  $b_0$ .

Матрица планирования имеет ряд основных свойств, которые необходимо учитывать [4]:

- симметричность относительно центра эксперимента;
- условие нормировки;
- ортогональность.

Свойство ортогональности позволяет упростить вычисления и получить независимые оценки коэффициентов уравнения регрессии.

Составленная на основании результатов эксперимента расширенная МП для полного факторного эксперимента полностью отвечает данным требованиям, кроме условия

рототабельности, так как условие рототабельности выполняется при линейных ММ. Экспериментальные данные должны быть однородными и нормально распределенными [4].

После составления МП необходимо рассчитать коэффициенты уравнения регрессии. Величины коэффициентов уравнения регрессии характеризуют вклад каждого фактора в значение функции отклика.

В результате расчетов получили следующие значения коэффициентов уравнения регрессии:

$$b_0 = 257,889; b_1 = 6,833; b_2 = 7,167; b_{12} = 9; b_{11} = -53,833; b_{22} = -31,833.$$

Рассчитанные коэффициенты необходимо проверить на их значимость.

Статистическую значимость (отличие от нуля) коэффициентов регрессии проверяют по критерию Стьюдента [4].

В результате проверки в ходе построения математической модели из уравнения регрессии были исключены коэффициенты  $b_{11}$ ,  $b_{22}$ , и уравнение регрессии приняло следующий вид:

$$Y = 257.889 + 6.833 \cdot X_1 + 7.167 \cdot X_2 + 9 \cdot X_1 \cdot X_2. \quad (11)$$

Далее проверяется уравнение регрессии на адекватность по критерию Фишера.

Расчетное значение критерия Фишера находят как отношение дисперсии неадекватности к оценке дисперсии единичного наблюдения [4].

В нашем случае расчетное значение критерия адекватности  $F_r$  получилось равным 0, табличное значение  $F_t = 2,93$ , условие адекватности выполняется.

После составления уравнения регрессии и проверки его проходимости через критерии значимости и адекватности построена поверхность отклика.

Таблица 2. Расширенная МП для факторного эксперимента

№ п/п	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_1 X_2$	$(X_1)^2$	$(X_2)^2$	Y
1	+1	-1	-1	+1	0.333	0.333	163
2	+1	+1	-1	-1	0.333	0.333	160
3	+1	-1	+1	-1	0.333	0.333	161
4	+1	+1	+1	+1	0.333	0.333	194
5	+1	-1	0	0	0.333	-0.667	204
6	+1	+1	0	0	0.333	-0.667	215
7	+1	0	-1	0	-0.667	0.333	226
8	+1	0	+1	0	-0.667	0.333	237
9	+1	0	0	0	-0.667	-0.667	247

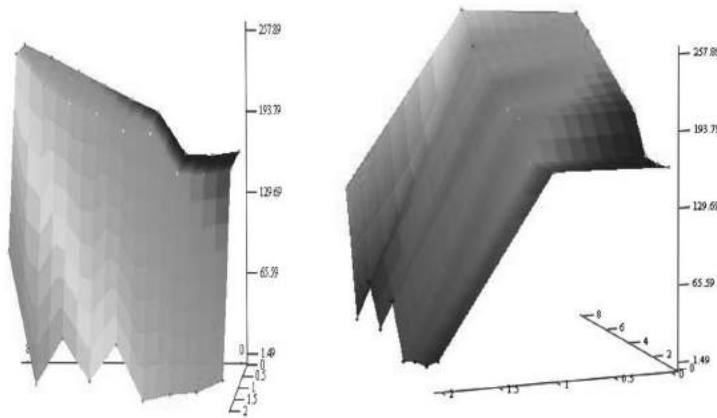


Рисунок 4. Поверхность отклика двухфакторного эксперимента

В нашем случае факторов два, и необходимо провести опыты при разных соотношениях этих факторов. Полученную функцию отклика в 3-мерном пространстве можно анализировать, проводя ряд сечений с фиксированными значениями одного из факторов. Вычлененные графики сечений можно аппроксимировать совокупностью математических выражений.

В результате расчетов конечное уравнение регрессии двухфакторного эксперимента приняло следующий вид:

$$Y = 257.889 + 6.833 \cdot X_1 + 7.167 \cdot X_2 + 9 \cdot X_1 \cdot X_2.$$

На основании полученного уравнения регрессии построим поверхность отклика в 3-мерном пространстве, который представлен на рисунке 4.

Анализируя полученную математическую модель, можно заключить, что максимальный выходной параметр, а именно значение ЭДС, образуется при максимальных значениях входных факторов, которыми у нас являются скорость ветра и производительность ВНУ.

При скорости ветра 18 м/с можно выработать ЭДС в 247 В. При наличии минимальной скорости ветра для работы ВНУ 2 м/с также возможно получение ЭДС в количестве 160–163 В, что наглядно видно из поверхности отклика.

Проанализировав полученную математическую модель, можно резюмировать, что наиболее оптимальными параметрами являются данные при скорости ветра от 4 до 8 м/с, при которой мы получаем значение выходной величины (ЭДС) 160–195 В.

### Список литературы

1. Виссарионов В.И. и др. Водно-энергетические и водохозяйственные расчёты: учеб. пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2001. 56 с.
2. Чебаевский В.Ф., Вишневецкий К.П., Накладов Н.Н. Проектирование насосных станций и испытание насосных установок. М.: Колос, 2000. 376 с.
3. Тлеуов А.Х. Нетрадиционные источники энергии: учеб. пособие. Астана: Фолиант, 2009. 248 с.
4. Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учеб. пособие для магистров. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во «Юрайт», 2015. 495 с.

### References

1. Vissarionov V.I. i dr. Vodno-jenergeticheskie i vodohozjajstvennye raschjoty: ucheb. posobie. M.: Izd-vo MJEI, 2001. 56 s.
2. Chebaevskij V.F., Vishnevskij K.P., Nakladov N.N. Proektirovanie nasosnyh stancij i ispytanie nasosnyh ustanovok. M.: Kolos, 2000. 376 s.
3. Tleuov A.H. Netradicionnye istochniki jenerгии: ucheb. posobie. Astana: Foliant, 2009. 248 s.
4. Sidnjaev N.I. Teorija planirovanija jeksperimenta i analiz statisticheskikh dannyh: ucheb. posobie dlja magistrrov. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Izd-vo «Jurajt», 2015. 495 s.



**Линенко А. В.**  
**Linenko A. V.**

*доктор технических наук, профессор  
кафедры «Электрические машины и  
электрооборудование», ФГБОУ ВО  
«Башкирский государственный  
аграрный университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*



**Туктаров М. Ф.**  
**Tuktarov M. F.**

*кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Электрические машины и  
электрооборудование», ФГБОУ ВО  
«Башкирский государственный  
аграрный университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*



**Сираев Ш. Ф.**  
**Siraev Sh. F.**

*ст. преподаватель кафедры  
«Электрические машины и  
электрооборудование», ФГБОУ ВО  
«Башкирский государственный  
аграрный университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*



**Байназаров В. Г.**  
**Baunazarov V. G.**

*аспирант кафедры «Электрические  
машины и электрооборудование»,  
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный  
аграрный университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 621-133.33

## **НЕЧЕТКИЙ РЕГУЛЯТОР В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ**

В последнее время наблюдается значительный рост количества фермерских хозяйств в нашей стране, что связано с выделением государством субсидий на развитие малых и средних фермерских хозяйств. Фермерские хозяйства, занимающиеся растениеводством, используют для проведения послеуборочных работ стандартные решетчатые зерноочистительные машины, в которых для приведения в колебательное движение рабочего органа применяется механический преобразователь вида движения. При этом использование механического преобразователя вида движения приводит к появлению различных недостатков, одним из которых является наличие больших массогабаритных показателей зерноочистительной машины. Учитывая тот факт, что небольшие фермерские хозяйства производят малые объемы сельскохозяйственной продукции, разработка недорогих машин малой про-

изводительности, сочетающих в себе компактность, надежность и высокую эффективность сепарирования зерна, является в настоящее время актуальной задачей.

Одним из вариантов решения вышеперечисленных проблем является использование линейного асинхронного двигателя (ЛАД), позволяющего непосредственно электрическую энергию преобразовать в колебательное движение рабочего органа в приводе зерноочистительной машины. Однако, из-за особенности конструкции электропривода зерноочистительной машины на основе ЛАД, работающего в автоколебательном режиме и режиме вынужденных колебаний, изменение технологической нагрузки приводит к нарушению параметров колебательного процесса рабочего органа зерноочистительной машины.

В статье рассматривается разработанная система управления линейным электроприводом зерноочистительной машины, позволяющая поддерживать параметры колебательного процесса рабочего органа в заданных пределах.

Представлена разработанная функциональная схема системы управления линейным электроприводом (ЛЭП) зерноочистительной машины, состоящая из трех основных элементов: датчика ускорения, нечеткого регулятора и системы импульсного управления. Она позволяет поддерживать параметры колебательного процесса рабочего органа в условиях изменения значения технологической нагрузки. Описаны принципы работы нечеткого регулятора (НР) и системы импульсного управления разработанной системы управления ЛЭП зерноочистительной машины. Представлены результаты исследования системы, проведенные в среде визуального моделирования MATLAB/SIMULINK, подтверждающие способность выполнения поставленной задачи разработанной системой управления ЛЭП зерноочистительной машины. Показано, что разработанная система управления позволяет обеспечивать наилучшие параметры колебаний решетного стана, а соответственно эффективную очистку зерна.

**Ключевые слова:** зерноочистительная машина, линейный электропривод, колебательное движение, система импульсного управления, нечеткий регулятор.

## FUZZY CONTROLLER IN THE CONTROL SYSTEM OF LINEAR INDUCTOR DRIVE OF GRAIN CLEANING MACHINE

Recently significant increase in number of farms in our country is observed that it is connected with allocation by the state of subsidies for development of small and average farms. The farms which are going in for crop production use for carrying out postharvest works standard grain cleaning machines in which the mechanical converter of a type of movement is used to reduction in oscillating motion of working body. At the same time use of the mechanical converter of a type of movement leads to emergence of various shortcomings, one of which is availability of big mass-dimensional indicators of the grain cleaning machine. Considering the fact that small farms make small amounts of agricultural products, development of the inexpensive machines of small performance combining compactness, reliability and outstanding performance of separation of grain is an urgent task now.

One of versions of the solution of above-mentioned problems is use of the linear inductor motor (LIM) allowing to transform directly electrical energy to oscillating motion of working body in the drive of the grain cleaning machine. However, because of feature of a design of the electric drive of the grain cleaning machine on the basis of LIM working in the self-oscillatory mode and the mode of forced fluctuations, change of technological loading leads to violation of parameters of oscillatory process of working body of the grain cleaning machine.

In article the developed management system the linear electric drive of the grain cleaning machine allowing to support parameters of oscillatory process of working body in the set limits is considered.

The developed function chart of a management system the linear electric drive of the grain cleaning machine consisting of three basic elements is provided: sensor of acceleration, indistinct regulator and system of pulse management. It allows to support parameters of oscillatory process of working body in the conditions of change of value of technological loading. The principles of operation of the fuzzy regulator and system of pulse management of a developed management system of the power line of the grain cleaning machine are described. Results the system research-



es conducted in the environment of visual modeling of MATLAB/SIMULINK, confirming a capability of accomplishment with the set tasks developed management system of the power line of the grain cleaning machine are provided. It is shown that the developed management system allows to provide the best parameters of fluctuations of a work body, and respectively effective purification of grain.

**Key words:** grain cleaning machine, linear induction motor, oscillatory motion, system of impulse control, fuzzy controller.

Наиболее перспективным является использование в зерноочистительной машине плоского линейного асинхронного двигателя (ЛАД), позволяющего создавать электромагнитные силы в двух направлениях (тяги  $F_x$  и притягивания  $F_y$ ). На рисунке 1 представлен линейный электропривод (ЛЭП) зерноочистительной машины, который можно рассматривать как мехатронный модуль типа «двигатель — рабочий орган» [1–3].

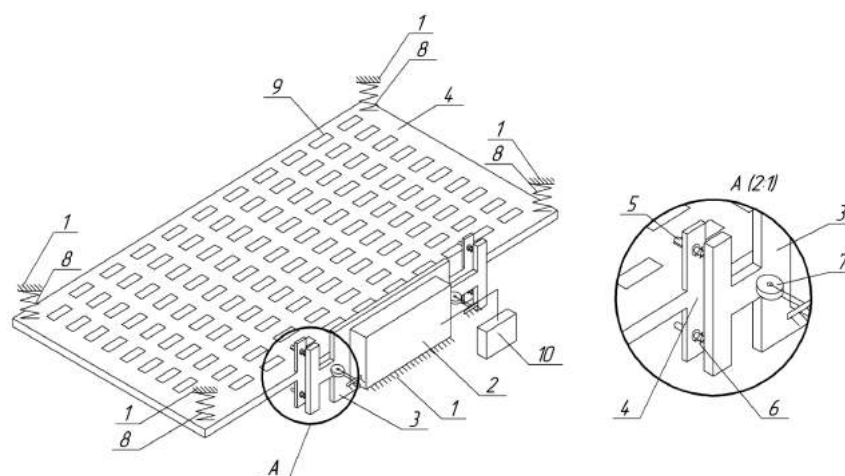
Принцип его работы основан на периодическом подключении ЛАД к источнику питания и отключения от него, при этом обратное свободное движение совершается за счет упругих элементов. Отсутствие в ЛЭП зерноочистительной машины жесткой кинематической связи между индуктором ЛАД и его вторичным элементом, а, следовательно, и с рабочим органом, привело к появлению недостатка, заключающегося в нарушении технологического процесса при изменении технологической нагрузки на поверхности решетчатого стана.

Нарушение технологического процесса объясняется изменением параметров колебательного движения рабочего органа, основ-

ным из которых является максимальное ускорение рабочего органа  $a_{max.p.o.}$  [4, 5].

Существующая система управления, позволяющая ЛЭП зерноочистительной машины работать в автоколебательном режиме и режиме вынужденных колебаний, не способна учитывать изменение технологической нагрузки на поверхности рабочего органа [4, 6]. Исходя из вышесказанного, разработка системы управления, способной поддерживать заданное значение  $a_{max.p.o.}$  является важной задачей.

Предлагаемая система управления ЛЭП зерноочистительной машины состоит из трех основных элементов: датчика ускорения (ДУ), нечеткого регулятора (НР) и системы импульсного управления (СИУ). Датчик ускорения, измеряющий значение ускорения рабочего органа (РО), соединен с НР напрямую и через два блока интегрирования (БИ1, БИ2). Система импульсного управления двумя входами соединена с НР и БИ2, выходом — с тиристорным коммутатором (ТК), питающим ЛАД (рисунок 2). Система функционирует следующим образом. По величине ускорения РО «А» на выходе ДУ в БИ2 вычисляется



1 — основание; 2 — индуктор ЛАД; 3 — вторичный элемент ЛАД;  
4 — рабочий орган; 5 — шток; 6, 8 — упругие элементы;  
7 — ограничивающий ролик; 9 — сепарирующая ячейка; 10 — блок управления

**Рисунок 1.** Линейный электропривод зерноочистительной машины

величина скорости РО «V», затем в БИ1 по величине «V» — перемещение РО «X». При этом величины «X» и «A» являются входом НР, а величина «V» — входом в СИУ. На основании заложенных правил управления в НР вычисляется величина корректирующего воздействия «F», подаваемая на вход СИУ и корректирующая величину управляющего воздействия «Q». СИУ периодически по достижению РО одного из крайних положений осуществляет подключение ЛАД к источнику питания через ТК и отключение от него через некоторое время.

В предлагаемой системе управления ЛЭП зерноочистительной машины применяется регулятор, работа которого основана на использовании нечеткой логики. Его основной задачей является поддержание с заданной точностью  $a_{max.p.o.}$  путем регулирования длительности подключенного состояния ЛАД к питающей сети  $t_{подкл}$ . В среде визуального моделирования MATLAB/SIMULINK с использованием пакета Fuzzy Logic Toolbox реализован НР, работающий по алгоритму Мамдани [7, 8]. Он имеет один выходной и два входных параметра, являющиеся нечеткими множествами. Входные параметры НР

представлены перемещением «X» и ускорением «A» РО зерноочистительной машины на основе ЛАД, а выходной параметр — величиной корректирующего воздействия «F». Используя лингвистические переменные трех нечетких множеств, составлены правила управления, которые записываются словами в виде выражений ЕСЛИ — ТО [4, 7]. Благодаря особенности нелинейного НР, заключающегося в отсутствии динамики в самом регуляторе [7, 8], имеется возможность представления статической характеристики НР в среде визуального моделирования MATLAB/SIMULINK в виде поверхности отклика (рисунок 3). Форма поверхности отклика нелинейного НР зависит не только от составленных правил управления, но и от терм-множеств во всех нечетких множествах. Путем проецирования возможных любых значений двух входных величин «A» и «X» на поверхность отклика нелинейного НР можно визуально оценивать характеристику изменения значения выходного параметра «F».

Кроме НР в системе управления ЛЭП зерноочистительной машины используется СИУ, работающая в импульсном режиме. Она подключает ЛАД к питающей сети на короткое время  $t_{подкл}$ . Значение  $t_{подкл}$  в процессе работы системы регулируется величиной корректирующего воздействия НР. Подключение ЛАД к питающей сети происходит в момент остановки РО в одном из крайних положений, когда скорость РО  $V_{po} = 0$ .

В среде визуального моделирования MATLAB/SIMULINK система управления

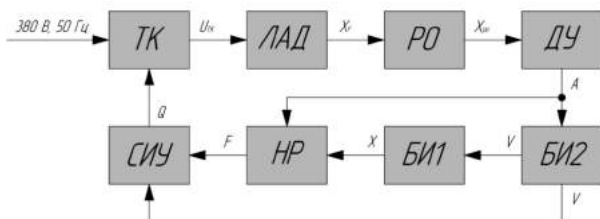


Рисунок 2. Система управления линейным электроприводом зерноочистительной машины

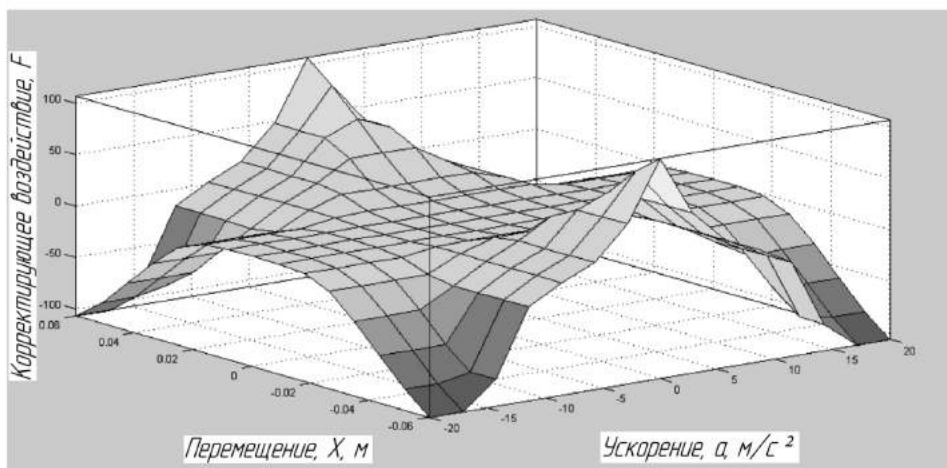
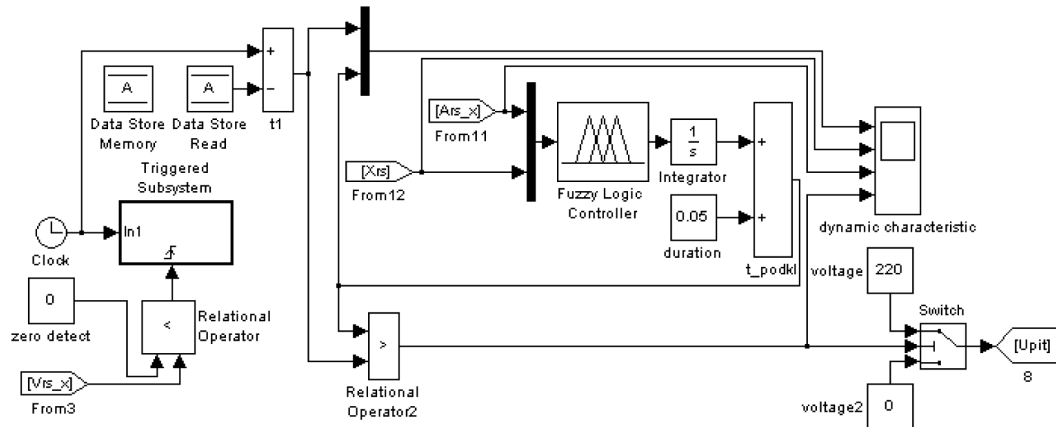


Рисунок 3. Статическая характеристика НР

ЛЭП зерноочистительной машины выглядит следующим образом (рисунок 4).

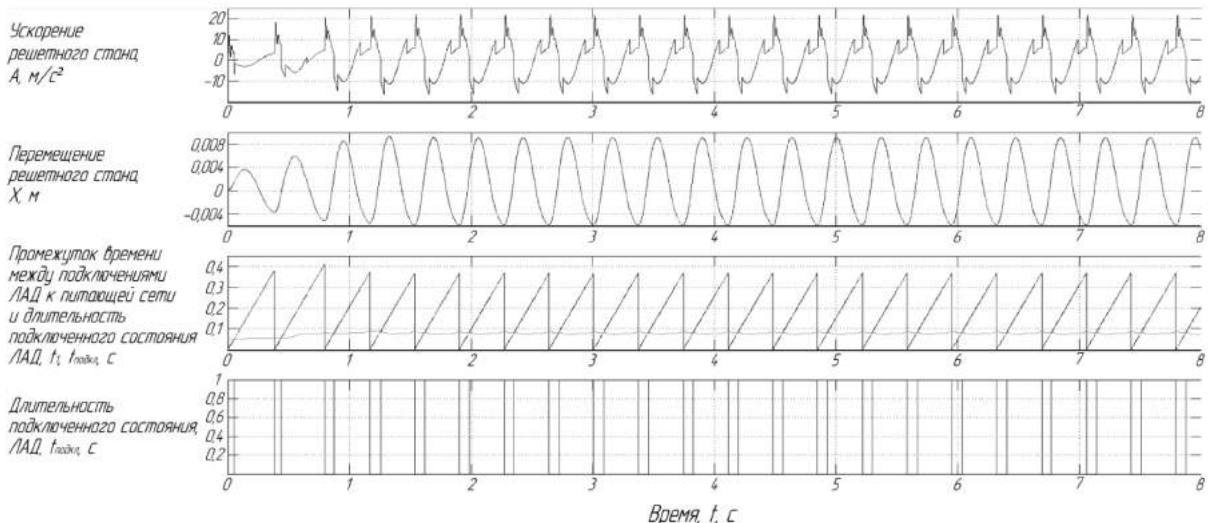
В математической модели системы управления ЛЭП зерноочистительной машины, представленной на рисунке 4, при положительном значении  $V_{rs\_x}$  устанавливается логический сигнал «1» на выходе блока Relational Operator, при отрицательном — логический сигнал «0».

На выходе блока считывания данных из общей области памяти Data Store Read формируется зигзагообразный сигнал. После вычитания значения зигзагообразного сигнала от значения на выходе источника временного сигнала Clock получаем промежуток времени  $t_l$  между подключениями ЛАД к питающей сети. ЛАД находится в подключенном состоянии к питающей сети до тех пор, пока  $t_{подкл} > t_l$  (рисунок 5).



$X_{rs}$  — перемещение РО;  $V_{rs\_x}$  — скорость движения РО;  $A_{rs\_x}$  — ускорение движения РО;  $U_{пит}$  — напряжение питания ЛАД;  $t_l$  — промежуток времени между подключениями ЛАД;  $t_{подкл}$  — длительность подключенного включенного состояния ЛАД

**Рисунок 4.** Математическая модель системы управления линейным электроприводом зерноочистительной машины



**Рисунок 5.** Динамическая характеристика работы СИУ



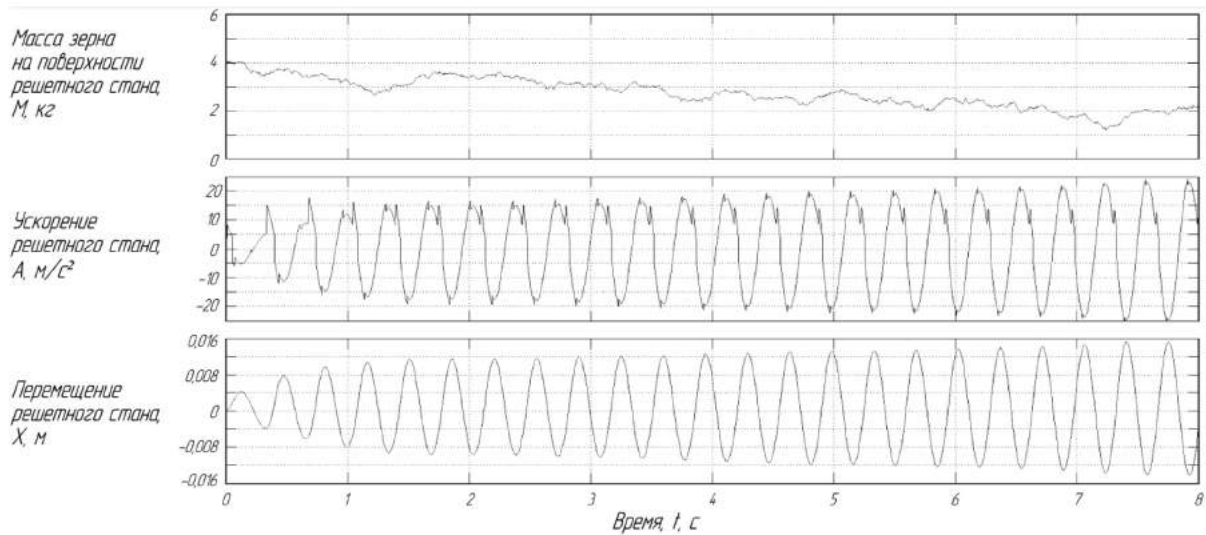


Рисунок 6. Зависимость параметров колебательного процесса решетного стана без использования НР

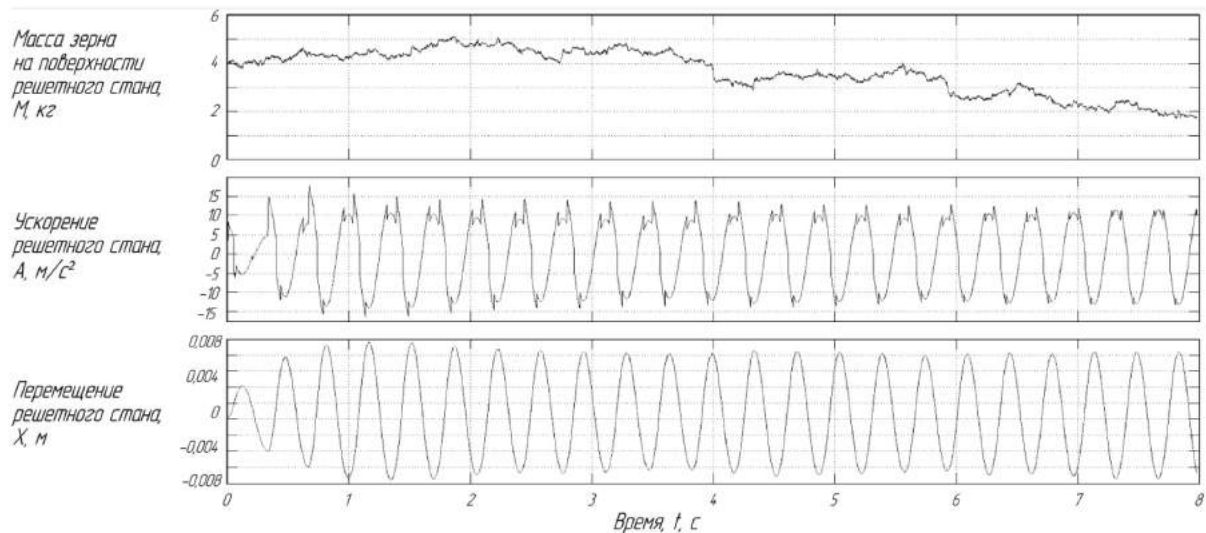


Рисунок 7. Зависимость параметров колебательного процесса решетного стана с использованием НР

ние массы зерна на поверхности рабочего органа приводит к увеличению значений амплитуды и  $a_{max.p.o.}$ . При этом, исходя из рисунка 6, превышение после 8 с работы

ЛЭП зерноочистительной машины значения  $a_{max.p.o.} = 25 \text{ м/с}^2$  приводит к нарушению автоколебательного режима работы.

### Список литературы

1. Туктаров М.Ф., Байназаров В.Г. Повышение эффективности работы зерноочистительной машины // Матер. междунар. науч.-практ. конф., посвящённой 85-летию Башкирского государственного аграрного университета, в рамках XXV Междунар. специализир. выставки «Агрокомплекс — 2015». Уфа: Башкирский ГАУ, 2015. С. 40–43.
2. Аипов Р.С., Линенко А.В., Байназаров В.Г. Методологические основы разработки коле-

бательного линейного асинхронного привода как мехатронной системы // Механизация и электрификация сельского хозяйства. М., 2016. № 1. С. 20–22.

3. Пат. 2576460 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01 F 12/44. Сепарирующая машина / А.В. Линенко, М.Ф. Туктаров, В.Г. Байназаров, Т.И. Камалов. 2015106203/13; заявл. 24.02.2015; опубл. 10.03.2016. Бюл. № 7. 8 с.



4. Туктаров М.Ф., Байназаров В.Г. Система управления линейным электроприводом зерноочистительной машины с нечетким регулятором // Матер. Междунар. молодежн. науч.-практ. конф. Уфа, 2016. Ч. II. С. 123–126.

5. Патрин В.А., Патрин А.В. Графическая модель послойного течения зерна на плоских колеблющихся решетках. 2012. № 1 (22). С. 118–123.

6. Линенко А.В. Линейные асинхронные электроприводы сложного колебательного движения для технологических машин АПК. Уфа: БашГАУ, 2015. 184 с.

7. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Киев: Радиоматор, 2008. 978 с.

8. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БВХ-Петербург, 2005. 736 с.

### References

1. Tuktarov M.F., Baynazarov V.G. Povyshenie jeffektivnosti raboty zernoochistitel'noj mashiny // Mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvjashhjonnoj 85-letiju Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, v ramkah XXV Mezhdunar. specializer. vystavki «Agrokompleks — 2015». Ufa: BashGAU, 2015. С. 40–43.

2. Aipov R.S., Linenko A.V., Baynazarov V.G. Metodologicheskie osnovy razrabotki kolebatel'nogo linejnogo asinhronnogo privoda, kak mehatronnoj sistemy // Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. M., 2016. № 1. S. 20–22.

3. Pat. 2576460 Rossijskaja Federacija, MPK<sup>7</sup> A 01 F 12/44. Separirujushhaja mashina / A.V. Linenko, M.F. Tuktarov, V.G. Baynazarov, T.I. Kamalov. 2015106203/13; zajavl. 24.02.2015; opubl. 10.03.2016. Bjul. № 7. 8 s.

4. Tuktarov M.F., Baynazarov V.G. Sistema upravlenija linejnym jelektroprivodom zernoochistitel'noj mashiny s nechetkim reguljatorom // Mater. Mezhdunar. molodezh. nauch.-prakt. konf. Ufa, 2016. Ch. II. S. 123–126.

5. Patrin V.A., Patrin A.V. Graficheskaja model' poslojnogo techenija zerna na ploskih kolebljushhihsja reshetah. 2012. № 1 (22). S. 118–123.

6. Linenko A.V. Linejnye asinhronnye jelektroprivody slozhnogo kolebatel'nogo dvizhenija dlja tehnologicheskikh mashin APK. Ufa: BashGAU, 2015. 184 s.

7. Gostev V.I. Nechetkie reguljatory v sistemah avtomaticheskogo upravlenija. Kiev: Radiomator, 2008. 978 s.

8. Leonenkov A.V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH. SPb.: BVH-Peterburg, 2005. 736 s.



**Копылов К. Н.**  
**Korylov K. N.**  
технический  
директор  
АО «СУЭК»,  
г. Москва,  
Российская  
Федерация



**Решетняк С. Н.**  
**Reshetnyak S. N.**  
старший научный сотрудник, ФГБУН  
«Институт проблем комплексного  
освоения недр» Российской академии  
наук, кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Энергетика  
и энергоэффективность горной  
промышленности», ФГАОУ ВО  
«Национальный исследовательский  
технологический университет  
«МИСиС», г. Москва,  
Российская Федерация



**Кубрин С. С.**  
**Kubrin S. S.**  
доктор технических  
наук, профессор,  
заведующий Лабораторией  
геотехнологических рисков  
освоения недр, ФГБУН  
«Институт проблем  
комплексного освоения  
недр» Российской академии  
наук, г. Москва,  
Российская Федерация

УДК 622:621.31

## ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ВЫЕМОЧНОГО КОМБАЙНА УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

Использование современных высокопроизводительных выемочных комплексов для добычи угля достаточно обосновано высокой конкуренцией на мировом рынке и значительно влияет на себестоимость производимой продукции. Однако использование высокопроизводительных выемочных комплексов должно быть связано с повышенной энергоэффективностью, что обеспечивается энергоэффективными режимами работы систем электроприводов, входящих в состав этого комплекса. Под энергоэффективными режимами понимают режимы с минимальным потреблением и максимальной производительностью. Однако следует отметить, что такие режимы должны быть достаточно обоснованы под конкретные технологические особенности выемки угля конкретным предприятием. Под технологическими особенностями следует понимать ряд параметров, ограничивающих скорость продвижения забоя, в частности метановыделение забоя и транспортируемого угля. В случае превышения метана в забое происходит автоматическое отключение выемочного участка от источника электрической энергии, что обусловлено простоем оборудования. На угольных шахтах АО «СУЭК» достаточно хорошо себя зарекомендовали высокопроизводительные выемочные комплексы компании Eickhoff, в частности выемочный комплекс Eickhoff SL-300, который используется на шахте «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс». В работе представлена эволюция развития этого комплекса, который имеет 4 модификации и отличается уровнем питающего напряжения, уровнем мощности и системами электроприводов механизмов подачи, а также производительностью. В статье представлена структурная схема высокопроизводительного выемочного комплекса Eickhoff SL-300 и основные характеристики электроприводов различных механизмов. Также произведен расчет передаточных функций механизмов подачи, резания, гидравлической системы выемочного комплекса Eickhoff SL-300 с целью дальнейшего имитационного моделирования и исследованию различных режимов работы для определения оптимального по критериям повышенной энергоэффективности и промышленной безопасности на шахтах опасных по внезапным выбросам газа и пыли. Целью имитационного моделирования будет являться разработка методики определения оптимальных режимов работы высокопроизводительных выемочных комплексов угольных шахт.

**Ключевые слова:** выемочный комбайн, добыча угля, Eickhoff SL-300, система управления электроприводов, органы резания, органы подачи, энергоэффективность, передаточная функция, метановыделение, пылеобразование.

## WAY OF COAL MINING COMPLEX MODERNIZATION

The use of modern high-performance mining complexes for extraction of coal, reasonably high competition on the world market and significantly affects the cost of production. However, the use of high-performance mining complexes should be associated with increased energy efficiency that is provided by energy efficient modes of operation of the drive system are part of this complex. For energy-efficient modes understand the modes with minimum energy consumption and maximum performance. However, it should be noted that such regimes should be appropriate for the specific technological features of coal mining specific enterprise. Under the technological features bounding the parameters of energy efficiency is the speed of advance of slaughter, in particular methane release slaughter and transported coal. In case of excess of methane in the mine is turned off automatically extraction area from the source of electrical energy, due to the downtime. At coal mines of JSC «SUEK» are quite well established high-performance mining systems of the company Eickhoff in the frequency extraction complex Eickhoff SL-300, which is used at the mine «Polysaevskaya». The paper presents the evolution of this complex, which has 4 modifications, and different levels of the supply voltage, a level of power and systems of electric drives of feeders, as well as performance. The article presents a structural scheme of the high-performance mining complex Eickhoff SL-300 and the main characteristics of electric drives of different mechanisms. There is also a calculation of the transfer functions of mechanisms for feeding, cutting, hydraulic system, coal-mining complex Eickhoff SL-300, for further simulation and study of different modes of operation to determine the optimum criteria of high efficiency and safety in mines, dangerous on sudden emissions of gas and dust. The purpose of simulation will be to develop methods for determining optimal modes of operation of high-performance mining complexes in coal mines.

**Key words:** harvester mining, coal mining, Eickhoff SL-300, control system actuators, the organs of cut, the organs of supply, energy efficiency, transfer function, methane release; dusting.

В последнее время достаточно остро стоит вопрос о возможной модернизации выемочного механизированного комплекса за счет энергоэффективных режимов работы и снижения простоев оборудования, связанных с технологическими особенностями. Под энергоэффективными режимами работы следует понимать режимы с минимальным потреблением электроэнергии и максимальной производительностью. Под технологическими особенностями следует понимать ряд параметров, ограничивающих скорость продвижения забоя, в частности метановыделение забоя и транспортируемого угля. В случае превышения метана в забое происходит автоматическое отключение выемочного участка от снабжения электроэнергией. Достаточно актуальной задачей является разработка «безлюдной выемки», что позволит вывести персонал выемочного участка из забоя в безопасное место.

В частности, на шахте «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс» реализован режим частичной «безлюдной выемки» посредством применения выемочного комплекса Eickhoff SL-300, шахтной крепи FRS Glinik-12/25, забойного конвейера FFC-9 Glinik, штрекового перегружателя FSL-9 Glinik, дробильной установки FLB-10G Glinik при использовании программного обеспечения EIControlSB. Станция дистанционного управления выемкой угля располагается в вентиляционном штреке в 50 м от лавы, что позволяет дистанционно контролировать процесс добычи угля. Обмен данными между станцией управления и механизированным комплексом осуществляется с помощью скоростной линии. Также на выемочном комплексе EickhoffSL-300 установлены дополнительные видеокамеры с прожекторной подсветкой и дополнительные датчики, сенсоры [1].

В настоящее время имеется 4 модификации данного комплекса, различие которых заключается в уровне питающего напряжения, мощности и системы электроприводов механизмов подачи [2]. Изначально, в 1994 году, установленная мощность комплекса EickhoffSL-300 составляла 528 кВт, впоследствии мощности электроприводов органов резания и механизма подачи были значительно увеличены. Схема выемочного комбайна включала в себя нерегулируемые системы электроприводов органов резания и гидравлической системы комбайна, выполненные с использованием асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, и регулируемую систему управления электроприводов органов подачи, выполненную с использованием двигателей постоянного тока, подключенных к управляемым выпрямителям. Впоследствии система управления электроприводов органов подачи с системы «Управляемый выпрямитель — двигатель постоянного тока» была заменена на систему управления электроприводов «Преобразователь частоты — двигатель». Отказ от применения системы «Управляемый выпрямитель — двигатель постоянного тока» достаточно обусловлено

сложностью обслуживания электродвигателей постоянного тока в условиях подземных горных работ, появляется необходимость регулярно с определенной периодичностью чистить щеточно-коллекторный узел двигателя постоянного тока.

Схема электроснабжения выемочного комплекса EickhoffSL-300 (вариант 4) представлена на рисунке 1.

Органы резания выемочного комплекса EickhoffSL-300 (вариант 4) выполнены с использованием высоковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, подключенных прямым пуском к питающей линии. Скорость вращения ротора электродвигателя органов резания при такой схеме управления — постоянная. Система управления электроприводов органов подачи выемочного комплекса выполнена на основе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, подключенных к частотному преобразователю REFU C 085614z (полная мощность 115 кВт, регулируемая частота от 0 до 120 Гц). В состав выемочного комплекса входит понижающий трансформатор на напряжение первичной обмотки 3300 В и напряжением вторичных обмоток 660 В (для питания электроприводов гидравлической

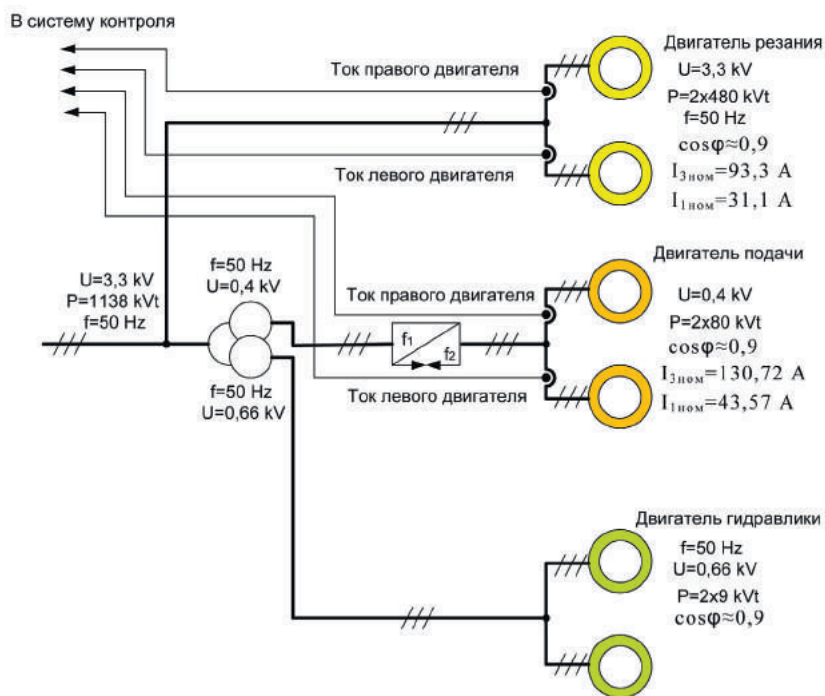


Рисунок 1. Схема электроснабжения выемочного комбайна EickhoffSL-300 (вариант 4)



системы) и 380 В (для питания преобразователя частоты системы управления подачей выемочного комплекса) [3, 4].

Инновационная схема автоматизации выемочного комплекса заключается в построении управляемых систем электроприводов подачи и органов резания, а их управление подчиненное. Это позволит значительно расширить диапазон управления выемочным комбайном, что снизит простой оборудования по технологическим особенностям добычи угля (ограничение по метановыделению в забое). При этом использовать систему управления только подачи, как имеется в настоящее время, нецелесообразно, так как при снижении скорости подачи и одинаковом числе оборотов шнека, уголь будет иметь мелкую фракцию «штыб», что значительно увеличит метановыделение в забое. Поэтому необходимо изменять регулируемую скорость подачи комбайна и число оборотов шнека, что возможно при управляемой системе электроприводов органа резания. Регулирование режимов работы органов подачи и органов резания должно осуществляться в автоматическом режиме, что возможно с использованием обратных связей (по току, скорости и т.д.) систем электроприводов и построением единой схемы подчиненного управления выемочным комбайном. Такая схема позволит исключить влияние человеческого фактора, который присутствовал во всех процессах угледобычи, при определении загрузки электродвигателей органов резания и подбора необходимой скорости подачи выемочного комплекса.

Немаловажным фактором, влияющим на производительность выемочного комплекса, является процесс выделения метана при добыче угля. Основным источником метано-

выделения в призабойном пространстве лавы является обрабатываемый пласт. Установлено, что значительное влияние на метановыделение и пылеобразование в процессе работы механизированного выемочного комплекса оказывает величина фракций. Чем больше фракция, тем меньше метановыделение [5, 6]. Для оптимизации режимов работы выемочного комплекса предлагается в систему управления электроприводами выемочного комплекса ввести сигналы управления от датчиков метана, расположенных как непосредственно на выемочном комбайне, так и установленных на очистном участке (кутковый датчик, забойный датчик), что позволит отслеживать метановыделение и в автоматическом режиме регулировать производительность выемочного комплекса.

Все это позволяет сделать вывод об актуальности модернизации выемочного комплекса путем разработки новых систем электроприводов органов резания и подачи подчиненного регулирования, что в значительной мере скажется на себестоимости угля, добываемого подземным способом, а также позволит значительно повысить надежность основного оборудования выемочного участка угольной шахты.

В таблице 1 представлены основные параметры электродвигателей выемочного комплекса Eickhoff SL-300 (вариант 4).

Эти параметры позволяют произвести описание систем электроприводов различных механизмов выемочного комбайна с целью исследования их режимов и определения наиболее энергоэффективных из них.

На рисунке 2 представлена структурная схема систем электроприводов выемочного комбайна Eickhoff SL-300 (вариант 4). Анализ работы этих систем электроприводов позво-

**Таблица 1.** Основные параметры электродвигателей выемочного комплекса Eickhoff SL-300 (вариант 4)

№	Наименование параметра двигателя	C 150347	C 150378	C 150178
1	Название двигателя (полное)	DEW64 ESM420	A5W200M42	dWaE20/2-4
2	Число пар полюсов	2	2	4
3	Скорость вращения магнитного поля статора (об./мин)	1500	1500	750
4	Напряжение питания (В)	3300	460	660
5	Номинальный ток (трехфазный) (А)	100	130	12,9/15,9
6	Мощность (кВт)	480	80	9/11
7	Коэффициент мощности	0,85	0,85	0,85
8	Степень защиты	IP54	IP54	IP54

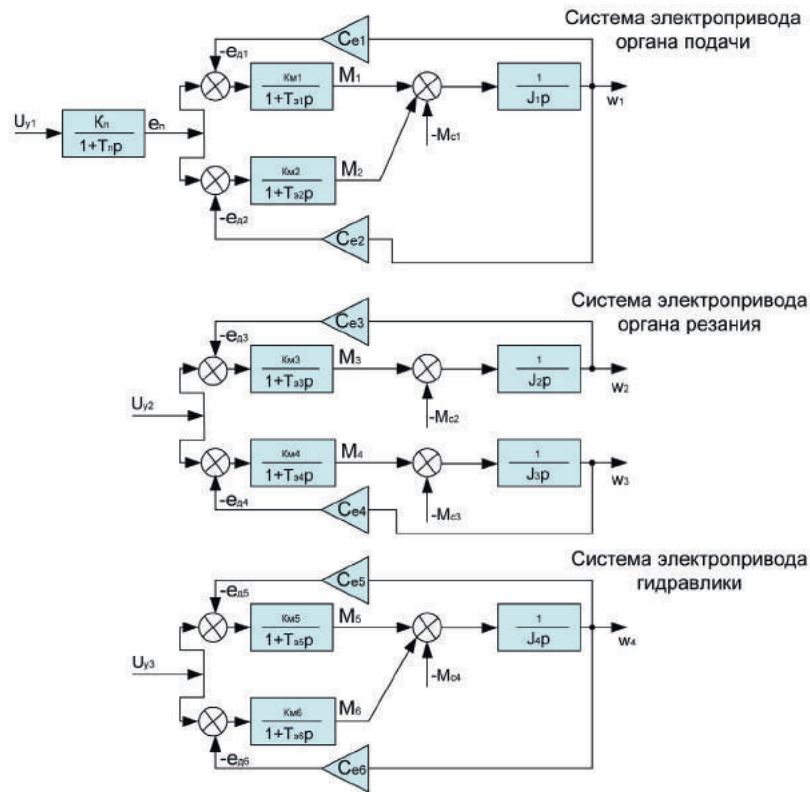


Рисунок 2. Структурная схема систем электроприводов выемочного комбайна Eickhoff SL-300 (вариант 4)

лил получить их математические модели в виде передаточных функций. Математические модели и методы информационно-аналитических систем позволяют провести имитационное моделирование выемочного комплекса [7, 8]. Передаточная функция системы электропривода органа подачи имеет вид:

$$W_{y1}(p) = \frac{(1+pT_n)(1+pT_{31})(1+pT_{32})J_1p + C_{e1}C_{e2}K_{\Pi}K_{M1}K_{M2}}{K_{\Pi}K_{M1}K_{M2}}$$

где  $T_n$  — постоянная времени преобразователя;  $T_{31}$  — постоянная времени первого двигателя органа подачи;  $T_{32}$  — постоянная времени второго двигателя органа подачи;  $C_{e1}$  — внутренняя отрицательная обратная связь по ЭДС первого двигателя органа подачи;  $C_{e2}$  — внутренняя отрицательная обратная связь по ЭДС второго двигателя органа подачи;  $K_{\Pi}$  — коэффициент преобразователя;  $K_{M1}$  — электромеханический коэффициент первого двигателя органа подачи;  $K_{M2}$  — электромеханический коэффициент второго двигателя органа подачи;  $p$  — оператор  $d/dt$ .

Передаточная функция системы электропривода органа резания имеет вид:

$$W_{y2}(p) = \frac{K_{M3}}{(1+p^2T_{33}J_2) + C_{e3}K_{M3}} + \frac{K_{M4}}{(1+p^2T_{34}J_3) + C_{e4}K_{M4}},$$

где  $T_{33}$  — постоянная времени первого двигателя органа резания;  $T_{34}$  — постоянная времени второго двигателя органа резания;  $C_{e3}$  — внутренняя отрицательная обратная связь по ЭДС первого двигателя органа резания;  $C_{e4}$  — внутренняя отрицательная обратная связь по ЭДС второго двигателя органа резания;  $K_{M3}$  — электромеханический коэффициент первого двигателя органа резания;  $K_{M4}$  — электромеханический коэффициент второго двигателя органа резания;  $J_2$  — приведенный момент инерции первого двигателя органа резания, включая момент инерции двигателя, редуктора, шнека;  $J_3$  — приведенный момент инерции второго двигателя органа резания, включая момент инерции двигателя, редуктора, шнека.

Передаточная функция системы электропривода гидравлической системы имеет вид:

$$W_{y3}(p) = \frac{(1+pT_{35})(1+pT_{36})J_4p + C_{e5}C_{e6}K_{M5}K_{M6}}{K_{M5}K_{M6}}$$

где  $T_{35}$  — постоянная времени первого двигателя;  $T_{36}$  — постоянная времени второго двигателя;  $C_{e5}$  — внутренняя отрицательная

обратная связь по ЭДС первого двигателя;  $C_{e6}$  — внутренняя отрицательная обратная связь по ЭДС второго двигателя;  $K_{m5}$  — электромеханический коэффициент первого двигателя;  $K_{m6}$  — электромеханический коэффициент второго двигателя;  $J_4$  — приведенный момент инерции включая момент инерции двигателя, насоса.

### Список литературы

1. Томас Б. Автоматизация EICKOFF гарантирует безопасность и качество — в России ввели в эксплуатацию первую лаву, работающую в автоматическом режиме // Уголь. 2015. № 10. С. 22-23.
2. Очистные комбайны / С.В. Ясученя, К.Н. Копылов, В.Б. Артемьев, В.Н. Демур, А.В. Мутыгулин. М.: Изд-во «Горное дело», 2014. 576 с.
3. URL: <http://www.eickhoff-bochum.de/ru/node/21>.
4. URL: <http://www.eickhoff-bochum.de/ru/node/125>.
5. Проблемы обеспечения высокой производительности очистных забоев в метанообильных шахтах / А.Д. Рубан, В.Б. Артемьев, В.С. Забурдяев, Г.С. Забурдяев, Ю.Ф. Руденко. М.: Изд-во ООО «Московский издательский дом», 2009. 396 с.
6. Каплунов Д.Р., Калмыков В.Н., Рыльникова М.В. Комбинированная геотехнология. М.: Руда и металлы, 2003. 560 с.
7. Кубрин С.С. Теоретико-информационный анализ систем управления запасами и их отработкой с учетом конкурентной способности углей. М.: Энергоатомиздат, 2002. 182 с.
8. Кубрин С.С. Математические модели и методы информационно-аналитических систем. М.: Энергоатомиздат, 2002. 132 с.

### Вывод

Полученные передаточные функции позволяют моделировать различные режимы работы систем управления электроприводами выемочного комбайна, а также возможность применения более совершенных систем управления электроприводами по критерию повышенной энергоэффективности.

### References

1. Tomas B. Avtomatizacija EICKOFF garantiruet bezopasnost' i kachestvo — v Rossii vveli v jekspluataciju pervuju lavu, rabotajushhiju v avtomaticheskom rezhime // Ugol'. 2015. № 10. S. 22-23.
2. Ochistnye kombajny / S.V. Jasuchenja, K.N. Kopylov, V.B. Artem'ev, V.N. Demura, A.V. Mutygulin. M.: Izd-vo «Gornoe delo», 2014. 576 s.
3. URL: <http://www.eickhoff-bochum.de/ru/node/21>.
4. URL: <http://www.eickhoff-bochum.de/ru/node/125>.
5. Problemy obespechenija vysokoj proizvoditel'nosti ochistnyh zaboev v metanoobil'nyh shahtah / A.D. Ruban, V.B. Artem'ev, V.S. Zaburdjaev, G.S. Zaburdjaev, Ju.F. Rudenko. M.: Izd-vo ООО «Moskovskij izdatel'skij dom», 2009. 396 s.
6. Kaplunov D.R., Kalmykov V.N., Ryl'nikova M.V. Kombinirovannaja geotehnologija. M.: Ruda i metally, 2003. 560 s.
7. Kubrin S.S. Teoretiko-informacionnyj analiz sistem upravlenija zapasami i ih otrabotkoj s uchetom konkurentnoj sposobnosti uglej. M.: Jenergoatomizdat, 2002. 182 s.
8. Kubrin S.S. Matematicheskie modeli i metody informacionno-analiticheskikh sistem. M.: Jenergoatomizdat, 2002. 132 s.



**Суханов П. И.**  
**Suhanov P. I.**

*начальник отдела аварийно-восстановительных работ на линиях электропередачи Департамента воздушных линий ПАО «ФСК ЕЭС», г. Москва, Российская Федерация*



**Савотин О. А.**  
**Savotin O. A.**

*начальник отдела линий электропередачи Филиала АО «НТЦ ФСК ЕЭС» — СибНИИЭ, г. Новосибирск, Российская Федерация*



**Павлов А. И.**  
**Pavlov A. I.**

*ведущий инженер отдела линий электропередачи Филиала АО «НТЦ ФСК ЕЭС» — СибНИИЭ, г. Новосибирск, Российская Федерация*



**Репин А. И.**  
**Repin A. I.**

*кандидат технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела линий электропередачи Филиала АО «НТЦ ФСК ЕЭС» — СибНИИЭ, г. Новосибирск, Российская Федерация*

УДК 621.315.1.

## **УНИВЕРСАЛЬНАЯ БЫСТРОМОНТИРУЕМАЯ ОПОРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АВАРИЙНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ**

В связи со значительным износом воздушных линий (ВЛ) задача разработки комплекта для сборки и установки быстромонтируемых опор (опор аварийного резерва) при проведении аварийно-восстановительных работ на ВЛ 220–500 кВ является актуальной в настоящее время.

В рамках договора филиал АО «НТЦ ФСК ЕЭС» — СибНИИЭ выполняет разработку комплекта для сборки и установки быстромонтируемых опор на ВЛ.

Комплект для сборки быстровозводимых опор состоит из однотипных составных частей, фундаментов, механизмов и приспособлений для монтажа, такелажа и инструментов.

Комплект универсальный и предназначен для использования на всей территории РФ в различных климатических, геологических и геоморфологических условиях. Комплект позволяет проводить аварийно-восстановительные работы на ВЛ напряжением 220, 330 и 500 кВ. В зависимости от учитываемых параметров изменяется только монтажная схема опоры при неизменных сборочных элементах.

Полный сборочный комплект опор размещен в стандартных металлических автомобильных контейнерах. Такое размещение позволяет упростить хранение и доставку комплекта,



а также сократить время сборов и подготовки к выезду на место аварийно-восстановительных работ.

Количество сборочных элементов в составе комплекта рассчитано на возможность одновременной установки трех одноцепных или двух двухцепных опор 220–330 кВ, либо на сборку и установку двух порталных опор 330 или 500 кВ.

Комплект опоры отвечает основным положениям концепции быстромонтируемых опор (опор аварийного резерва):

- быстрый монтаж с использованием легких монтажных механизмов;
- компактность в собранном виде и возможность быстрой доставки на место;
- универсальность и возможность многократного использования.

Данная разработка является инновационной на территории РФ и способна заменить множество различных типов быстромонтируемых опор, используемых на сегодняшний день.

**Ключевые слова:** высоковольтные линии электропередачи, опоры, изолирующие траверсы, стойка, временные, быстровозводимые и демонтируемые опоры.

## EMERGENCY RESTORATION KIT FOR RESTORING FAULTY OVERHEAD TRANSMISSION LINES

The article discusses problem of the development Emergency Restoration Kit (ERK) that is used to quick restore faulty overhead transmission lines 220, 300, 500 kV.

There is the contract between the PJSC «FGC UES» and JSC «R&D FGC UES» of research and development Emergency Restoration Kit for overhead power lines, which is used instead of standard stationary towers.

The kit consists of similar components, foundations, mechanisms and tools for installation, and rigging tools.

ERK is a universal package and is developed for the application on the whole territory of the Russian Federation with various climatic, geological and geomorphological conditions. The only thing that changes is setup diagram.

Packed kit is a system of containers with regular wooden and steel boxes for vehicles. The main task is reducing time of assembling.

The number of assembly elements in the kit is designed for the simultaneous installation of three single-circuit or two double-circuit towers 220–330 kV or the assembly and installation of two gantry towers 330 or 500 kV.

ERK satisfies the basic regulations of the concept of its mission (towers of emergency inventory):

- rapid installation using lightweight erecting mechanisms;
- compact storage and the possibility of rapid delivery to the site;
- universality and reusability.

Nowadays the product is innovative in the Russian Federation and is able to replace many different types of towers of emergency inventory.

**Key words:** overhead transmission lines, transmission tower, insulator modular assembly, pole, emergency restoration towers.

### Введение

В связи со значительным износом воздушных линий (ВЛ) возрастает вероятность аварийного выхода опор из строя. При выходе опор из строя требуется их замена в максимально сжатые сроки.

Таким образом, задача разработки комплекта для сборки и установки быстромонтируемых опор (БМО) (опор аварийного резерва) при проведении аварийно-восстано-

вительных работ на ВЛ 220 кВ и выше является актуальной в настоящее время.

Для решения поставленной задачи в 2016–2017 гг. выполняется НИОКР «Разработка быстромонтируемых опор (опор аварийного резерва) для проведения аварийно-восстановительных работ на ВЛ 220–500 кВ».

Комплект для сборки и установки быстромонтируемых опор может быть использован не только при проведении аварийно-восстановительных работ по замене поврежденных

опор воздушных линий напряжением 220–500 кВ (при авариях на линиях), но и в работах по проектированию временных обводных участков линий для реконструкции или ремонта отдельных опор или участков одноцепных или двухцепных воздушных линий, а также для временных перезаводов ВЛ при реконструкциях ПС.

### *1. Основные положения, учитываемые при разработке комплекта*

Опоры аварийного резерва должны иметь возможность быстрого разворачивания при использовании легких монтажных механизмов, такелажа и средств малой механизации. При разработке комплекта для сборки и установки опор аварийного резерва были учтены следующие основные требования [1, 2]:

- отсутствие использования заглубленных в грунте железобетонных или других массивных фундаментов;

- компактность в собранном и всегда готовом для транспортировки к месту аварии виде. Комплект быстромонтируемой опоры должен включать все необходимые для монтажа приспособления, инструменты и механизмы. Возможность быстрой доставки всего комплекта, в том числе в отдаленные районы;

- возможность многократного использования комплектов быстромонтируемых опор;

- компоненты опоры должны иметь максимальную заводскую готовность. На строительной площадке компоненты опоры должны соединяться без использования тяжелой строительной техники;

- конструкция закрепления опоры (или какой-либо ее части) в грунте должна обеспечивать возможность выполнения работ при помощи техники, входящей в комплект быстромонтируемой опоры, либо может быть доставлена на трассу без организации специальных подъездных путей и использования специального транспорта;

- конструкция быстромонтируемых опор должна быть выполнена аналогично типовым опорам (расположение фаз, размеры до мест крепления проводов) для обеспечения их установки в существующем коридоре ЛЭП, по возможности без разрезания проводов;

- длина одной секции опоры не должна превышать 3 м;

- масса одной секции опоры не должна превышать 150 кг;

- сборка быстромонтируемой опоры должна осуществляться без использования спецтехники (кран, подъемник и т.п.).

### *2. Описание комплекта и основных элементов*

Комплект на сборку быстровозводимых опор состоит из однотипных составных частей опоры, фундаментов, механизмов и приспособлений для монтажа, такелажа и инструментов.

Полный сборочный комплект опор укомплектован в 2–3 стандартных автомобильных контейнера. Такое размещение комплекта позволяет упростить хранение, доставку и сократить время сборов и подготовки к выезду на место аварийно-восстановительных работ.

Количество сборочных элементов в составе комплекта рассчитано на возможность одновременной установки трех одноцепных или двух двухцепных опор 220, 330 кВ, либо на сборку и установку двух порталных опор 330, 500 кВ.

Комплект состоит из следующих основных сборочных элементов:

- типовая секция стойки;
- опорная секция стойки;
- опорные и подвесные изоляторы для изолирующих и цепных траверс;
- узлы крепления траверс и оттяжек к стойке;
- трос для оттяжек;
- комплект линейной арматуры;
- комплект метизов;
- фундаменты оттяжек.

Основная секция стойки опоры представляет собой сварную пространственную решетчатую конструкцию, выполненную из типового, широко распространенного уголкового проката. Секции стойки квадратного сечения. Материал секции сталь. Стальные конструкции разработаны с учетом требований действующей нормативной документации [3]. Массогабаритные характеристики позволяют производить выгрузку, сборку и монтаж без применения тяжелой техники. Опорные и подвесные изоляторы, а также линейная арматура являются стандартными

изделиями заводского изготовления, изготовление по индивидуальному заказу не требуется. В комплект могут быть включены один или несколько типов фундаментов под оттяжки в зависимости от конкретной потребности для разнообразных грунтовых условий.

Также в состав комплекта входят следующие основные инструменты и приспособления для сборки и монтажа опор:

- скользящая монтажная кран-мачта для посекционного монтажа стойки методом наращивания или монтажной мачты для монтажа методом подрачивания;

- монтажные площадки для работы на высоте;

- комплект подъемных механизмов (грузовые лебедки, монтажно-тяговые механизмы);

- комплект ручного инструмента;

- комплект страховочных приспособлений для работы на высоте.

По требованию заказчика в комплект быстромонтируемой опоры могут быть дополнительно включены специальные механизмы и средства малой механизации.

### *3. Область применения разрабатываемого комплекта*

Использование комплекта для сборки и установки быстромонтируемых опор наиболее актуально при прохождении ВЛ в удаленных и труднодоступных местностях, доставка новых конструкций в которые или их монтаж носят сезонный характер. Использование быстромонтируемых опор актуально и в тех случаях, когда по различным причинам не возможно быстрое восстановление электрооборудования с использованием стационарных опор. Комплект предназначен для временного восстановления электрооборудования на аварийном участке до момента замены поврежденных стационарных опор.

Комплект для сборки и установки быстромонтируемых опор предназначен для использования на всей территории РФ, включая территории со сложными климатическими, геоморфологическими и геологическими условиями.

#### *Класс напряжения ВЛ*

Состав комплекта универсальный и позволяет проводить аварийно-восстановительные работы на ВЛ 220, 330 и 500 кВ.

#### *Провода и грозозащитный тросы*

БМО для ВЛ 220 кВ рассчитаны на подвеску одного провода в фазе следующих марок: АС 300/39, АС 400/51.

БМО для ВЛ 330 кВ рассчитаны на подвеску двух проводов в фазе следующих марок: АС 300/39 и АС 400/51.

БМО для ВЛ 500 кВ рассчитаны на подвеску трех проводов в фазе следующих марок: АС 300/39 и АС 400/51.

БМО рассчитаны на подвеску одного грозозащитного троса марки 11.0-МЗ-В-ОЖ-Н-Р.

На БМО допускается подвеска двух грозозащитных тросов или одного грозозащитного троса совместно с оптическим кабелем ОКСН с уменьшением расчетных пролетов.

#### *Климатические условия*

На этапе конструирования и расчетов схем быстромонтируемых опор в качестве базовых приняты наиболее распространенные климатические условия (с учетом расположения существующих ВЛ 220-500 кВ на территории РФ) [4]:

- район по ветру — III (ветровое давление 650 Па);

- район по гололеду — III (толщина стенки гололеда 20 мм).

При использовании БМО в климатических условиях, превышающих расчетные, необходимо уменьшать расчетные пролеты за счет увеличения числа БМО.

#### *Грунтовые условия*

Комплект для сборки и установки быстромонтируемой опоры предназначен для использования на всей территории РФ в широком спектре грунтовых условий [5].

Фундаменты БМО рассчитаны на закрепление в наиболее характерных группах грунтов:

- нормальные грунты: мелкие пески, супеси полутвердые, суглинки и глины в тугопластичном состоянии;

- слабые грунты: пески пылеватые, супеси пластичные, суглинки и глины в текучепластичном состоянии;

- дисперсные несвязные грунты: пески гравелистые;

- прочные скальные грунты, характеризующиеся расчетным сопротивлением на одноосное сжатие равным 50 МПа;

— вечномерзлые грунты: пластичномерзлые глинистые грунты.

Для различных групп грунтов предусмотрены следующие типы фундаментов для закреплений оттяжек:

- стальные анкерные плиты;
- грунтовые анкеры Manta Ray;
- винтовые сваи;
- анкерные болты (скальные болты).

#### 4. Описание основных сборочных схем

Комплект для сборки и установки состоит из типовых сборочных элементов. В зависимости от внешних условий и типа стационарной аварийной опоры изменяются сборочные схемы и количество используемых опор БМО.

Разработаны две основные сборочные схемы БМО: одностоечные опоры на оттяжках одно- или двухцепные для ВЛ 220, 330 кВ и порталные одноцепные опоры на оттяжках для ВЛ 330, 500 кВ.

Одностоечная опора представляет собой пространственную конструкцию, состоящую из ствола (стойки), оттяжек и изолирующих траверс. Ствол опоры состоит из отдельных однотипных секций, соединяемых между собой при монтаже. Ствол опирается через пространственный шарнир на опорный узел, поверхностного фундамента. Ствол опоры

удерживается в проектном положении несколькими ярусами оттяжек. На стволе на требуемых отметках через монтажные узлы закреплены изолирующие траверсы для подвески проводов фаз — три траверсы для одноцепной опоры и шесть траверс для двухцепной. В верхней части ствола предусмотрен узел для крепления одного или двух грозозащитных тросов. Для подвески ОКСН предусмотрен съемный узел крепления. Схемы одностоечных опор представлены на рисунке 1.

Портальные опоры представляют собой пространственную конструкцию, состоящую из двух стоек, оттяжек и изолирующих траверс. Стойки между собой раскреплены затяжками, в проектном положении стойки удерживаются двумя или тремя ярусами оттяжек. Каждая из стоек опирается через пространственный шарнир на поверхностный фундамент. С внешних сторон каждой из стоек установлены изолирующие траверсы для подвески крайних фаз. В центре между стоек монтируется изолирующая цепная траверса для подвески проводов средней фазы. В верхних частях каждой из стоек предусмотрены узлы подвески грозозащитных тросов. Схема portalной опоры представлена на рисунке 2.

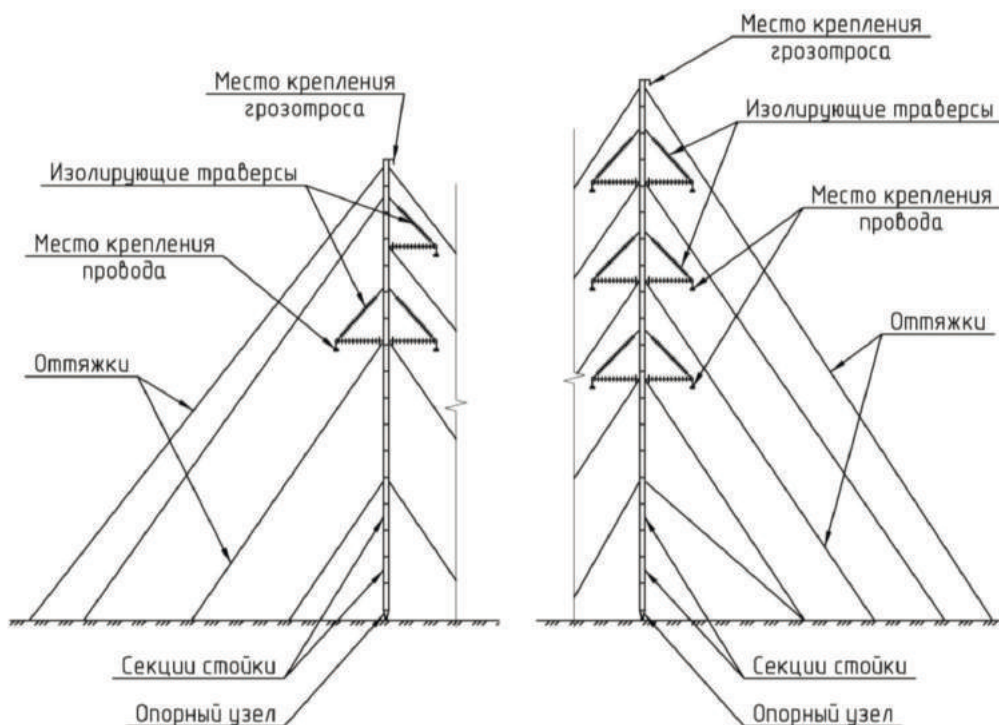


Рисунок 1. Схемы одностоечных опор (1, 2 цепи)



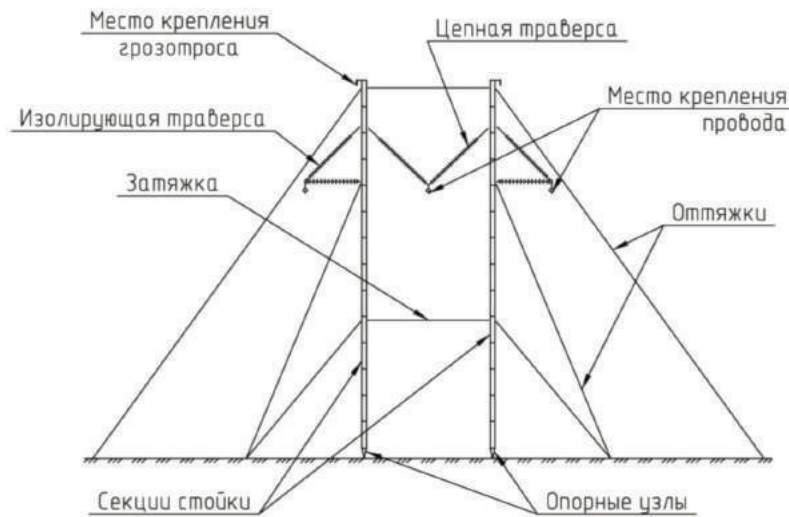


Рисунок 2. Схема портальной опоры

Изолирующие траверсы представляют собой составные конструкции из опорных и подвесных стержневых изоляторов, одними концами они закрепляются на стойке опоры, другими соединяются между собой в месте крепления провода фазы. Для различных классов напряжения ВЛ число изоляторов в траверсе варьируется. Для ВЛ 220 кВ в состав изолирующей траверсы входят один опорный изолятор 220 кВ и один подвесной стержневой изолятор 220 кВ. ВЛ 330кВ: два последовательно соединённых опорных изолятора 150 кВ и 220 кВ и два последовательно соединенных подвесных изолятора 220 кВ. Для ВЛ 500 кВ: два последовательно соединенных опорных изолятора 220 кВ и два последовательно соединенных подвесных изолятора 220 кВ. Цепная изолирующая траверса представляет собой последовательно соединенные подвесные изоляторы 220 кВ. В середине цепи предусмотрено место крепления проводов фазы. Цепная изолирующая траверса обоими концами закреплена на разных стойках портальной опоры. Общий вид изолирующей траверсы 220 кВ представлен на рисунке 3.

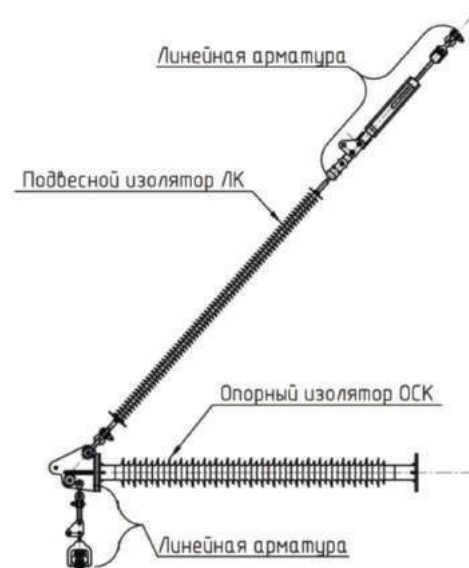


Рисунок 3. Изолирующая траверса 220 кВ

В таблице 1 представлены основные характеристики базовых схем БМО.

Количество секций указано из расчета максимального габарита секции — 3 м.

Масса стоек указана из расчета максимальной допустимой массы одной секции — 150 кг.

Таблица 1. Основные характеристики базовых схем БМО

Основные характеристики базовых схем						
Шифр стационарной подлежащей замене опоры	П220-3	П220-2	П330-3	П330-2	П330-9	ПБ-2
Высота опоры, м	43	46	43	49	34	34
Количество основных секций, шт.	14	15	14	16	2 x 11	2 x 11
Количество ярусов оттяжек, шт.	4	5	4	5	2	2
Количество фундаментов, шт.	13	15	12	15	12	12
Масса стойки, кг	2100	2250	2100	2300	2 x 1650	2 x 1650

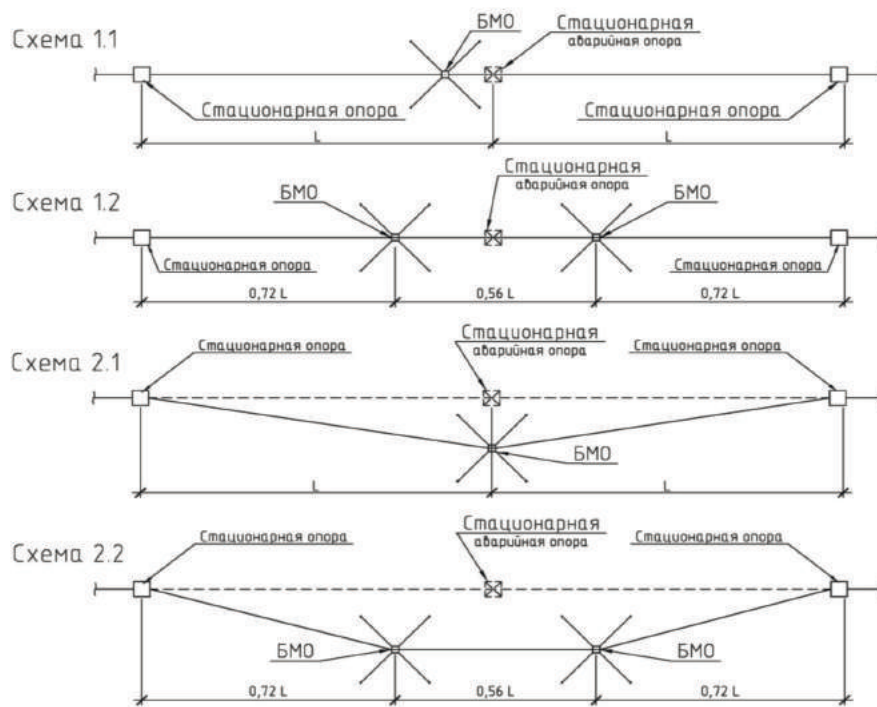


Рисунок 4. Варианты расположения опор аварийного резерва на ВЛ

### 5. Основные положения по выбору сборочных схем

При выборе сборочных схем БМО, для получения оптимальной конструкции, необходимо учитывать ряд основных параметров: данные о величине стенки гололеда и скорости ветра, тип стационарной аварийной опоры и смежных опор, марка подвешенного на ВЛ провода и грозотроса, наличие ОКСН, фактические пролеты на аварийном участке, грунтовые условия.

В первую очередь, определяют схему установки: по оси существующей аварийной ВЛ (рисунок 4, схемы 1.1, 1.2) либо с выносом от оси (рисунок 4, схемы 2.1, 2.2). При отсутствии возможности повторного отключения ВЛ на длительный период восстановления поврежденной опоры БМО следует устанавливать с выносом от оси ВЛ с целью обеспечения свободного пространства, требуемого для проведения работ на аварийной опоре. Также необходимо учитывать ширину полосы отвода и рельеф местности для оценки возможности выноса БМО от оси существующей ВЛ. В сложных климатических условиях для снижения нагрузок на опору от тяжелей проводов предпочтительнее устанавливать БМО по оси ВЛ.

Для соблюдения требуемых межфазных расстояний, расстояний по схлестыванию

необходимо использовать схему БМО с расположением проводов аналогичным стационарным опорам.

В зависимости от внешних условий количество устанавливаемых БМО варьируется. При установке БМО в сложных климатических условиях подвески второго грозозащитного троса или ОКСН для снижения нагрузок на опоры необходимо уменьшать пролеты путем установки большего количества БМО. При установке на слабых грунтах также необходимо увеличивать количество БМО, что позволит уменьшить усилия в оттяжках, следовательно, упростить фундаменты.

Варианты расположения опор аварийного резерва на ВЛ (план) представлены на рисунке 4.

### Вывод

Разрабатываемая быстромонтируемая опора является универсальной конструкцией: может применяться в различных климатических, географических, геоморфологических условиях; для сборки и монтажа опоры не требуется применение спецтехники. Сборочная схема выбирается для конкретных условий и является оптимальной, что может обеспечить лучшие технико-экономические показатели.

**Список литературы**

1. Репин А.И., Бирюлев В.В., Волков В.В. О концепции проектирования металлических опор высоковольтных линий электропередачи аварийного резерва // Известия вузов. Строительство. 1995. № 11. С. 13–16.
2. Репин А.И., Волков В.В. Принципы формообразования стальных опор ВЛ аварийного резерва // Металлические конструкции: тез. докл. VI Украинской науч.-техн. конф., г. Николаев, 1-4 октября 1996 г. Киев-Николаев, 1996. С. 44–46.
3. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*. М.: Минрегион России, 2011.
4. Правила устройства электроустановок. Раздел 2. 7-е изд. М.: Изд. НЦ ЭНАС, 2003.
5. ГОСТ 25100-2011 Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2013.

**References**

1. Repin A.I., Birjulev V.V., Volkov V.V. O koncepcii proektirovanija metallicheskih opor vysokovol'tnyh linij jelektroperedachi avarijnogo rezerva // Izvestija vuzov. Stroitel'stvo. 1995. № 11. S. 13–16.
2. Repin A.I., Volkov V.V. Principy formoobrazovanija stal'nyh opor VL avarijnogo rezerva // Metallicheskie konstrukcii: tez. dokl. VI Ukrainskoj nauch.-tehn. konf., g. Nikolaev, 1-4 oktjabrja 1996 g. Kiev-Nikolaev, 1996. S. 44–46.
3. SP 16.13330.2011. Stal'nye konstrukcii. Aktualizirovannaja redakcija SNiP II-23-81\*. M.: Minregion Rossii, 2011.
4. Pravila ustrojstva jelektroustanovok. Razdel 2. 7-e izd. M.: Izd. NC JeNAS, 2003.
5. GOST 25100-2011. Grunty. Klassifikacija. M.: Standartinform, 2013.



**Конесев С. Г.**  
**Konesev S. G.**

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



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

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

УДК 621.3, 621.365

## **АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПАТЕНТОВАНИЯ ИНДУКТИВНО- ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА**

Проведен анализ динамики патентования способов и устройств стабилизации тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП) по материалам международных патентных баз и патентных баз России. Определены ведущие страны в области разработки и патентования способов и устройств стабилизации тока на основе ИЕП.

Отмечаются актуальность разработки систем стабилизации тока (ССТ) на основе ИЕП для электротехнологических установок и комплексов и интерес специалистов в областях силовой преобразовательной техники, мощной импульсной техники, электротехники, электромеханики (электроприводе), электроэнергетики (системах электроснабжения) в разработке методов и устройств стабилизации тока.

Исследования патентов показывает, что наиболее распространенными и перспективными способами стабилизации тока являются авторегуляторные преобразователи и параметрические стабилизаторы тока. В данной статье рассматриваются параметрические стабилизаторы тока, в которых изменение входного тока нагрузки воздействует непосредственно на нелинейный элемент, а изменение выходного тока относительно заданного значения определяется только степенью нелинейности ВАХ нелинейного элемента. В качестве параметрических источников тока при стабилизации тока чаще всего выступают ИЕП. Использование ИЕП позволяет получить требуемые характеристики.

Авторами приведена классификация ИЕП по различным критериям. Наиболее распространенная группа — это собственно стабилизаторы, ИЕП, осуществляющие свою непосредственную функцию — поддержание стабильного тока при изменении сопротивления нагрузки. В основном патентуются одно- и трехфазные ИЕП с взаимноиндуктивной связью. Это обусловлено тем, что наличие взаимноиндуктивной связи позволяет осуществлять плавное регулирование тока нагрузки за счет изменения резонансной частоты в широких пределах. Линейная магнитная связь между катушками индуктивности при дискретном исполнении ИЕП и магнитная связь между проводящими обкладками при гибридном исполнении позволяют улучшить стабилизирующие, энергетические и частотные характеристики преобразователя, уменьшить массу, габариты и стоимость ИЕП.

Показан активный рост патентования ИЕП для создания систем электропитания стабилизированным током электротехнологических установок за последние 15 лет. Произведен анализ публикации патентов с использованием математического пакета MathCad 15, пока-



зывающий перспективность развития устройств стабилизации тока на основе ИЕП, выполненных на гибридных электромагнитных элементах.

**Ключевые слова:** стабилизация тока, индуктивно-емкостный преобразователь, гибридный электромагнитный элемент, многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент, источник тока, параметрический стабилизатор тока, динамика патентования, электротехнологические установки, спектрально-корреляционная характеристика, патентные исследования.

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

We have carried out the analysis of patenting of methods and devices for current stabilization formed on the inductive-capacitive transducers (ICT) based on international patent databases and patent databases in Russia. The leading countries in the development and patenting of methods and devices based on ICT for current stabilization were determined.

The actuality of the development of the current stabilization system (CSS) based on the ICT for electrotechnological devices and systems and the interest of specialists in the fields of power converter technology, powerful pulse technology, electrical engineering, electromechanical (electric drive), power systems to develop methods and constant current devices are shown.

Patent research determined that the most common and promising current stabilization methods are autoregulatory converters and parametric CSS. This article discusses the parametric CSS in which the input load current change directly affects the non-linear element, and the output current variation with respect to a predetermined value is determined solely by the degree of nonlinearity of the current-voltage characteristics of the nonlinear element. As parametric current sources with current stabilization, most often are the ICT. Using the ICT allows to obtain the desired characteristics.

The authors refer ICT classification according to various criteria. The most common group — the actual CSS, ICT, carrying out their direct function — sub-holding stable current when the load resistance. Basically, patented one-phase and three-phase ICT with mutual inductance. This is because the presence of mutual inductance enables smooth communication load current control by changing the resonant frequency in a wide range. The linear magnet communications between the inductor coils at discrete performance of ICT and the magnetic coupling between the electrodes with a hybrid-rated performance can improve stabilizing, energy and frequency characteristics of the inverter to reduce the weight, size and cost of ICT.

It showed strong growth in patenting of ICT to create CSS for electrotechnological devices over the past 15 years. The analysis of patent publications using the mathematical program MathCad 15, showing the prospects of development of the current stabilization devices based on ICT performed on hybrid electromagnetic elements.

**Key words:** current stabilization, inductive-capacitive transducer, hybrid electromagnetic element, multifunctional integrated electromagnetic component, current source, parametric current stabilization system, dynamics of patenting, electrotechnological devices, spectral-correlation characteristics, patent research.

Широкий ряд потребителей требует электропитания от стабилизированных источников тока (ИТ). Например, ток стабилизируют в зарядных устройствах и импульсных блоках питания [1]. Системы стабилизации тока (ССТ) на базе индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП) используются для питания дуговых сталеплавильных или вакуумно-дуговых и руднотермических печей, установок электрошлакового переплава и контактного нагрева. Также, ССТ применя-

ются для питания плазматронов постоянного и переменного тока различного назначения [2]. В электроприводе, для двигателей постоянного тока с независимым возбуждением, поддержание постоянства якорного тока с помощью ИЕП означает и постоянство развиваемого момента, что при независимости статического момента сопротивления от скорости приводит к тому, что угловая скорость двигателя становится линейной функцией времени [3]. Импульсная электроэнергетика,

использующая медленный заряд накопителей электрической энергии с последующим быстрым их разрядом на нагрузку, представляет собой область, где ССТ широко применяются для заряда емкостных накопителей (ЕН). Постоянство зарядного тока обеспечивает максимальный КПД устройства заряда ЕН [4].

Приведенный выше краткий обзор областей применения ССТ (электролиз, гальванопластика, зарядные устройства, сталеплавильные печи, электропривод), где использование ИТ вместо источника напряжения (ИН) даёт значительный эффект, свидетельствует о практической важности данных устройств.

Перед авторами стояла задача проведения патентных исследований ССТ, в технических решениях которых присутствуют ИЕП, выполненные как на дискретных, так и на гибридных интегрированных электромагнитных компонентах, поскольку данные ССТ представляют интерес с точки зрения повышения энергетических показателей, эксплуатационной надежности, многофункциональности, устойчивости к коротким замыканиям в цепи нагрузки, регулирования и резервирования.

Техническое применение ССТ связано с использованием преобразователей ИН в ИТ, которые можно разделить на три группы: преобразователи с «балластными» активными и реактивными сопротивлениями, авторегуляторные преобразователи; параметрические стабилизаторы тока. В данной статье рассматриваются параметрические стабилизаторы тока, к которым относятся нелинейные токостабилизирующие двухполюсники и четырехполюсники различной физической природы. В качестве параметрических ИТ при стабилизации тока чаще всего выступают ИЕП, содержащие линейные реактивные элементы двух типов: конденсаторы и катушки индуктивности, работа которых связана с явлением резонанса на частоте питающей сети. При помощи ИЕП можно получить на выходе ток, пропорциональный входному напряжению и не зависящий от сопротивления нагрузки. Для большинства описанных применений системы стабилиза-

ции тока с индуктивно-емкостными преобразователями являются наиболее технически обоснованными [5].

Авторами проведено исследование патентов по двум десяткам патентных баз России, США, Канады и других стран (ФГУ ФИПС, USPTO, IMPIN, Национальный реестр интеллектуальной собственности, Евразийская патентно-информационная система ЕАПАТИС, БД Европейской патентной организации esp@cenet, Библиотека патентов на изобретения Freepatent, Canadian Intellectual Property Office) с глубиной патентного поиска 50 лет. Проанализировано более 30 000 патентов и авторских свидетельств, из которых выявлено более 120 патентов, которые могут послужить аналогами и прототипами будущих технических решений.

Заявителями по данной теме в большинстве случаев являются высшие учебные заведения (65 %), вдвое и в четыре раза меньше патентуют ССТ предприятия и фирмы (37 %) и частные лица (15 %) соответственно.

При проведении исследований авторы определили следующие классификационные признаки для ИЕП: по функциональному назначению, числу фаз, конструктивному исполнению, типам электромагнитных элементов (ЭМЭ).

Принципиально возможно создать неограниченно большое количество схем ИЕП, обеспечивающих постоянство тока в переменной нагрузке. Однако не все они будут удовлетворять требованиям, предъявляемым к такого рода устройствам. Многообразие схемных вариантов предопределяет и сложность их классификации. На рисунке 1 приведена классификация ИЕП по функциональному назначению. Наиболее распространенная группа (около 50 %) — это собственно стабилизаторы, ИЕП, осуществляющие свою непосредственную функцию — поддержание стабильного тока при изменении сопротивления нагрузки. Ко второй группе относятся ИЕП, которые, помимо выполнения основной функции, обеспечивают плавное импульсное (23 %) и ступенчатое (19 %) регулирование уровня тока в переменной нагрузке. Наиболее распространенные методы плавного регулирования тока нагрузки — метод вариации

взаимоиндуктивности (18 % от общего числа), ступенчато-трансформаторный метод (16 % от общего числа).

В результате исследования патентования ИЕП по числу фаз определило, что в основном патентуются однофазные (порядка 43 %) и многофазные (около 49 %, из них наиболее распространенные — трехфазные (46 %).

По конструктивному исполнению ИЕП делятся на две группы: с взаимноиндуктивной связью между отдельными индуктивными элементами схемы и без неё. В основном патентуются ИЕП с взаимноиндуктивной связью (до 72 %). Это обусловлено тем, что наличие взаимноиндуктивной связи позволяет осуществлять плавное регулирование тока нагрузки за счет изменения резонансной частоты в широких пределах. Линейная магнитная связь между катушками индуктивности при дискретном исполнении ИЕП и магнитная связь между проводящими обкладками при гибридном исполнении позволяют улучшить стабилизирующие, энергетические и частотные характеристики преобразователя, уменьшить массу, габариты и стоимость ИЕП. Все перечисленные группы могут выполняться с выходом на переменном и выпрямленном токе, а также с выходным или входным трансформатором.

Наряду с широко известными достоинствами ИЕП, выполненных на основе дискретных ЭМЭ, им присущ и ряд недостатков (большие габариты и масса при работе от промышленной сети, недопустимость работы на холостом ходу без принятия специальных мер), которые можно устранить с помощью

функциональной интеграции при использовании гибридных ЭМЭ. Следовательно, ИЕП можно разделить на две группы по типам ЭМЭ, из которых они изготовлены: ИЕП на дискретных ЭМЭ (92 %) и ИЕП на гибридных ЭМЭ (порядка 8 %). Большое разнообразие схем ИЕП отличается структурой, числом элементов, порядком их включения, наличием магнитных связей между катушками индуктивности. Все схемы работают в режиме преобразования ИН в ИТ при условии резонансной настройки их реактивных элементов [9]. Рациональное число элементов в параметрическом преобразователе ИН в ИТ должно быть не более четырех, поэтому для построения ИЕП на дискретных элементах используются Г-, Т-образные и мостовые структуры. Широкое распространение в устройствах заряда накопительного конденсатора от источника переменного тока получили ИЕП ИН в ИТ, выполненные по схемам Бушера и Штейнметца, описанные в [5].

Подробное описание гибридных ЭМЭ, применяемых для создания ИЕП, приведено в [10–12]. Согласно данным базы российских патентов, количество заявок на патентование ССТ с ИЕП на основе многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов (МИЭК) за последние 15 лет сохранилось таким же по сравнению с предыдущим пятнадцатилетием. Кроме того, расширился спектр применения ИЕП на основе МИЭК, предлагаемый авторами заявок.

По количеству заявок на патентование можно достаточно достоверно оценивать перспективность выбранного направления



**Рисунок 1.** Классификация ИЕП по функциональному назначению

науки и техники, поскольку за каждой поданной заявкой на патентование стоит конкретное устройство, востребованное потребителем. Таким образом, анализируя патентную информацию, можно оценить потребность рынка в различных устройствах, способах и технологиях [13]. С целью оценки интереса потребителя к ИЕП на основе МИЭК и выявления наиболее перспективных направлений дальнейшего совершенствования МИЭК проведен анализ патентной информации. Для анализа использовался массив, состоящий из заявок на патентование, поданных в Российской Федерации, США, Германии, Канаде, Англии, Франции, Китае за период с 1969 по 2015 гг. (рисунок 2).

При дальнейшем анализе в качестве параметров перспективности приняты спектрально-корреляционные характеристики динамики подачи заявок на патентование ССТ с ИЕП на основе гибридных ЭМЭ [14]. По изменениям количества поданных в разные годы заявок сравнивались результаты вычисления корреляционной функции и спектральной плотности. График динамики подачи заявок на патентование ИЕП на основе гибридных ЭМЭ представлен на

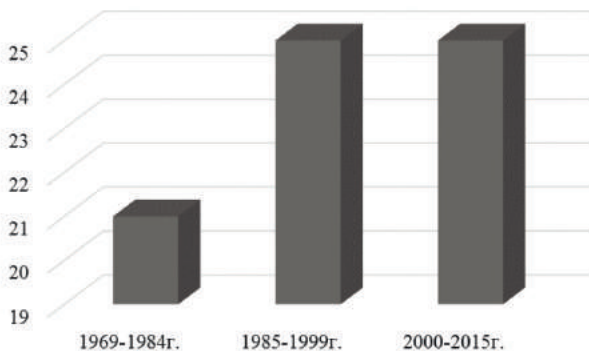


Рисунок 2. Распределение патентования за период с 1969 по 2015 гг.

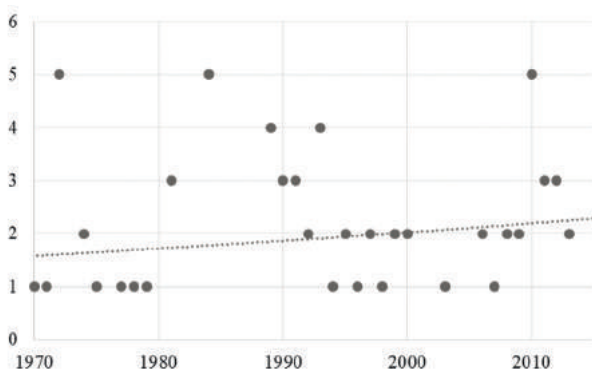


Рисунок 3. Динамика подачи заявок на патентование ИЕП на основе МИЭК

рисунок 3. Данный график позволяет достаточно уверенно судить о том, что на протяжении всего рассматриваемого периода (50 лет) интерес исследователей к ИЕП возростал.

С использованием программы MathCad 15 исследованы колебания количества заявок на патентование устройств на основе МИЭК в течение 576 месяцев (1969–2015). Анализ формы спектра показывает, что для подачи заявок на патентование ИЕП на основе гибридных ЭМЭ характерен узкополосный процесс, что свидетельствует об актуальности и перспективности направления разработки ИЕП на основе гибридных ЭМЭ.

### Вывод

Актуальность темы исследования обусловлена перспективностью разработок и создания ССТ на базе ИЕП, о чем свидетельствует многочисленные научные труды и разработки ученых стран мира, занимающихся созданием источников тока и ССТ. Наибольшее количество новых схемотехнических решений устройств стабилизации тока в России и США свидетельствует об интересе этих стран к разработке ССТ на базе ИЕП. Заявителями по данной теме в большинстве случаев являются высшие учебные заведения (65 %).

Анализ патентования показывает, что наиболее распространенными и перспективными способами стабилизации тока являются авторегуляторные преобразователи и параметрические стабилизаторы тока. В качестве параметрических ИТ при стабилизации тока чаще всего выступают ИЕП (56% от общего числа ССТ и 82 % от общего числа параметрических стабилизаторов тока). Авторами рассмотрена классификация ИЕП по различным критериям. Наиболее распространенная группа (около 50 %) — это собственно стабилизаторы, ИЕП, осуществляющие свою непосредственную функцию — поддержание стабильного тока при изменении сопротивления нагрузки. В основном патентуются однофазные (порядка 43 %) и многофазные (около 49 %, из них наиболее распространенные — трехфазные (46 %) с взаимноиндуктивной связью (до 72 %). Это обусловлено тем, что наличие взаимноиндуктивной связи позволяет осуществлять плав-



ное регулирование тока нагрузки за счет изменения резонансной частоты в широких пределах. Линейная магнитная связь между катушками индуктивности при дискретном исполнении ИЕП и магнитная связь между проводящими обкладками при гибридном исполнении ИЕП позволяют улучшить стабилизирующие, энергетические и частотные характеристики, уменьшить массу, габариты и стоимость ИЕП.

Наряду с широко известными достоинствами ИЕП, выполненных на основе дискретных ЭМЭ, им присущ и ряд недостатков (большие габариты и масса при работе от

промышленной сети, недопустимость работы на холостом ходу без принятия специальных мер), которые можно устранить с помощью функциональной интеграции при использовании гибридных ЭМЭ. Следовательно, ИЕП можно разделить на две группы по типам ЭМЭ, из которых они изготовлены: ИЕП на дискретных ЭМЭ (92 %) и ИЕП на гибридных ЭМЭ (порядка 8 %). Для подачи заявок на патентование ИЕП на основе гибридных ЭМЭ характерен узкополосный процесс, что свидетельствует об актуальности и перспективности направления разработки ИЕП на основе гибридных ЭМЭ.

### Список литературы

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Изд-во «Наука», 2004. 704 с.
2. Пат. 2299794 Российская Федерация, МПК Н 02 М 3/335. Однофазный сварочный стабилизатор тока / В.Т. Тарасов (РФ). 2005131715; заявл. 13.10.2005, опубл. 27.05.2007. Бюл. № 15.
3. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во «Академия», 2008. 124 с.
4. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Хлюпин П.А. Компьютерная модель системы заряда емкостного накопителя на основе индуктивно-емкостного преобразователя // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. № 4. С. 374–390. URL: [http://ogbus.ru/issues/4\\_2015/ogbus\\_4\\_2015\\_p374-390\\_KonesevSG\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/4_2015/ogbus_4_2015_p374-390_KonesevSG_ru.pdf) (дата обращения: 09.09.2015).
5. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Индуктивно-емкостные преобразователи. Применение в электротехнике и обзор схемотехнических решений // Ресурсо-, энергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов: сб. тр. 3-й Всеросс. науч.-практ. конф. Волжский: Филиал ГОУ ВПО МЭИ, 2010. С. 120–125.
6. Конесев С.Г., Кириллов Р.В., Хазиева Р.Т. Анализ энергетических и частотных характеристик многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. С. 65–75.
7. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В. Исследование частотных характеристик двухсекционных многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. № 4 (70). С. 66–71.
8. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Функциональная интеграция как техническое средство развития электромагнитных элементов // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. науч. тр. 2014. С. 135–138.
9. Хазиева Р.Т. Индуктивно-емкостные преобразователи на основе многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Тинчуринские чтения: сб. 6-й Междунар. науч. молодежн. конф. с междунар. участием. Казань: ГОУ ВПО КГЭУ, 2011. С. 107–108.
10. Хазиева Р.Т. Анализ патентных исследований в области гибридных электромагнитных элементов // Научное творчество XXI века: сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. студ., аспирантов и молодых ученых. Красноярск, 2013. С. 354–361.
11. Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Колесникова О.И. Hybrid Electromagnetic Elements for Electrical Devices // Вестник молодого ученого УГНТУ. 2015. № 2. С. 83–87.

12. Пат. 2450413 Российская Федерация, МПК H 02 M 5/06. Индуктивно-емкостный преобразователь / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, И.С. Конесев, Р.А. Нурлыгаянов (РФ). 2010149802; заявл. 03.12.2010; опубл. 10.05.2012. Бюл. № 13.

13. Хазиева Р.Т. Электротехнические устройства на основе гибридных электромагнитных элементов в нефтяной промышленности // Актуальные проблемы науки и техники: сб. VIII Междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных 17 ноября 2015: в 3 т. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. Т. 2. С. 11–13.

14. Чернова К.В. Развитие и перспективы применения магнитного воздействия на скважинную продукцию в нефтедобыче: монография. Уфа, 2005. С. 88–93.

### References

1. Mesjac G.A. Impul'snaja jenergetika i jelektronika. M.: Izd-vo «Nauka», 2004. 704 s.

2. Pat. 2299794 Rossijskaja Federacija, МПК H 02 M 3/335. Odnofaznyj svarochnyj stabilizator toka / V.T. Tarasov (RF). 2005131715; zajavl. 13.10.2005; opubl. 27.05.2007. Bjul. № 15.

3. Il'inskij N.F., Moskalenko V.V. Jelektroprivod: jenergo- i resursosberezhenie: uchebnoe posobie dlja vuzov. M.: Izd-vo Akademija, 2008. S. 124.

4. Konesev S.G., Haziava R.T., Kirillov R.V., Hljupin P.A. Komp'juternaja model' sistemy zarjada emkostnogo nakopitelja na osnove induktivno-emkostnogo preobrazovatelja // Jelektronnyj nauchnyj zhurnal «Neftegazovoe delo». 2015. № 4. S. 374–390. URL: [http://ogbus.ru/issues/4\\_2015/ogbus\\_4\\_2015\\_p374-390\\_KonesevSG\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/4_2015/ogbus_4_2015_p374-390_KonesevSG_ru.pdf) (data obrashhenija: 09.09.2015).

5. Konesev S.G., Haziava R.T. Induktivno-emkostnye preobrazovateli. Primenenie v jelektrotehnike i obzor shemotehnicheskikh reshenij // Resurso-jenergosberezhenie i jekologo-jenergeticheskaja bezopasnost' promyshlennyh gorodov: sb. tr. 3-j Vseros. nauch.-prakt. konf. Volzhskij: Filial GOU VPO MJeI, 2010. S. 120–125.

6. Konesev S.G., Kirillov R.V., Haziava R.T. Analiz jenergeticheskikh i chastotnyh harakteristik mnogofunktional'nyh integrirovannyh jelektromagnitnyh komponentov // Jenergeticheskie

i jelektrotehnicheskie sistemy: mezhdunar. sb. nauch. tr. Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk. gos. tehn. un-ta im. G.I. Nosova, 2014. S. 65–75.

7. Konesev S.G., Haziava R.T., Kirillov R.V. Issledovanie chastotnyh harakteristik dvuhsekcionnyh mnogofunktional'nyh integrirovannyh jelektromagnitnyh komponentov // Vestnik UGATU. 2015. T.19. № 4 (70). S. 66–71.

8. Konesev S.G., Haziava R.T. Funkcional'naja integracija kak tehničeskoe sredstvo razvitija jelektromagnitnyh jelementov // Povyshenie nadezhnosti i jenergojeffektivnosti jelektrotehnicheskikh sistem i kompleksov: mezhvuz. sb. nauch. tr. 2014. S. 135–138.

9. Haziava R.T. Induktivno-emkostnye preobrazovateli na osnove mnogofunktional'nyh integrirovannyh jelektromagnitnyh komponentov // Tinchurinskie chtenija: sb. 6-j Mezhdunar. nauch. molodezhn. konf. s mezhdunar. uchastiem. Kazan': GOU VPO KGJeU, 2011. S. 107–108.

10. Haziava R.T. Analiz patentnyh issledovanij v oblasti gibridnyh jelektromagnitnyh jelementov // Nauchnoe tvorčestvo XXI veka: sb. tr. VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. stud., aspirantov i molodyh uchenykh. Krasnojarsk, 2013. S. 354–361.

11. Haziava R.T., Kirillov R.V., Kolesnikova O.I. Hybrid Electromagnetic Elements for Electrical Devices // Vestnik mladogo uchenogo UGNTU. 2015. № 2. S. 83–87.

12. Pat. 2450413 Rossijskaja Federacija, МПК H 02 M 5/06. Induktivno-emkostnyj preobrazovatel' / S.G. Konesev, R.T. Haziava, I.S. Konesev, R.A. Nurlygajanov (RF). 2010149802; zajavl. 03.12.2010; opubl. 10.05.2012. Bjul. № 13.

13. Haziava R.T. Jelektrotehnicheskie ustrojstva na osnove gibridnyh jelektromagnitnyh jelementov v neftjanoj promyshlennosti // Aktual'nye problemy nauki i tehniki: sb. VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodyh uchjonyh 17 nojabrja 2015: v 3 t. Ufa: Izd-vo UGNTU, 2015. T. 2. S. 11–13.

14. Chernova K.V. Razvitie i perspektivy primenenija magnitnogo vozdejstvija na skvazhinnuju produkciju v neftedobyche: monografija. Ufa, 2005. S. 88–93.



**Имильбаев Р. Р.**  
**Imilbaev R. R.**  
инженер ООО  
«УфаСистемаГаз»,  
г. Уфа, Российская Федерация



**Крымский В. Г.**  
**Krymskiy V. G.**  
доктор технических наук,  
профессор кафедры  
«Управление и сервис  
в технических системах»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация



**Юнусов А. Р.**  
**Yunusov A. R.**  
кандидат технических наук,  
директор ООО  
«УфаСистемаГаз»,  
г. Уфа, Российская  
Федерация

УДК 51-74:681.5.08

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРВАЛЬНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

К числу важных проблем, возникающих при использовании результатов контроля параметров газораспределительных сетей, относится предупреждение вероятных аварийных ситуаций. Своевременное реагирование на возникающие угрозы возможно только при изучении тенденций изменения каждого параметра и выполнения адекватного прогноза на соответствующие периоды времени. Такая задача осложняется наличием неопределенностей и специфических особенностей поведения наблюдаемых данных (в частности, периодическими колебаниями их уровня, которые могут рассматриваться как проявление сезонности). В этих условиях необходима разработка алгоритмов, способных достаточно достоверно предсказывать появление нештатных режимов функционирования сети. Алгоритмы должны включать в себя модели неопределенности, отражающие недостаток исходной информации (например, предназначенные для операций не с фиксированными переменными, а с интервалами их значений). В свою очередь, результирующий прогноз должен учитывать отмеченную сезонную составляющую.

В статье предлагается подход к прогнозированию состояния газораспределительных сетей применительно к случаю, когда информация о контролируемых параметрах представлена в виде интервальных временных рядов. На этой основе строится специальная модель прогнозирования, позволяющая учитывать не только основные тренды изменения параметров (давлений газа на входах и выходах газорегуляторных пунктов), но и фактор сезонности. Указанная модель представляет собой интервальную версию алгоритма Хольта-Уинтерса (тройного экспоненциального сглаживания). Выполнен сравнительный анализ эффективности применения предложенной модели и традиционных алгоритмов прогнозирования при обработке реальных данных, полученных с помощью системы телеметрического контроля газораспределительных сетей. Указана область предпочтительного использования предложенной модели прогнозирования, ориентированной на интервальнозначные исходные данные.

Авторы считают, что применение интервальных временных рядов открывает принципиально новые перспективы для организации успешной поддержки управленческих решений, необходимых для сохранения нормальной работы газораспределительной сети при неблагоприятных возмущениях.

**Ключевые слова:** газораспределительная сеть, алгоритм прогнозирования, экспоненциальное сглаживание, интервальные временные ряды, фактор сезонности.

## APPLICATION OF INTERVAL TIME SERIES TO FORECASTING THE STATE OF GAS DISTRIBUTION NETWORK

Among the important issues arising from the use of results of gas distribution networks (GDN) parameters' control, there is the prevention of possible emergency situations. Timely response to emerging threats is possible only by studying the trends of each parameter change and performing an adequate forecast for the corresponding time periods. This task is complicated by the presence of uncertainties and the specific features of the behavior of the observed data (in particular, periodic oscillations of level, which may be regarded as a manifestation of seasonality). In these circumstances, it is necessary to develop algorithms that can fairly reliably predict the occurrence of abnormal conditions of the network. Algorithms should include uncertainty models, reflecting a lack of initial information (for example, intended for operations not with fixed variables but with the intervals of their values). In turn, the resulting forecast should take into account the seasonal component above mentioned.

The paper proposes an approach to forecasting the state of gas distribution networks (GDN) for the case in which the information on the controlled parameters is presented in the form of interval time series. On this basis, there is created the special forecasting model that allows taking into account not only the trends for the parameters (gas pressure values for the inputs and outputs of gas regulating stations) but also the seasonal factor. The model mentioned above is actually the interval version of Holt-Winters' algorithm (triple exponential smoothing). Comparative analysis is performed to consider the effectiveness of the proposed model and the traditional forecasting algorithms for treating the real data obtained from the system of GDN telemetric control, advantages and disadvantages are notified. For the proposed model oriented towards interval-valued initial data, the specific area of preferred application is indicated.

The authors believe that the use of interval time series opens entirely new perspectives for a successful support of management decisions that are required to maintain normal operation of the gas distribution network in adverse disturbances.

**Key words:** gas distribution network, forecasting algorithm, exponential smoothing, interval time series, seasonal factor.

### Введение

Как известно, под газораспределительной сетью (ГС) понимается совокупность объектов, состоящая из наружных газопроводов и технических устройств на них и предназначенная для безопасной и непрерывной транспортировки природного газа потребителям в необходимом количестве с соблюдением заданных рабочих параметров в течение требуемого периода времени [1]. В качестве узлов сети выступают газорегуляторные пункты (ГРП), которые снижают избыточное давление газа, поступающего из газопровода, и поддерживают его на определенном заданном уровне.

В процессе эксплуатации ГС требуется наблюдение за поведением основных параметров ГРП (значениями давления газа на их

входах и выходах, состоянием противозапорных клапанов), что на текущий момент, как правило, осуществляется силами аварийно-диспетчерской службы путем периодических обходов контролируемых объектов на соответствующем участке сети. Тем не менее, необходимость непрерывного получения информации о параметрах работы оборудования в режиме реального времени с целью поддержки принятия обоснованных управленческих решений и, как следствие, стремление к минимизации частоты возникновения нештатных и аварийных ситуаций привели к повсеместному внедрению систем телеметрического контроля (СТК) состояния ГРП [2, 3].

В свою очередь, на практике важно не только оперативно реагировать на возникновение указанных неблагоприятных ситуаций



постфактум, но и обеспечивать их своевременное предупреждение. По этой причине целесообразно введение в СТК модулей, реализующих функции прогнозирования критических изменений контролируемых параметров, что позволяет принимать превентивные меры в случае угрозы каких-либо нарушений нормального (безаварийного) функционирования ГС.

В статье анализируются возможные пути такого прогнозирования, основанные на применении моделей представления данных о контролируемых параметрах сети в форме временных рядов. В качестве важной задачи рассматривается учет неопределенности в исходной информации, которая выражается в том, что контролируемые параметры во многих ситуациях известны лишь с точностью до границ интервалов своего изменения. Это обуславливает целесообразность разработки специальных («интервальных», т.е. оперирующих интервальнозначными данными) модификаций алгоритмов получения прогноза. Предлагается новая «интервальная» версия метода Хольта-Уинтерса, которая принимает во внимание влияние фактора сезонности на изменения наблюдаемых параметров. Выполняется сравнительный анализ эффективности предложенного алгоритма прогнозирования по отношению к традиционным методам за счет сопоставления полученных с их помощью результатов применительно к реальным показаниям телеметрии, что позволяет сформулировать рекомендации относительно предпочтительных областей применения различных методов.

#### *Анализ данных телеметрии ГС*

Как известно, контролируемые в процессе мониторинга параметры ГРП можно условно разделить на два класса [2, 3]:

- параметры, зависимость которых от времени представляет собой непрерывную функцию (например, давление, температура) — *параметры 1-го класса*;
- параметры, значения которых соответствуют двузначной логике ‘true’ или ‘false’ (например, сигнал датчика положения двери — «открыто» или «закрыто») — *параметры 2-го класса*.

На практике для каждого сигнала, соответствующего какому-либо параметру 1-го класса, устанавливаются границы допустимого интервала значений (уставки).

Информация о параметрах ГРП непрерывно собирается контроллером телеметрии и отправляется на удаленный сервер СТК периодически (через определенные промежутки времени) или спорадически (по факту недопустимого изменения одного из контролируемых параметров, например, при выходе значения какого-либо параметра 1-го класса за границу, заданную уставкой). Последовательность значений контролируемых параметров, собранных СТК в течение некоторого времени, можно представить с помощью временного ряда (ВР) [4], где каждой метке времени соответствует то или иное значение параметра. Следует отметить, что временной ряд, полученный исходя из данных о параметрах 1-го класса (давлений газа на входе и выходе ГРП), характеризуется суточной сезонностью — наличием повторяющихся с фиксированным периодом времени изменений контролируемых величин (рисунок 1). Сезонность применительно к значениям давлений обусловлена варьированием уровня потребления газа на протяжении суток, когда количество потребителей постепенно увеличивается с утра и спадает ближе к ночи. Учитывать сезонность показаний при анализе ВР и формировании прогнозов важно ввиду того, что сезонное (циклическое) изменение параметров можно ошибочно принять за отклонения значений уровня; это в конечном итоге приведет к неверным выводам относительно динамики общего состояния объекта.

В рассматриваемой нами задаче целесообразно говорить о том, что формируемые ВР имеют, как правило, специфическую форму представления, а, именно, они относятся к «интервальным» временным рядам. Указанная особенность является следствием неопределенности в располагаемых исходных данных, когда значения контролируемых параметров известны лишь с точностью до границ интервалов их изменения. В частности, такие интервалы возникают, если учитывается погрешность измерения величин используемыми датчиками, либо когда в распоряжении аналитика имеются только мини-

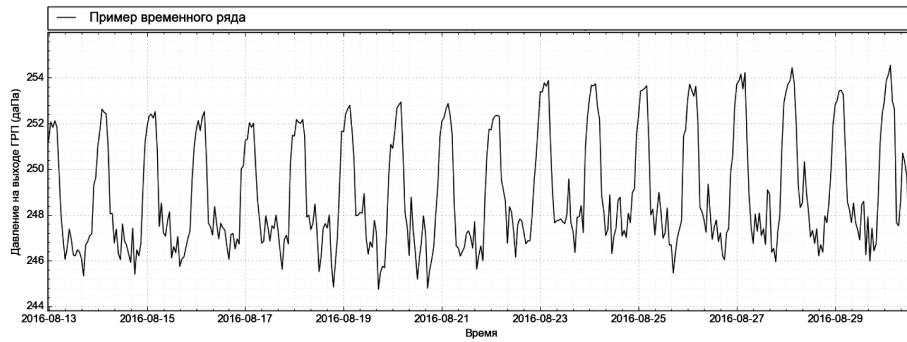


Рисунок 1. Пример временного ряда с суточной сезонностью

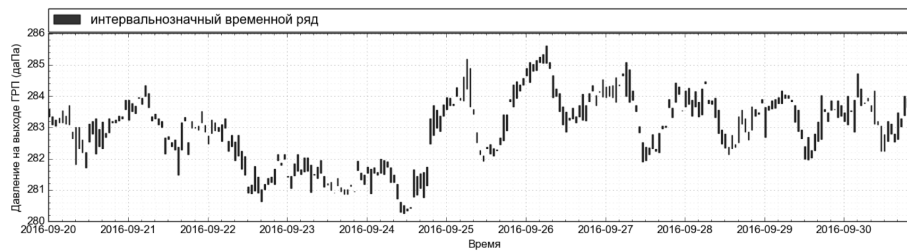


Рисунок 2. Пример интервального временного ряда с сезонностью (максимальные и минимальные значения давления газа на выходе ГРП за час)

мальные и максимальные значения параметра (давления или температуры газа) за определенные промежутки времени. В отмеченных ситуациях каждой временной отметке ставится в соответствие интервальное число, задаваемое нижней и верхней границей соответствующего интервала.

Обозначим  $Y(i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  временной ряд, представленный значениями параметра  $Y$  для совокупности последовательно пронумерованных отметок времени. Наличие интервальной неопределенности приводит к тому, что исходная информация может быть выражена соотношениями:

$$Y(i) \in [\underline{Y}(i), \bar{Y}(i)], \quad (1)$$

где  $\underline{Y}(i)$ ,  $\bar{Y}(i)$  — минимальное и максимальное значения параметра  $Y$  на шаге  $i$ .

Введем в рассмотрение векторы:

$$I_i = \left\| \underline{Y}(i), \bar{Y}(i) \right\|^T, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Здесь верхний индекс  $T$  характеризует операцию транспонирования.

Последовательность  $I_1, I_2, \dots, I_n$  этих векторов задает интервальный временной ряд (ИВР). Применение ИВР при прогнозировании позволяет более адекватно обеспечивать поддержку управленческих решений. Связано это со следующими причинами.

Кратковременное, но значительное по величине отклонение параметра может быть вообще не учтено при выработке прогноза на

базе обычного («скалярного») временного ряда за счет эффекта сглаживания обрабатываемой совокупности данных. Таким образом, имевшее место информативное событие не будет принято во внимание. Напротив, в ИВР, содержащем информацию о максимуме и минимуме значений параметра, например, за каждый час, подобные отклонения (независимо от продолжительности «броска») будут обязательно учитываться в процессе дальнейшего прогнозирования (рисунок 2).

#### *Особенности прогнозирования с использованием временных рядов*

Временные ряды, с помощью которых возможно представление данных о состоянии ГС, обычно имеют ряд особенностей. В наиболее общей постановке задачи здесь следует говорить о неполных (или неравноотстоящих) временных рядах, когда собранные данные соответствуют неравноотстоящим моментам времени. Задача прогнозирования — по набору накопленных данных предсказать изменения соответствующих значений параметра в будущем — в этом случае существенно усложняется.

Прежде чем приступать к прогнозированию, необходимо решить задачу приведения ВР к представлению в виде полного временного ряда. Можно воспользоваться методом линейной интерполяции для получения

отсутствующих значений параметра в «пропущенные» моменты времени и формирования нового ВР с заданными фиксированными промежутками между временными отметками. Эта процедура, тем не менее, может привести к снижению точности и адекватности прогноза, так как дополнительные, вычисленные на основе интерполяции значения способны изменить общую тенденцию изменения параметра, как правило, в сторону сглаживания соответствующих зависимостей (рисунок 3).

Для вычисления значений интересующего нас параметра  $Y(t)$  в будущие моменты времени обычно используется информация об его значениях в предыдущие моменты времени. Например, если время  $t$  измеряется с условным шагом дискретности, то прогнозирование «на один шаг вперед» следует рассматривать как реализацию соотношения

$$Y(k+1) = f(Y(1), Y(2), \dots, Y(k-1), Y(k)), \quad (3)$$

где  $Y(k+1)$  — значение параметра в будущий момент времени;

$Y(1), \dots, Y(k)$  — «прошлые» значения этого параметра в моменты времени  $1, 2, \dots, k-1, k$ ;  $f(\cdot)$  — некоторая функция указанных величин.

На сегодняшний день среди подходов к прогнозированию тенденций изменения параметров с использованием ВР наиболее широкое распространение на практике получили методы, ориентированные на применение авторегрессионных моделей [5] и моделей экспоненциального сглаживания [6]. В свою очередь, модели экспоненциального сглаживания стали популярными за счет относительной простоты реализации в совокупности с точными и быстрыми прогнозами. Они построены на идее вычисления прогнозного средневзвешенного значения последних результатов с экспоненциальным уменьшением веса предыдущих наблюдений.

Существует несколько разновидностей моделей экспоненциального сглаживания для различных типов данных [7]. Простое экспоненциальное сглаживание (модель Брауна) применяется для краткосрочных прогнозов ВР. Модель двойного экспоненциального сглаживания (модель Хольта) применяется для прогнозирования данных с трендом. Развитием модели Хольта является модель тройного экспоненциального сглаживания (модель Хольта-Уинтерса), предназначенная для данных с сезонной составляющей.

В рамках традиционных исследований вышеназванные модели широко применяются для прогнозирования на основе «скалярных» временных рядов, когда каждой метке времени соответствует определенное значение контролируемого параметра. Однако, как отмечалось ранее, применительно к газораспределительным сетям актуальна задача прогноза в ситуациях, для которых исходная информация имеет вид интервального временного ряда [8]. Следует указать, что модели Хольта и Хольта-Уинтерса приобретают с этой точки зрения особое значение ввиду того, что допускают специализированные «интервальные» модификации. Примером такой модификации является версия Holt<sup>1</sup> классической модели Хольта, описанная в публикации [9]. Недостатком соответствующего алгоритма является тот факт, что указанная модель подходит только для данных без явно выраженной сезонной составляющей. Указанное обстоятельство становится весьма существенным ограничением по отношению к применимости Holt<sup>1</sup> в задачах получения прогнозов состояния ГС, где для параметров характерна суточная сезонность.

По этой причине в данной работе предлагается реализовать «интервальную» версию

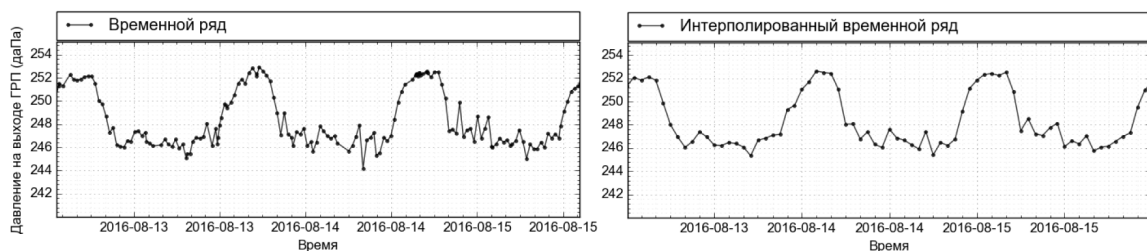


Рисунок 3. Пример неполного ВР (слева) и полного ВР, полученного путем линейной интерполяции данных

модели тройного экспоненциального сглаживания, учитывающую наряду с трендом (изменением уровня параметра) еще и сезонную составляющую. Такой алгоритм позволяет обеспечить более адекватную поддержку решений, направленных на предупреждение аварийных ситуаций в ГС, и может быть задействован в составе программного обеспечения системы ее мониторинга.

*Разработка интервальной версии модели Хольта-Уинтерса*

Разрабатываемый алгоритм прогнозирования, предназначенный для оперирования исходными данными в форме интервальных временных рядов и учитывающий сезонную составляющую, базируется, с одной стороны, на классической модели тройного экспоненциального сглаживания [6], с другой — на уже упоминавшейся интервальной версии Holt<sup>I</sup> модели Хольта [9]. Приведем соотношения, используемые в Holt<sup>I</sup>:

$$\begin{aligned} \tilde{T}_{r+1} &= L_r^I + T_r^I, \\ L_r^I &= A I_r + (E - A)(L_{r-1}^I + T_{r-1}^I), \\ T_r^I &= B(L_r^I - L_{r-1}^I) + (E - B)T_{r-1}^I, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $I_r^I = \left\| \underline{I}_r^I, \bar{I}_r^I \right\|^T$  — вектор, содержащий в качестве компонент нижнюю  $\underline{I}_r^I$  и верхнюю  $\bar{I}_r^I$  границы интервала значений контролируемого параметра  $Y$  на шаге  $r$ ,  $\tilde{I}_{r+1}^I = \left\| \underline{\tilde{I}}_{r+1}^I, \bar{\tilde{I}}_{r+1}^I \right\|^T$  — аналогичный вектор, который содержит нижнюю  $\underline{\tilde{I}}_r^I$  и верхнюю  $\bar{\tilde{I}}_r^I$  границы интервала, полученного по результатам прогноза для  $(r+1)$ -го шага,  $L_r^I = \left\| \underline{L}_r^I, \bar{L}_r^I \right\|^T$  — вектор интервальнозначного сглаженного уровня ИВР ( $\underline{L}_r$  и  $\bar{L}_r$  — нижняя и верхняя границы интервала уровня соответственно),  $T_r^I = \left\| \underline{T}_r^I, \bar{T}_r^I \right\|^T$  — вектор, содержащий в качестве компонент значения нижней  $\underline{T}_r$  и верхней  $\bar{T}_r$  границ интервала сглаженного тренда к концу промежутка времени между  $(r-1)$ -м и  $r$ -м отсчетами;  $E$  — единичная матрица размера  $(2 \times 2)$ ;  $A = \left\| \alpha_{ij} \right\|$ ,  $B = \left\| \beta_{ij} \right\|$  — двумерные матрицы коэффициентов сглаживания  $\alpha_{ij}$ ,  $\beta_{ij}$ , удовлетворяющих условиям:

$$0 \leq \alpha_{ij}, \beta_{ij} \leq 1, \quad i, j = 1, 2. \quad (5)$$

В зависимости от влияния сезонности на результаты прогнозирования различают две

формы представления сезонной составляющей. Аддитивная форма предпочтительна в ситуациях, когда сезонность вызывает постоянные по величине периодические отклонения (колебания) значений параметра на протяжении всего временного ряда. При мультипликативной форме величина отклонений зависит от текущего уровня ВР (например, измеряется в процентах от этого уровня). Анализ данных, собранных в процессе эксплуатации ГС, приводит к выводу, что для наиболее значимых контролируемых параметров этих сетей (давлений газа на входах и выходах ГРП) выполняются условия, характеризующие именно аддитивную форму сезонности. Таким образом, дальнейшее изложение предполагает, что разработка модели выполняется для аддитивной формы учета сезонной составляющей.

Предлагаемая совокупность соотношений, реализующих интервальную версию модели Хольта-Уинтерса (HoltWinters<sup>I</sup>) применительно к аддитивной форме сезонности, имеет вид:

$$\begin{aligned} \tilde{T}_{r+1} &= L_r^I + T_r^I + S_{r-q}^I, \\ L_r^I &= A(I_r - S_{r-q}^I) + (E - A)(L_{r-1}^I + T_{r-1}^I), \\ T_r^I &= B(L_r^I - L_{r-1}^I) + (E - B)T_{r-1}^I, \\ S_r^I &= G(I_r - L_{r-1}^I - T_{r-1}^I) + (E - G)S_{r-q}^I. \end{aligned} \quad (6)$$

Сопоставление (6) с моделью Holt<sup>I</sup> (4) показывает, что в уравнение расчета прогнозируемого вектора уровня внесено слагаемое  $S_{r-q}^I = \left\| \underline{S}_{r-q}^I, \bar{S}_{r-q}^I \right\|^T$ , представляющее собой вектор сезонной составляющей за предыдущий сезон (периодичность сезонности задается величиной лага  $q$ );  $\underline{S}_{r-q}^I$ ,  $\bar{S}_{r-q}^I$  — нижняя и верхняя границы интервала значений указанной сезонной составляющей. Расчет вектора тренда остается таким же, как и в модели Holt<sup>I</sup>. В свою очередь, добавляется новое уравнение для расчета вектора сезонной составляющей, которое учитывает сглаженную разность между вектором интервальнозначной оценки контролируемого параметра на текущем шаге и аналогичным вектором для предыдущего периода. В этом уравнении используется дополнительная матрица  $G = \left\| \gamma_{ij} \right\|$  коэффициентов сглаживания  $\gamma_{ij}$ , которые также удовлетворяют условиям:

$$0 \leq \gamma_{ij} \leq 1, \quad i, j = 1, 2. \quad (7)$$



Ниже приводится развернутая запись уравнений модели:

$$\begin{aligned}
 L_r^I &= \left\| \begin{matrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{matrix} \left\| \begin{matrix} \bar{I}_r - \bar{S}_{r-q} \\ \underline{L}_r - \underline{S}_{r-q} \end{matrix} \right\| + \left\| \begin{matrix} 1 - \alpha_{11} & -\alpha_{12} \\ -\alpha_{21} & 1 - \alpha_{22} \end{matrix} \left\| \begin{matrix} \bar{L}_{r-1} - \bar{T}_{r-1} \\ \underline{T}_{r-1} \end{matrix} \right\| \right\| = \left\| \begin{matrix} \alpha_{11}(\bar{I}_r - \bar{S}_{r-q} - \bar{L}_{r-1} - \bar{T}_{r-1}) + \alpha_{12}(\underline{L}_r - \underline{S}_{r-q} - \underline{L}_{r-1} - \underline{T}_{r-1}) + \bar{L}_{r-1} + \bar{T}_{r-1} \\ \alpha_{21}(\bar{I}_r - \bar{S}_{r-q} - \bar{L}_{r-1} - \bar{T}_{r-1}) + \alpha_{22}(\underline{L}_r - \underline{S}_{r-q} - \underline{L}_{r-1} - \underline{T}_{r-1}) + \underline{L}_{r-1} + \underline{T}_{r-1} \end{matrix} \right\|, \\
 T_r^I &= \left\| \begin{matrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \end{matrix} \left\| \begin{matrix} \bar{L}_r - \bar{L}_{r-1} \\ \underline{L}_r - \underline{L}_{r-1} \end{matrix} \right\| + \left\| \begin{matrix} 1 - \beta_{11} & -\beta_{12} \\ -\beta_{21} & 1 - \beta_{22} \end{matrix} \left\| \begin{matrix} \bar{T}_{r-1} \\ \underline{T}_{r-1} \end{matrix} \right\| \right\| = \left\| \begin{matrix} \beta_{11}(\bar{L}_r - \bar{L}_{r-1} - \bar{T}_{r-1}) + \beta_{12}(\underline{L}_r - \underline{L}_{r-1} - \underline{T}_{r-1}) + \bar{T}_{r-1} \\ \beta_{21}(\bar{L}_r - \bar{L}_{r-1} - \bar{T}_{r-1}) + \beta_{22}(\underline{L}_r - \underline{L}_{r-1} - \underline{T}_{r-1}) + \underline{T}_{r-1} \end{matrix} \right\|, \quad (8) \\
 S_r^I &= \left\| \begin{matrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{matrix} \left\| \begin{matrix} \bar{I}_r - \bar{L}_{r-1} - \bar{T}_{r-1} \\ \underline{L}_r - \underline{L}_{r-1} - \underline{T}_{r-1} \end{matrix} \right\| + \left\| \begin{matrix} 1 - \gamma_{11} & -\gamma_{12} \\ -\gamma_{21} & 1 - \gamma_{22} \end{matrix} \left\| \begin{matrix} \bar{S}_{r-q} \\ \underline{S}_{r-q} \end{matrix} \right\| \right\| = \left\| \begin{matrix} \gamma_{11}(\bar{I}_r - \bar{L}_{r-1} - \bar{T}_{r-1} - \bar{S}_{r-q}) + \gamma_{12}(\underline{L}_r - \underline{L}_{r-1} - \underline{T}_{r-1} - \underline{S}_{r-q}) + \bar{S}_{r-q} \\ \gamma_{21}(\bar{I}_r - \bar{L}_{r-1} - \bar{T}_{r-1} - \bar{S}_{r-q}) + \gamma_{22}(\underline{L}_r - \underline{L}_{r-1} - \underline{T}_{r-1} - \underline{S}_{r-q}) + \underline{S}_{r-q} \end{matrix} \right\|.
 \end{aligned}$$

Особую актуальность приобретает задача выбора начальных векторов уровня  $L_0^I = \left\| \underline{L}_0, \bar{L}_0 \right\|^T$ , тренда  $T_0^I = \left\| \underline{T}_0, \bar{T}_0 \right\|^T$ , а также совокупности векторов сезонных факторов  $S_{i-q}^I = \left\| \underline{S}_{i-q}, \bar{S}_{i-q} \right\|^T$ , где  $i = 1, 2, \dots, q$ , которые, как показали исследования, существенно влияют на итоговую точность прогноза. Отметим, что векторы  $S_{i-q}^I$  при  $i < q$  соответствуют условным отрицательным индексам.

В известной литературе эта задача еще не решена в полной мере. Рекомендации по заданию начальных векторов для модели Holt<sup>I</sup> [9] здесь не применимы, так как указанная модель не учитывает сезонной составляющей.

В данной работе предлагаются следующие соотношения для формирования начальных векторов:

$L_0^I = \frac{1}{q} \sum_{r=1}^q I_r$  — для задания начального вектора уровня (средний вектор уровня за первый сезон, учитываемый ИВР);

$T_0^I = \frac{1}{q^2} \sum_{r=1}^q (I_{r+q} - I_r)$  — для задания начального вектора тренда (вектор средних отклонений уровня за сезон; при этом необходимо, чтобы временной ряд содержал числовую информацию как минимум за два сезона);

$S_i^I = I_i - L_0^I, i = 1, 2, \dots, q$  — для задания совокупности начальных векторов сезонной составляющей (разности векторов исходных значений контролируемого параметра за первый сезон и начального вектора уровня).

Элементы матриц  $A, B$  и  $G$ , содержащих коэффициенты сглаживания, могут быть определены исходя из условия минимума квадратичной меры ошибки прогноза, которая имеет следующий вид:

$$R(A, B, G) = \sum_{r=3}^n (I_r - \tilde{I}_r)^T (I_r - \tilde{I}_r) =$$

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{r=3}^n \left\| \begin{matrix} \bar{I}_r - \bar{S}_{r-q-1} - \bar{L}_{r-1} - \bar{T}_{r-1} \\ \underline{L}_r - \underline{S}_{r-q-1} - \underline{L}_{r-1} - \underline{T}_{r-1} \end{matrix} \right\|^T \times \\
 &\times \left\| \begin{matrix} \bar{I}_r - \bar{S}_{r-q-1} - \bar{L}_{r-1} - \bar{T}_{r-1} \\ \underline{L}_r - \underline{S}_{r-q-1} - \underline{L}_{r-1} - \underline{T}_{r-1} \end{matrix} \right\| = \\
 &= \sum_{r=3}^n (\bar{I}_r - \bar{S}_{r-q-1} - \bar{L}_{r-1} - \bar{T}_{r-1})^2 + \\
 &+ \sum_{r=3}^n (\underline{L}_r - \underline{S}_{r-q-1} - \underline{L}_{r-1} - \underline{T}_{r-1})^2. \quad (9)
 \end{aligned}$$

В процессе поиска минимума  $R(A, B, G)$  следует учитывать ограничения (5), (7).

Сформулированную задачу нелинейной оптимизации в соответствии с рекомендациями [9] предлагается решать с помощью специальной версии алгоритма Бroyдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно для ограниченного объема компьютерной памяти [10] применительно к учету ограничений типа неравенств на значения переменных (L-BFGS-B).

#### Оценка эффективности применения предложенной модели

Для оценки эффективности применения предложенной интервальной модели при прогнозировании состояния ГС по реальным данным был проведен ряд исследований. Они включали:

- определение точности прогнозов, полученных с помощью предложенной модели;
- сравнительный анализ результатов прогнозирования, полученных с помощью «традиционной» и интервальной версий соответствующих моделей;
- сопоставление результатов использования интервальной модели с выводами на основе комбинирования прогнозов, выполненных отдельно по верхним и нижним границам интервалов изменения исходных данных.

Модель HoltWinters<sup>1</sup> была реализована с помощью языка программирования Python и свободно распространяемых библиотек для научных вычислений и обработки статистических данных: Scipy, Numpy и Pandas. В процессе компьютерного эксперимента были использованы наборы архивных данных СТК, в которых присутствует ярко выраженная сезонная составляющая: значения выходного давления газа для ГРП. Ввиду неравномерности (неполноты) временного ряда, формируемого на основе собранной с помощью СТК информации, и стремления получить ВР с заданными одинаковыми промежутками между временными отметками данные предварительно дополнялись значениями параметра в «пропущенные» моменты времени с помощью метода линейной интерполяции. Это позволило далее перейти к ИВР с фиксированным периодом в один час, поставив в соответствие каждой временной метке минимальные и максимальные показания параметра за этот час.

Прогноз поведения параметра осуществлялся на два сезона вперед, результаты, в свою очередь, сравнивались с реальными показаниями за этот период времени. Прогнозные значения параметра ГС (рисунок 4), полученные на основе предложенной интервальной модели, по своему уровню и характеру изменений достаточно хорошо совпали с реальными данными.

Кроме того, было проведено сравнительное исследование результатов прогнозирования с помощью интервальной модели и прогноза на базе использования «традиционной» модели, оперирующей набором «скалярных» (неинтервальнозначных) данных.

По итогам сопоставления (рисунок 5) следует указать, что обе модели позволяют выполнить адекватный прогноз изменения значений параметра в будущем. При этом прогноз с помощью интервальной модели более информативен для принятия решений, так как не предусматривает сглаживания в пределах периода ВР, а выполняется с



Рисунок 4. Пример прогноза на основе интервальной модели с учетом сезонности

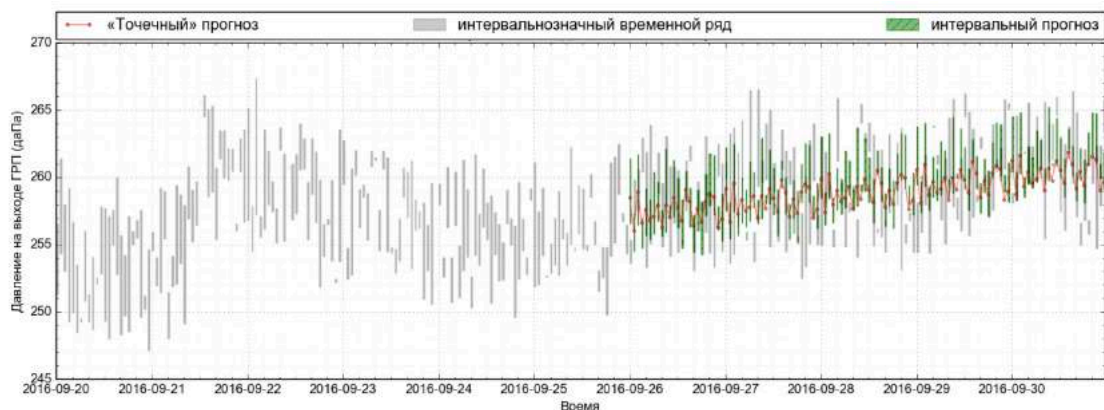
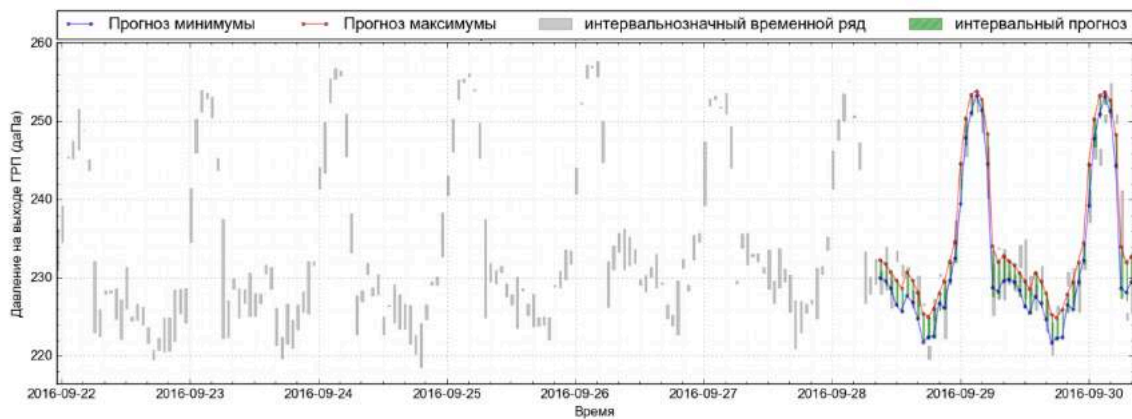


Рисунок 5. Сравнение результатов прогнозирования с использованием интервальной и традиционной моделей



**Рисунок 6.** Сравнение результатов прогнозирования с использованием интервальной модели и на основе комбинации отдельных прогнозов по границам интервалов

учетом максимума и минимума значений параметра за каждый период.

Сравнение прогнозов, полученных с помощью интервальной модели, и комбинации прогнозов, выполненных отдельно по верхним и нижним границам интервалов изменения исходных данных (рисунок 6), производилось путем сопоставления квадратичных мер ошибок согласно методу [9]. Следует отметить, что для большинства наборов исходных данных (19 из 20-ти) комбинации отдельных прогнозов по верхним и нижним границам интервалов в конечном итоге приводили к некорректным результатам, когда верхняя граница прогнозируемой величины оказывалась меньше нижней. В то же время, в тех случаях, когда такая некорректность не возникала, указанная комбинация прогнозов давала более точный результат по сравнению с интервальной моделью.

Дальнейшее исследование выявило, что увеличение длины исходного набора данных приводит к уменьшению суммарной квадратичной меры ошибок и, следовательно, росту точности прогнозирования с помощью интервальной модели в сравнении с комбинацией отдельных прогнозов по информации о границах интервалов. Таким образом, предложенный подход обладает наиболее благоприятными перспективами.

В целом исследование подтвердило работоспособность модифицированной модели на практике. Точность прогноза на базе применения интервальных временных рядов

зависит от размера и характеристик исходного набора данных. В качестве недостатка предложенного подхода необходимо отметить, что время определения значений сглаживающих коэффициентов с помощью оптимизационного алгоритма применительно к интервальной модификации на порядок больше, чем для традиционной версии модели, что объясняется увеличившимся количеством указанных коэффициентов.

### Заключение

В статье предложено осуществлять прогнозирование состояния газораспределительной сети на основе представления данных об ее контролируемых параметрах в форме интервальных временных рядов, содержащих сезонную составляющую. С целью реализации этого подхода разработана специальная модель HoltWinters<sup>1</sup> — аналог модели Хольта-Уинтерса, предназначенный для оперирования интервальнозначными данными. Прогноз, полученный с помощью указанной модели, более информативен для принятия решений, нежели прогноз с использованием традиционных моделей, так как соответствующий алгоритм не предусматривает сглаживания в пределах периода временного ряда. Расчеты, выполненные для реальных данных, показывают, что предложенный подход на данном этапе оказывается более полезным для формирования долгосрочных прогнозов, на большом наборе данных, когда ощутимы его преимущества и в меньшей степени сказываются его

недостатки (достаточно низкая скорость определения коэффициентов модели в процессе оптимизационного поиска). Тем не менее, авторы считают, что его возможности далеко не исчерпаны, и методы прогнозирования, использующие ИВР, способны занять достой-

ное место в перечне средств моделирования, основанных на интервальном представлении данных (таких как модели неопределенности на базе аппарата интервальных вероятностей [11, 12] и др.).

### Список литературы

1. Фастов Л.М., Медведева О.Н., Соловьева Е.Б. Надежность систем газоснабжения: монография. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т. 2012. 142 с.

2. Крымский В.Г., Жалбеков И.М., Имильбаев Р.Р., Юнусов А.Р. Автоматизация управления технологическими процессами в газораспределительных сетях: проблемы, тенденции и перспективы // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9. № 2. С. 70–79.

3. Крымский В.Г., Ахмеджанов Ф.М., Имильбаев Р.Р., Юнусов А.Р. Выбор периодичности обновления информации о состоянии газораспределительной сети при использовании системы телеметрии // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 1. С. 78–85.

4. Имильбаев Р.Р. Анализ эффективности применения алгоритмов прогнозирования в процессе контроля состояния газораспределительной сети // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12. № 1. С. 64–74.

5. Чучуева И.А. Классификация методов и моделей прогнозирования [Электронный ресурс]. URL: <https://habrahabr.ru/post/177633> (дата обращения: 15.10.2016).

6. Holt C.C. Forecasting Seasonal and Trends by Exponentially Weighted Averages // International Journal of Forecasting. 2004. V. 20. No. 1. P. 5–10.

7. Hyndman R.J., Athanasopoulos G. Forecasting: Principles and Practice. 2013. 291 p.

8. Крымский В.Г., Ахмеджанов Ф.М., Имильбаев Р.Р., Юнусов А.Р. Прогнозирование состояния газораспределительной сети на основе данных телеметрии для предупреждения аварийных ситуаций // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. Т. 11. № 2. С. 37–42.

9. Maia A.L.S., De Carvalho F.A.T. Holt's Exponential Smoothing Model for Interval-Valued Time Series // Anais do Workshop Franco-Brasileiro sobre Mineração de Dados. Recife, Brazil, 2009. pp. 38–39.

10. Byrd R.H., Lu P., Nocedal J., Zhu C. A Limited Memory Algorithm for Bound Constrained Optimization // SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing. 1995. V. 16. pp. 1190–1208.

11. Kozine I.O., Krymsky V.G. Computing Interval-Valued Statistical Characteristics: Where is the Stumbling Block for Reliability Applications? // International Journal of General Systems. 2009. Vol. 38. No.5. P. 547–565.

12. Kozine I.O., Krymsky V.G. An Interval-Valued Reliability Model with Bounded Failure Rates // International Journal of General Systems. 2012. Vol. 41. No. 8. P. 760–773.

### References

1. Fastov L.M., Medvedeva O.N., Solov'eva E.B. Nadezhnost' sistem gazosnabzhenija: monografija. Saratov: Sarat. gos. tehn. un-t. 2012. 142 s.

2. Krymsky V.G., Zhalbekov I.M., Imilbaev R.R., Yunusov A.R. Avtomatizacija upravlenija tehnologicheskimi processami v gazoraspredeletel'nyh setjah: problemy, tendencii i perspektivy // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2013. T. 9. № 2. S. 70–79.

3. Krymsky V.G., Ahmedzhanov F.M., Imilbaev R.R., Yunusov A.R. Vybora periodichnosti obnovlenija informacii o sostojanii gazoraspredeletel'noj seti pri ispol'zovanii sistemy telemetrii // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2014. T. 10. № 1. S. 78–85.

4. Imilbaev R.R. Analiz jeffektivnosti primenenija algoritmov prognozirovaniya v processe kontrolja sostojanija gazoraspredeletel'noj seti // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2016. T. 12. № 1. S. 64–74.



5. Chuchueva I.A. Klassifikacija metodov i modelej prognozirovanija [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://habrahabr.ru/post/177633> (data obrashhenija: 15.10.2016).
6. Holt C.C. Forecasting Seasonal and Trends by Exponentially Weighted Averages // *International Journal of Forecasting*. 2004. V. 20. No. 1. P. 5–10.
7. Hyndman R.J., Athanasopoulos G. *Forecasting: Principles and Practice*. 2013. 291 p.
8. Krymsky V.G., Ahmedzhanov F.M., Imi'baev R.R., Yunusov A.R. Prognozirovanie sostojanija gazoraspredeletel'noj seti na osnove dannyh telemekhaniki dlja preduprezhdenija avarijnyh situacij // *Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekxy i sistemy*. 2015. T. 11. № 2. S. 37–42.
9. Maia A.L.S., De Carvalho F.A.T. Holt's Exponential Smoothing Model for Interval-Valued Time Series // *Anais do Workshop Franco-Brasileiro sobre Mineraçao de Dados*. Recife, Brazil, 2009. pp. 38–39.
10. Byrd R.H., Lu P., Nocedal J., Zhu C. A Limited Memory Algorithm for Bound Constrained Optimization // *SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing*. 1995. V. 16. pp. 1190–1208.
11. Kozine I.O., Krymsky V.G. Computing Interval-Valued Statistical Characteristics: Where is the Stumbling Block for Reliability Applications? // *International Journal of General Systems*. 2009. Vol. 38. No. 5. P. 547–565.
12. Kozine I.O., Krymsky V.G. An Interval-Valued Reliability Model with Bounded Failure Rates // *International Journal of General Systems*. 2012. Vol. 41. No. 8. P. 760–773.



**Гвоздев В. Е.**  
**Gvozdev V. E.**

доктор технических наук,  
профессор, заведующий  
кафедрой «Техническая  
кибернетика», ФГБОУ ВО  
«Уфимский государственный  
авиационный технический  
университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация



**Костюкова А. П.**  
**Kostyukova A. P.**

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



**Кириллов К. В.**  
**Kirillov K. V.**

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

УДК 004.052

## СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ ПО НЕПОЛНЫМ СВЕДЕНИЯМ О ВЫБОРОЧНЫХ ДАННЫХ

Настоящая работа посвящена проблеме оценивания законов распределения случайных величин применительно к анализу надежности аппаратно-программных комплексов в условиях ограниченных по объему исходных данных. Подчеркивается, что указанные условия являются весьма распространенными, поскольку зачастую на предприятиях база данных о результатах стендовых и полигонных испытаний, подконтрольной и промышленной эксплуатации не ведется вообще, либо ведется в неполной мере, либо в силу организационных или иных причин утрачивается. В этой связи для анализа показателей надежности используются сводные отчеты о результатах испытаний, а также экспертные заключения специалистов, выраженные в произвольной форме.

Целью исследования в рамках работы является создание метода оценивания статистических свойств показателей точности оценивания характеристик надежности аппаратных компонентов аппаратно-программных комплексов в случае, когда известна оценка параметра показательного закона распределения случайной величины, а также возможный диапазон объемов выборочных данных, которому соответствует оценка параметра закона распределения.

Приведены результаты статистического эксперимента, в ходе которого оценивались статистические характеристики показателей точности и устойчивости оценки закона распределения в зависимости от величины диапазона изменения объема выборки и варианта его назначения.

**Ключевые слова:** распределение случайных величин, надежность, аппаратно-программный комплекс, малая выборка, интервальное оценивание, статистические характеристики.

## STATISTICAL ESTIMATION OF RELIABILITY INDICES OF DATA PROCESSING AND MANAGEMENT SYSTEMS BASED ON INCOMPLETE INFORMATION ON SAMPLE DATA

This research is dedicated to the problem of estimation of random variable distribution laws in terms of reliability assessment of hardware and software complexes incircumstances where the size of input data is limited. It is emphasized that the specified circumstances are of quite frequent occurrence as in many cases bench and field tests results databases are not maintained at enterprises, function tests' and commercial operation databases are not maintained at all, or yet to be fully implemented, or are lost due to organizational or other reasons. Therefore, summary reports on test results, as well as experts' evaluations prepared in free form, are used for dependability indices analysis.

Thus, the purpose of the research in the framework of this work is to provide a method of estimating statistical properties of accuracy indicators of assessed value of reliability characteristics of hardware components of software and hardware complexes in the circumstances when assessed value of random variable distribution law parameter is known, as well as the possible range of sizes of sample data, to which corresponds the assessed value of the distribution law parameter.

The results of the statistical experiment, in which statistical characteristics of precision factors and stability indices of the distribution law assessed value have been estimated depending on the span of range of sample size variation and treatments of its assignment, have been provided.

**Key words:** random variable distribution, dependability, software and hardware complex, small sample, interval estimation, statistical characteristics.

### Введение

Оценивание законов распределения случайных величин по выборочным данным относится к числу базовых задач управления надежностью программных и аппаратных компонентов систем управления и обработки данных [1]. Подходы к её решению давно и подробно описаны в литературе, в том числе для случаев обработки выборок малого объёма [2–6].

В последние десятилетия достаточно типичным явлением была утрата на предприятиях массивов исходных данных, полученных при проведении стендовых, полигонных испытаний и в результате подконтрольной эксплуатации. Вместе с тем, сохранились отчеты, содержащие сведения об агрегированных оценках характеристик надежности изделий (интенсивность отказов; коэффициент готовности; вероятность безотказной работы и т.д.). Кроме того, из общения со специалистами возможно получение экспертных оценок условий испытаний, которым соответствуют эти агрегированные оценки характеристик надежности [7].

Оживление промышленного производства актуализирует задачу сравнительного анализа

нефункциональных характеристик новых образцов технических систем с аналогичными характеристиками ранее создававшихся объектов. Основой сравнительного анализа свойств объектов на основе обработки экспериментальных данных являются показатели точности, устойчивости, а также доверительные границы упомянутых параметров, определяемые по выборочным данным [8].

В настоящей статье рассматривается частная задача оценивания статистических свойств показателей точности оценивания характеристик надежности аппаратных компонентов аппаратно-программных комплексов в случае, когда известна оценка параметра показательного закона распределения случайной величины, а также возможный диапазон объёмов выборочных данных, которому соответствует оценка параметра закона распределения. Акцентирование внимания на показательном законе распределения обусловлено тем, что тип закона распределения является доминирующим при решении задач анализа надежности компоненты электронных систем обработки данных и управления, являющихся частью сложных технических систем [9, 10].

1. Постановка задачи

Дано:

- а) Оценка параметра показательного закона распределения случайной величины  $\hat{\lambda}$ ;
- б) Диапазон объемов выборочных данных  $[N^{(H)}, N^{(B)}]$ , при которых получены  $\hat{\lambda}$ ;
- в) Заданное значение гамма-процентного ресурса  $\gamma\%$ .

Требуется:

оценить статистические характеристики показателей точности и устойчивости оценки закона распределения времени наработки до отказа в зависимости от величины диапазона  $[N^{(H)}, N^{(B)}]$ , а также интервальные оценки времени наработки до отказа при заданном значении гамма-процентного ресурса при разных подходах к определению объема выборочных данных.

Подход к интервальному оцениванию времени наработки до отказа при заданном значении гамма-процентного ресурса иллюстрирует графическая модель, представленная на рисунке 1, на котором  $\hat{F}_0(x)$  — оценка функции распределения, соответствующая  $\hat{\lambda}$ ;

$\hat{F}^{(H)}(x)$  — нижняя граница диапазона возможных значений функции распределения;

$\hat{F}^{(B)}(x)$  — верхняя граница диапазона возможных значений функции распределения;

$\hat{F}^{(H)}(x^*)$  — нижняя граница показателя надежности, соответствующая заданному значению  $x^*$ ;

$\hat{F}^{(B)}(x^*)$  — верхняя граница показателя надежности, соответствующая заданному значению  $x^*$ ;

$x_{min}$  — нижняя граница интервала случайной величины, соответствующего заданному значению  $\gamma$ ;

$x_{max}$  — верхняя граница интервала случайной величины, соответствующего заданному значению  $\gamma$ .

Различие в подходах к решению задачи определяется подходами к назначению объема выборочных данных. Возможны следующие варианты определения объема выборки.

*Вариант 1.* Объем выборки является целым случайным числом  $N \in [N^{(H)}, N^{(B)}]$ .

*Вариант 2.* Объем выборки является фиксированным и определяется как

$$N = \frac{[N^{(H)} + N^{(B)}]}{2}. \quad (1)$$

2. Описание схемы вычислительного эксперимента

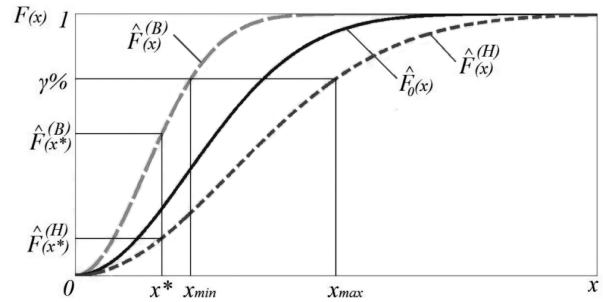


Рисунок 1. Графическая модель интервального оценивания значений времени наработки до отказа невосстанавливаемого объекта

Основу решения задачи при выборе первого варианта назначения объема выборки составляет статистический эксперимент.

*Шаг 1.* По известному значению  $\lambda$  строится интегральная функция распределения

$$F_0(x) = 1 - e^{-\lambda x}. \quad (2)$$

*Шаг 2.* Посредством датчика равномерно распределенных чисел генерируется целое число  $N^{(i)}$ , лежащее в диапазоне  $N \in [N^{(H)}, N^{(B)}]$ .  $i = \overline{1; \eta}$  — номер эксперимента,  $\eta$  — количество повторов эксперимента.

*Шаг 3.* На основании (2) методом обратных функций [11] генерируется случайная выборка  $x_1, \dots, x_{N^{(i)}}$ , где  $N^{(i)}$  — объем выборки, определяемый в шаге 2.

*Шаг 4.* По сформированной выборке строится оценка  $\hat{F}_i(x)$ , на основании которой определяется характеристика точности оценивания, вычисляемая по выражению (3):

$$d_i = \sup_x |F_0(x) - \hat{F}_i(x)|, \quad (3)$$

где  $x \in [0; 8\hat{\sigma}_i)$ ,  $\hat{\sigma}_i = \frac{N^{(i)}}{\sum_{j=1}^{N^{(i)}} x_j}$ .

*Шаг 5.* Повторяя заданное число  $\eta$  раз шаги 2–4, формируется массив  $d_1, \dots, d_\eta$ , по элементам которого оцениваются значения показателя точности

$$\hat{M}[d] = \frac{\sum_{i=1}^{\eta} d_i}{\eta} \quad (4)$$

и устойчивости

$$\hat{\sigma}[d] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{\eta} (d_i - \hat{M}[d])^2}{\eta - 1}} \quad (5)$$



оценок закона распределения  $\hat{F}_i(x)$ ,  $i = \overline{1; \eta}$ , а также интервальных оценок показателей надежности изделия и гамма-процентного ресурса.

При проведении эксперимента и подготовке материалов для данной статьи  $\eta$  принимали равным  $\eta = 10^4$ .

**Шаг 6.** По совокупности оценок законов распределения  $\hat{F}_i(x^*)$  при заданном значении аргумента  $x^*$  определялись  $\hat{F}_{(x^*)}^{(B)} = \max_i \{\hat{F}_i(x^*)\}$ ,  $\hat{F}_{(x^*)}^{(H)} = \min_i \{\hat{F}_i(x^*)\}$ ,  $i = \overline{1; \eta}$  (см. рисунок 1).

В ходе исследований полагалось, что  $x \in [0; 8\hat{\sigma}^{(\max)}]$ , где  $\hat{\sigma}^{(\max)} = \max_i \{\hat{\sigma}_i\}$ .

В качестве конкурирующей выступала схема, соответствующая второму варианту назначения объема выборки. Схема статистического эксперимента в этом случае была той

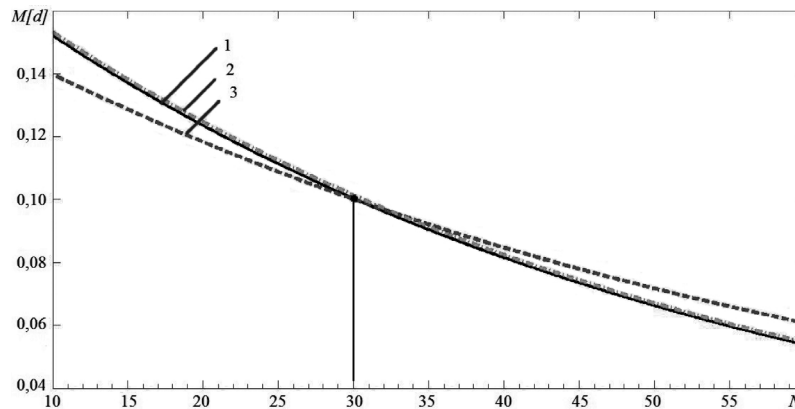
же, что и описанная выше, за исключением того, что отсутствовал шаг 2, а  $N$  определялось по выражению (1).

### 3. Результаты вычислительного эксперимента

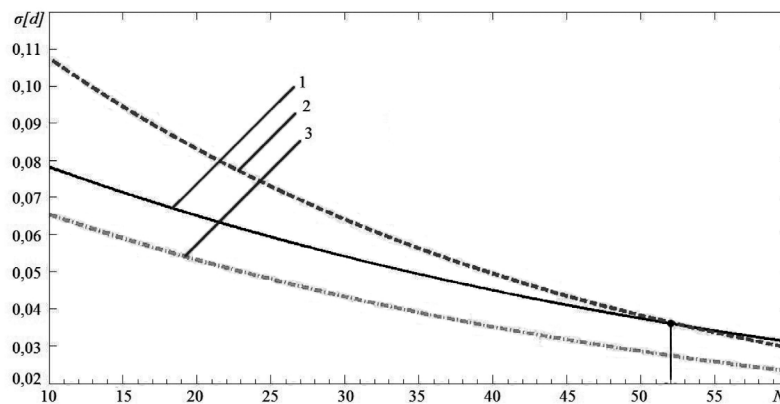
Графическое выражение полученных в ходе эксперимента результатов изображено на рисунках 2–4.

Проведенные исследования позволяют сделать заключение о том, что при малых объемах выборочных данных результаты, полученные при случайном назначении объема выборки  $N \in [N^{(H)}, N^{(B)}]$ , более точные, чем результаты, полученные при определении объема выборки по соотношению (1).

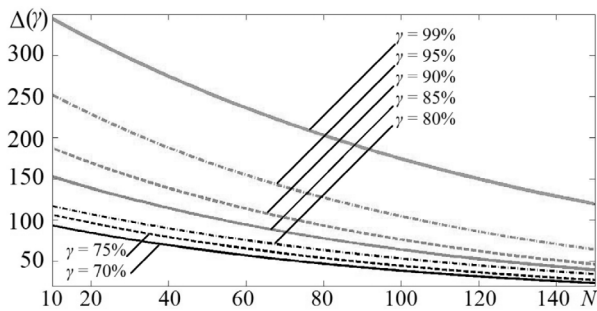
Вместе с тем, граничные объемы выборок, при которых первый вариант назначения  $N$



**Рисунок 2.** Зависимость математического ожидания абсолютной погрешности оценивания закона распределения, вычисляемого по выражению (4), от объема выборки при: объеме выборки  $N$ , определяемом на основании выражения (1) (1); разбросе объема выборки  $N = \pm \alpha N$ ,  $\alpha = 0,2$  (2); разбросе объема выборки  $N = \pm \alpha N$ ,  $\alpha = 0,5$  (3)



**Рисунок 3.** Зависимость среднеквадратического отклонения абсолютной погрешности оценивания закона распределения, вычисляемого по выражению (5), от объемов выборки при: объеме выборки  $N$ , определяемом на основании выражения (1) (1); разбросе объема выборки  $N = \pm \alpha N$ ,  $\alpha = 0,2$  (2); разбросе объема выборки  $N = \pm \alpha N$ ,  $\alpha = 0,5$  (3)



**Рисунок 4.** Зависимость величины интервала  $\Delta(\gamma) = x_{\max} - x_{\min}$  от объема выборки

является более предпочтительным, зависит от выбора критерия точности оценивания закона распределения случайной величины.

Так, при использовании в качестве доминирующего критерия «Показатель точности» первый вариант назначения объема выборки дает лучшие результаты при объемах выборки, не превышающих 15–25.

Использование в качестве доминирующего критерия характеристики устойчивости демонстрирует преимущество первого варианта назначения  $N$  при объемах выборки, не превышающих 50–55.

### Список литературы

1. Липаев В.В. Надежность программных средств. М.: СИНТЕГ, 1998. 232 с.
2. Гаскаров Д.В., Шаповалов В.И. Малая выборка. М.: Статистика, 1978. 248 с.
3. Ивановский Р.И. Теория вероятности и математическая статистика. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 528 с.
4. Амосова Н.Н. Вероятностные разделы математики / Под ред. Ю.Д. Максимова. СПб.: Изд-во «Иван Федоров», 2001. 592 с.
5. Статистическое исследование территориальных систем: монография / М.Б. Гузаиров, В.Е. Гвоздев, Б.Г. Ильясов, А.Е. Колоденкова. М.: Машиностроение, 2008. 187 с.
6. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов: учеб. пособие. СПб.: Питер, 2005. 479 с.
7. Субхангулова А.С., Ахметова Д.Р., Кириллов К.В. Оценка характеристик надежности сложных АПК по архивным данным

### Заключение

Предложен метод анализа показателей точности, устойчивости, а также интервального оценивания характеристик надежности аппаратных компонентов систем обработки данных и управления, отличающийся от известных методов анализа характеристик надежности тем, что объем выборочных данных представляется в виде интервальной оценки. Определены границы применимости разных способов назначения объемов выборки в случае показательного закона распределения времени наработки до отказа.

Предложенный метод создает основу разработки формальной процедуры сравнительного анализа характеристик надежности технических устройств в случае неполных сведений о выборочных данных. Данный метод делает возможным разработку специализированного инструментального программного средства в составе систем автоматизированного проектирования аппаратно-программных комплексов.

организации-разработчика // Интеллектуальные технологии обработки информации и управления (ИТIRM'2015): сб. докл. III Междунар. конф. Уфа, 2015.

8. Гвоздев В.Е., Ахуньянова К.Б. Анализ влияния структурных решений и интервальных характеристик надежности комплектующих элементов на характеристики надежности радиоэлектронной аппаратуры [Электронный ресурс] // ИТиС — 2015: тр. IV Междунар. науч. конф., Банное, Россия, 25 февраля — 01 марта 2015 г. 2015.

9. Липаев В.В. Функциональная безопасность программных средств. М.: СИНТЕГ, 2004. 348 с.

10. Кириллов К.В. Оценивание показателей состояния аппаратно-программных комплексов при переменном объеме выборочных данных [Электронный ресурс] // ИТиС — 2016: тр. V Междунар. науч. конф., Банное, Россия, 24 — 28 февраля 2016 г. 2016.

11. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М.: Изд-во «Наука», 1973. 312 с.

### References

1. Lipaev V.V. Nadezhnost' programmnyh sredstv. M.: SINTEG, 1998. 232 s.
2. Gaskarov D.V., Shapovalov V.I. Malaja vyborka. M.: Statistika, 1978. 248 s.
3. Ivanovskij R.I. Teorija verojatnosti i matematicheskaja statistika. Osnovy, prikladnye aspekty s primerami i zadachami v srede Mathcad. SPb.: BHV-Peterburg, 2008. 528 s.
4. Amosova N.N. Verojatnostnye razdely matematiki / Pod red. Ju.D. Maksimova. SPb.: Izd-vo «Ivan Fedorov», 2001. 592 s.
5. Statisticheskoe issledovanie territorial'nyh sistem: monografija / M.B. Guzairov, V.E. Gvozdev, B.G. Il'jasov, A.E. Kolodenkova. M.: Mashinostroenie, 2008. 187 s.
6. Cherkesov G.N. Nadezhnost' apparatno-programmnyh kompleksov: ucheb. posobie. SPb.: Piter, 2005. 479 s.
7. Subhangulova A.S., Ahmetova D.R., Kirillov K.V. Ocenka harakteristik nadezhnosti slozhnyh APK po arhivnym dannym organizacii-razrabotchika // Intellektual'nye tehnologii obrabotki informacii i upravlenija (ITIPM'2015): sb. dokl. III Mezhdunar. konf. Ufa, 2015.
8. Gvozdev V.E., Ahun'janova K.B. Analiz vlijanija strukturnyh reshenij i interval'nyh harakteristik nadezhnosti komplektujushhh jelementov na harakteristiki nadezhnosti radioelektronnoj apparatury [Jelektronnyj resurs] // ITiS — 2015: tr. IV Mezhdunar. nauch. konf., Bannoe, Rossija, 25 fevralja — 01 marta 2015 g. 2015.
9. Lipaev V.V. Funkcional'naja bezopasnost' programmnyh sredstv. M.: SINTEG, 2004. 348 s.
10. Kirillov K.V. Ocenivanie pokazatelej sostojanija apparatno-programmnyh kompleksov pri peremennom ob#eme vyborochnykh dannyh [Jelektronnyj resurs] // ITiS — 2016: tr. V Mezhdunar. nauch. konf., Bannoe, Rossija, 24–28 fevralja 2016 g. 2016.
11. Sobol' I.M. Chislennye metody Monte-Karlo. M.: Izd-vo «Nauka», 1973. 312 s.



*Нгуен Данг Тао*  
*Nguyen Dang Tao*  
 (Социалистическая Республика Вьетнам)  
 аспирант ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт  
 (государственный университет)»,  
 г. Долгопрудный, Российская Федерация

УДК 621.372

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ПО ФАЗЕ ПРИЕМОИЗЛУЧАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

В работе показаны результаты исследования модели системы синхронизированных по фазе приемопередатчиков объектов. В системах приемопередатчиков объектов, таких как сети датчиков или подвижные группы роботов, для целей зондирования или связи обычно используются не синхронизированные по фазе приемопередатчики объектов. Синхронизация приемопередатчиков объектов по фазе расширяет возможности системы, позволяя реализовать на базе объектов единую антенную решетку. Рассмотрена структурная схема адаптивной системы синхронизированных по фазе приемопередатчиков объектов и с помощью компьютерного моделирования получены реализуемые такой системой диаграммы направленности.

Сделано предположение, что в результате синхронизации по фазе может быть сформирована оптимальная пространственная диаграмма направленности приема и излучения системы. В качестве основных параметров формируемой диаграммы направленности могут задаваться направление главного максимума, соответствующее направлению прихода полезного сигнала, и направления минимумов, соответствующие направлениям прихода помех. Оптимизация параметров диаграммы направленности системы приемопередатчиков объектов может осуществляться с использованием методов адаптивных антенн.

Автор утверждает, что при практической реализации адаптивной системы синхронизированных по фазе приемопередатчиков объектов, диаграммо-образующую схему и вычислитель векторов весовых коэффициентов необходимо реализовать на объектах, составляющих систему. Исследовалась система с линейным расположением объектов. При этом моделирующая программа была написана с использованием математических библиотек IMSL.

С целью определения необходимой величины обучающего множества в условиях воздействия внутренних шумов приемников объектов было проведено моделирование адаптации по определенному алгоритму при воздействии шумов и воздействии одной помехи с направлением  $30^\circ$ . Показаны наихудшие значения подавления помех из 10 случаев моделирования.

Образование максимумов диаграммы направленности в направлении помех и эталонного сигнала на начальных итерациях позволило предположить, что алгоритм на начальном этапе реализует один из вариантов разделения источников излучения. Численное моделирование подтвердило адекватность предложенной модели для исследования процесса адаптации.

**Ключевые слова:** система приемопередатчиков объектов, диаграмма направленности, антенная решетка.

## SIMULATION OF AN ADAPTIVE SYSTEM IS SYNCHRONIZED WITH THE PHASE OF THE TRANSMITTING AND RECEIVING OBJECTS

The paper shows the results of a study of the system model is synchronized with the phase of the transmitting and receiving objects. In systems transmitting and receiving objects, such as sensor networks or mobile robots group, for the purpose of sensing or communication usually are not



synchronized in phase, the transceivers of the objects. Synchronization of the transceivers of the objects in phase extends the capabilities of the system, allowing to realize on the base of a single antenna field. Structural scheme of such system and with the help of computer simulation, implemented such a system the radiation pattern.

It is suggested that because of the synchronization phase optimal spatial radiation pattern (NAM) reception and radiation of the system can be formed. The main parameters of the formed NAM can be set the direction of the main peak, corresponding to the direction of arrival of the desired signal, and the direction of the minima corresponding to the arrival directions of interference. Optimization parameters NAM system of the transmitting and receiving objects can be carried out using adaptive antenna techniques.

The author argues that in the practical implementation of adaptive systems synchronized in phase of the transmitting and receiving objects DOS computer and IHC is necessary to implement on sites that make up the system. The system with a linear arrangement of objects was investigated. This simulator was written using the IMSL mathematical library.

To determine the necessary size of the training set under the effect of internal noise modeling objects receivers adaptation was carried out by a certain algorithm when exposed to noise and the impact of a noise from the direction of  $30^\circ$ . The worst values of interference suppression in 10 cases of simulation were shown.

Formation Nam maxima in the direction of interference and a reference signal in the initial iterations suggested that initially the algorithm implements one embodiment, the separation of the radiation sources. Numerical modeling has confirmed the adequacy of the proposed model for the study of the adaptation process.

**Key words:** system transmitting and receiving objects, radiation pattern, antenna array.

## Введение

Системы приемоизлучающих объектов в настоящее время получают все большее распространение [1], как системы стационарных объектов, например, сети датчиков, так и системы перемещающихся объектов, например, объединения роботов. Объединение пространственно разнесенных объектов в единую систему позволяет улучшить суммарные характеристики объединения по сравнению с суммарными характеристиками объектов, не связанных между собой.

Системы приемоизлучающих объектов, приемопередатчики которых синхронизированы по фазе, имеют дополнительные возможности улучшения характеристик. Приемопередающая аппаратура, установленная на каждом из объектов, имеет ограничения по излучаемой мощности и пространственной селективности в связи с требованиями минимальной массы и габаритов объекта. Синхронизация приемопередатчиков объектов по фазе при объединении объектов в систему позволяет снять эти ограничения. В результате синхронизации по фазе может быть сформирована оптимальная пространственная диаграмма направленности (ДН)

приема и излучения системы. В качестве основных параметров формируемой ДН задаются направление главного максимума, соответствующее направлению прихода полезного сигнала, и направления минимумов, соответствующие направлениям прихода помех. Оптимизация параметров ДН системы приемоизлучающих объектов с может осуществляться с использованием методов адаптивных антенн [2].

Во многих случаях системы приемоизлучающих объектов состоят из объектов со случайными или изменяющимися координатами объектов. Для таких систем могут применяться методы адаптации, которые не требуют информации о координатах объектов адаптивной системы (АС), например, метод сравнения с эталоном [3] и его различные модификации. В работе представлена структурная схема такой системы и результаты компьютерного моделирования процесса адаптации.

*Модель адаптивной системы синхронизированных по фазе приемоизлучающих объектов*

Работу адаптивной системы упрощенно можно представить схемой (рисунок 1).

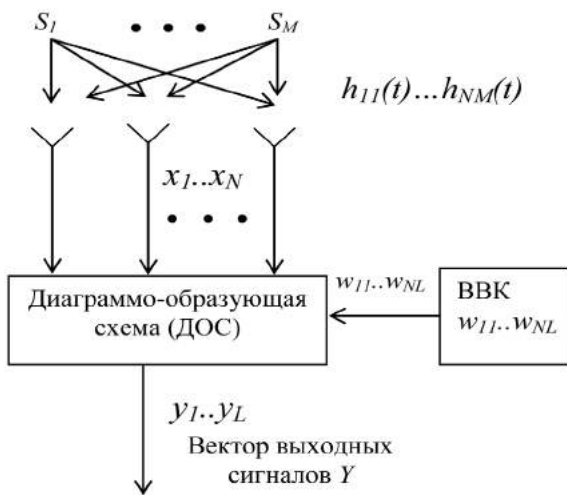


Рисунок 1. Адаптивная система на стороне приемника

Сигналы от  $M$  источников излучения умножаются на элементы матрицы коэффициентов распространения  $H h_{nm}$ , после чего поступают на входы  $N$  объектов. На входе  $n$ -го объекта формируется сигнал

$$x_n(t) = \sum_{m=1}^M h_{nm} S_m(t) + \xi_n(t), \quad (1)$$

где  $\xi_n$  — внутренний шум  $n$ -го приемника;  $h_{nm}$  — коэффициент передачи сигнала от  $m$ -го источника  $n$ -у приемнику;  $S_m$  — комплексная амплитуда  $m$ -го сигнала.

Выходные сигналы, составляющие вектор  $Y$ , — это результат взвешенного суммирования в диаграммо-образующей схеме (ДОС) сигналов на входах объектов с весовыми коэффициентами  $w_{nl}$ , составляющими матрицу векторов весовых коэффициентов (ВВК)  $W$ :

$$Y = WX. \quad (2)$$

Весовые коэффициенты  $w_{nl}$  выбираются таким образом, чтобы получить на выходе АС требуемый вектор  $Y$ . Процедуры определения требуемых весовых коэффициентов могут быть различными. В методе адаптации путем сравнения с эталоном минимизируется ошибка:

$$E(W) = |Y - Y_s|^2, \quad (3)$$

где  $Y_s$  — вектор задаваемых эталонных сигналов.

Если матрица ВВК находится классическим градиентным методом наименьших квадратов (Least Mean Square, LMS) [4], то подстройка ВВК проводится по следующим формулам:

$$\Delta W = 2\mu \cdot [Y_s - Y] \cdot X^*, \quad (4)$$

где  $0 < \mu < \frac{1}{\lambda_{max}}$ ;  $\lambda_{max}$  — максимум собственного значения ковариационной матрицы помех или в виде приращений действительной и мнимой частей:

$$\Delta \text{Re } w_n = 2\mu \cdot \sum_{i=1}^{N_r} ((\text{Re } y_{si} - \text{Re } y_i) \times \times \text{Re } x_{ni} - (\text{Im } y_{si} - \text{Im } y_i) \cdot \text{Im } x_{ni}) \quad (5)$$

$$\Delta \text{Im } w_n = 2\mu \cdot \sum_{i=1}^{N_r} ((\text{Im } y_{si} - \text{Im } y_i) \times \times \text{Re } x_{ni} - (\text{Re } y_{si} - \text{Re } y_i) \cdot \text{Im } x_{ni}).$$

В связи с тем что объекты, составляющие систему, могут перемещаться, фаза принимаемого эталонного сигнала во время формирования обучающей выборки может быть искажена, поэтому для моделирования адаптации целесообразно применить модификацию классического метода, позволяющую проводить адаптацию в условиях искажения фазы отсчетов выборки эталонного сигнала:

$$\Delta \text{Re } w_n = -k \cdot \sum_{i=1}^{N_r} \left(1 - \frac{|y_{si}|}{|y_i|}\right) \cdot (\text{Re } x_{ni} \cdot \text{Re } y_i + \text{Im } x_{ni} \cdot \text{Im } y_i), \quad (6)$$

$$\Delta \text{Im } w_n = -k \cdot \sum_{i=1}^{N_r} \left(1 - \frac{|y_{si}|}{|y_i|}\right) \cdot (\text{Re } x_{ni} \cdot \text{Im } y_i - \text{Im } x_{ni} \cdot \text{Re } y_i),$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, определяющий скорость сходимости алгоритма, соответствующий коэффициенту  $2\mu$  в (4), (5).

При практической реализации адаптивной системы синхронизированных по фазе приемоизлучающих объектов ДОС и вычислитель ВВК необходимо реализовать на объектах, составляющих систему. Необходимо также установить связь между объектами системы и синхронизацию их задающих генераторов. С учетом этого, структурная схема системы синхронизированных по фазе приемоизлучающих объектов может быть представлена в виде (рисунок 2). На рисунке 2 приняты следующие условные обозначения:

- АД — амплитудный детектор;
- АТ — управляемый аттенюатор;
- ГС — генератор сигнала синхронизации  $f_c$ ;
- СГ — генератор, синхронизированный сигналом  $f_c$ ;
- МШУ — маломушящий усилитель;
- ФД — фазовый детектор;

ФВ — управляемый фазовращатель;  
 $f_c$  — сигнал синхронизации;  
 $v_n(t)$  — сигнал промежуточной частоты объекта;  
 $g_n(t)$  — суммарный сигнал промежуточной частоты в базовой точке;  
 $u_n(t)$  — эталонный сигнал, принимаемый  $n$ -м объектом;  
 $w_1 \dots w_N$  — весовые коэффициенты;  
 $S_s(t)$  — источник эталонного сигнала;  
 $h'_n(t)$  — коэффициент передачи сигнала промежуточной частоты от  $n$ -го объекта к базовой точке.

Система функционирует следующим образом. Удаленный источник, расположенный в направлении, в котором требуется сформировать главный максимум ДН, излучает эталонный сигнал с комплексной огибающей  $S_s(t)$ . Эталонный сигнал принимается объектом и после усиления в МШУ поступает на фазовый детектор ФД, амплитудный детектор АД и преобразователь частоты ПР. Измеренные относительно сигнала синхронизации  $f_c$  значения фазы и значения амплитуды принятого сигнала  $u_n(t)$  передаются через канал связи в вычислитель ВВК, расположенный в базовой точке. В преобразователе ПР с использованием генератора, синхронизируемого сигналом  $f_c$ , принятый объектом эталонный сигнал переносится на промежуточную частоту. Сигнал промежуточной частоты проходит через управляемые через канал связи вычислителем ВВК фазовращатель ФВ и аттенюатор АТ и излучается в пространство. В базовой точке принимается суммарный сигнал промежуточной частоты  $g_n(t)$  от всех объектов, параметры принятого сигнала  $g_n(t)$  измеряются с помощью амплитудного и фазового детекторов и передаются в вычислитель ВВК. В вычислитель ВВК вводится также информация о модуле эталонного сигнала  $|S_s(t)|$ . Вычислитель ВВК управляет фазовращателями и аттенюаторами объектов с использованием полученной от объектов информации об амплитудах и фазах принятых объектами сигналов, информации об амплитуде и фазе принятого в базовой точке суммарного сигнала промежуточной частоты от всех объектов и информации о модуле эталонного сиг-

нала, подстраивая значения сдвига фаз и ослабления по формулам (5).

Для системы синхронизированных по фазе приемоизлучающих объектов, представленной на рисунке 2, время измерения амплитуд и фаз сигналов, задержка в канале связи предполагаются малыми по сравнению с периодом сигнала  $S_s(t)$ . Это выполняется для случаев, когда сигнал  $S_s(t)$  акустический, а данные передаются по радиоканалу. Такой системой может быть, например, система объединенных в группу акустических датчиков, применяющихся для определения направления на акустический сигнал от наземной или воздушной техники.

Моделирование системы синхронизированных по фазе приемоизлучающих объектов, представленных на рисунке 2, проводилось пошагово.

1. Формировались выборки шумов, помех и эталонного сигнала с помощью программного генератора комплексных случайных чисел. Шумы и помехи моделировались в виде стационарных эргодических процессов с нормальным распределением вероятностей. Эталонный сигнал задавался при условии его узкополосности с рэлеевским распределением огибающей и равномерным распределением фазы [5]. Средние мощности шумов, эталонного сигнала и помех задавались в относительном выражении. Количество выборки  $Nr$  задавалось индивидуально для конкретного случая моделирования.

2. Вычислялись комплексные значения сигнала в точках расположения объектов  $u_n(t)$  по формулам (1) в предположении, что антенны изотропны, взаимное влияние антенн отсутствует. Шум приемника объекта добавлялся к вычисленным комплексным значениям поля.

3. Сдвигу фаз фазовращателей ФВ и ослаблению аттенюаторов АТ, соответствующим весовым коэффициентам, составляющим ВВК, присваивались случайные начальные значения.

4. Вычислялся сигнал промежуточной частоты объекта  $v_n(t)$ .

5. Вычислялся суммарный сигнал промежуточной частоты в базовой точке  $g_n(t)$ , при этом коэффициенты передачи сигнала про-

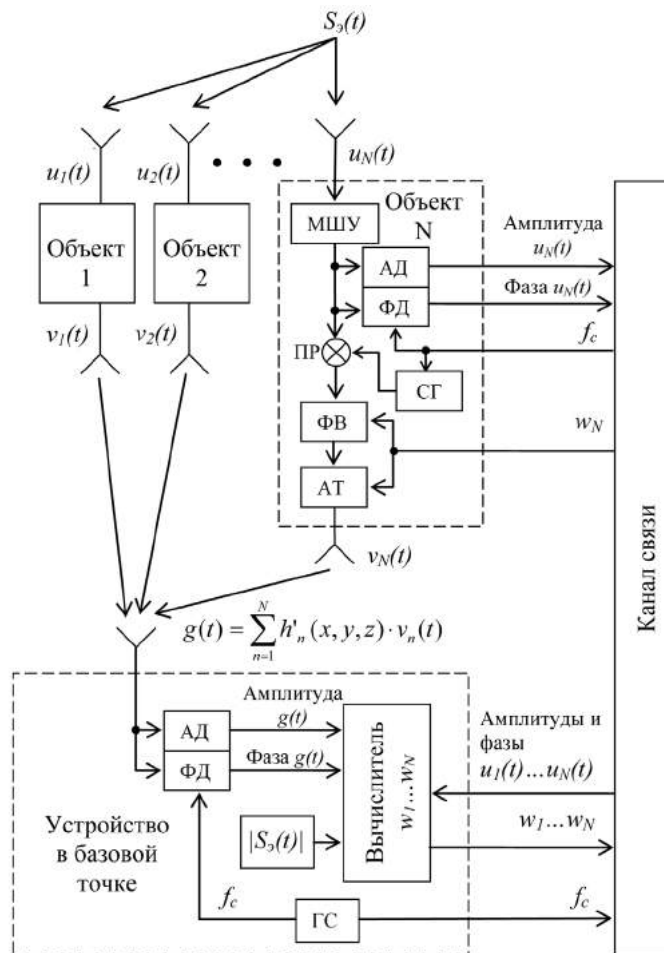


Рисунок 2. Система синхронизированных по фазе приемоизлучающих объектов

межуточной частоты от  $n$ -го объекта к базовой точке  $h'_n(t)$  предполагались одинаковыми для всех объектов.

6. По формулам (6) вычислялись приращения весовых коэффициентов и добавлялись к текущим значениям весовых коэффициентов  $w_1, \dots, w_N$ . Коэффициент  $k$  в (6) определялся эмпирически по критерию наибольшей скорости адаптации при сохранении устойчивости.

7. Вычислялись параметры полученной ДН системы и минимума ошибки (3).

8. Осуществлялся переход к п. 4, процедура повторялась до достижения установленного минимума ошибки (3).

Исследовалась система с линейным расположением объектов. Выбор такого расположения был обусловлен тем, что в случае линейного расположения объектов можно ограничиться исследованием двумерных ДН системы. Система координат для линейного расположения объектов изображена на рисунке 3.

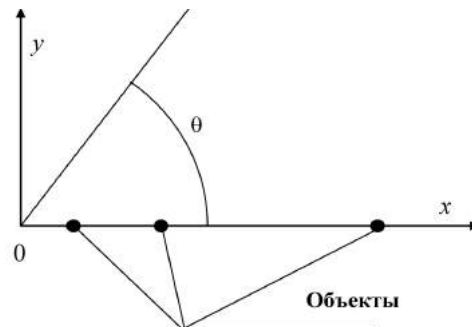


Рисунок 3. Система координат для линейного расположения объектов

Моделирующая программа была написана с использованием математических библиотек IMSL [6].

Моделирование проводилось на персональном компьютере под управлением операционной системы Windows 10.

*Результаты моделирования адаптации системы приемоизлучающих объектов*

Изучались ДН системы по мощности. Направление прихода полезного сигнала во



всех случаях задавалось, равным  $90^\circ$  от оси, на которой располагались объекты системы. Направления прихода помех также задавались от этой оси, в соответствии с системой координат, изображенной на рисунке 3.

Первоначально исследовалась адаптация системы из 5 объектов, расположенных в одну линию со случайным расстоянием между объектами.

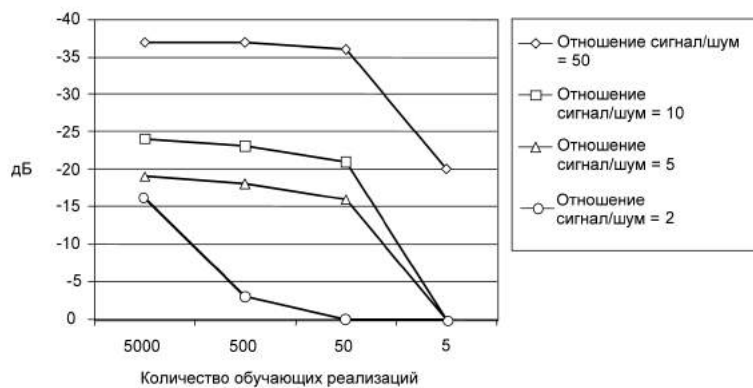
С целью определения необходимой величины обучающего множества в условиях воздействия внутренних шумов приемников объектов было проведено моделирование адаптации по алгоритму (6) при воздействии шумов и воздействии одной помехи с направления  $30^\circ$ . Коэффициент  $k$  в (6) для каждого случая моделирования задавался исходя из соотношения  $k=20/(N*Nr)$ .

Достижимый уровень подавления помех в системе при воздействии внутреннего шума приемников объектов, в зависимости от величины обучающего множества, показан на рисунке 4. Показаны наихудшие значения подавления помех из 10 случаев моделирования. Полученные значения весовых коэффициентов объектов для случая отсутствия собственных шумов приемников объектов приведены в таблице 1. На рисунке 5 показано влияние шумов на форму итоговой ДН системы для отношения сигнал/шум, равного 5 и 50.

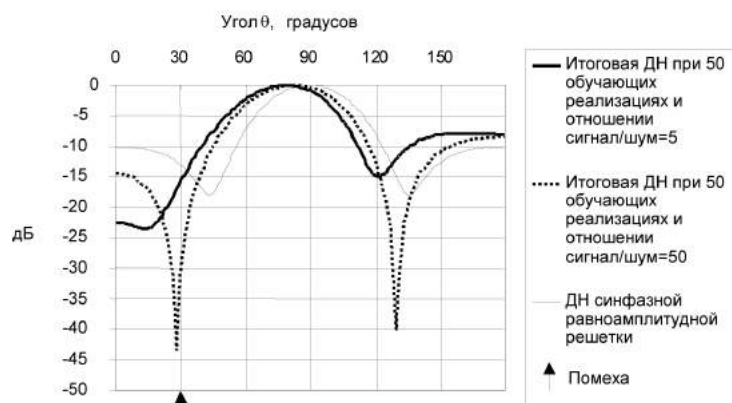
Видно, что рост глубины подавления помехи при росте числа обучающих реализаций более  $10*N$  для значений отношения сигнал/шум, равных и более 5, замедляется. При отношении сигнал/шум, равном 2, для достижения сопоставимых значений пода-

**Таблица 1.** Значения весовых коэффициентов объектов для случая отсутствия собственных шумов приемников объектов

Координаты объекта в долях длины волны	0,0	0,3	0,4	0,8	1,1
Весовой коэффициент	$0,69e^{i^3}$	$0,77e^{i^{24}}$	$0,87e^{i^{24}}$	$1,00e^{i^5}$	$0,73e^{i^0}$



**Рисунок 4.** Достижимый уровень подавления помех в системе при воздействии внутреннего шума приемников объектов в зависимости от величины обучающего множества



**Рисунок 5.** Влияние внутреннего шума приемников объектов на форму итоговой ДН системы

вления помехи требуется количество обучающих реализаций, большее на 2 порядка.

Было также проведено исследование изменения формы ДН системы в процессе подстройки весовых коэффициентов. Исследование проводилось для идеального случая, в условиях отсутствия внутренних шумов приемников объектов и без искажения фазы эталонного сигнала во время формирования обучающей выборки.

Исследовалась система из  $N=50$  объектов. Расстояние между объектами было выбрано одинаковым и составляло 0,5 длины волны. При моделировании задавалось 10 помех, подавление которых в системе из  $N=50$  объектов может быть осуществлено. Помехи задавались равномерно, случайно расположенными в секторе углов  $0^\circ-180^\circ$  от линии объектов. Направление прихода полезного сигнала задавалось  $90^\circ$  от оси, на которой располагались объекты системы. Количество обучающих реализаций  $Nr = 500$ , коэффициент  $k = 0,001$ .

Изменение ДН системы показано на рисунках 6–9.

На рисунке 6 изображена начальная ДН системы, соответствующая случайным весовым коэффициентам, которые задаются в программе в качестве исходных данных.

На рисунке 7 изображена ДН системы после 1 итерации. Видно, что уже после 1 итерации наметились максимумы ДН в направлении помех и эталонного сигнала.

На рисунке 8 изображена ДН системы после 10 итераций. После 10 итераций уровень максимума ДН системы в направлении эталонного сигнала превышает уровни максимумов в направлении помех на величину от 5 до 15 дБ.

На рисунке 9 изображена ДН системы после 100 итераций, близкая к итоговой. Максимумы ДН в направлении помех сменились минимумами, подавление помех составляет от 30 до 55 дБ.

Образование максимумов ДН в направлении помех и эталонного сигнала на начальных итерациях позволяет сделать предположение, что алгоритм (6) на начальном этапе реализует один из вариантов разделения источников излучения.

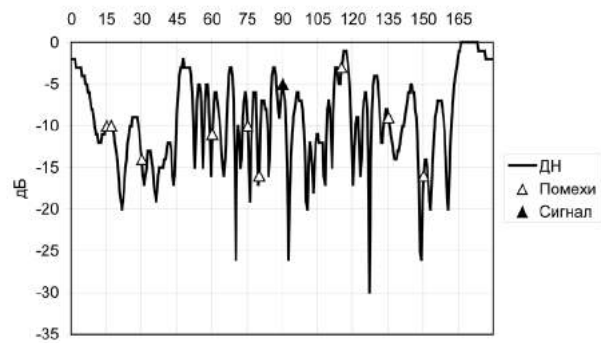


Рисунок 6. Начальная ДН

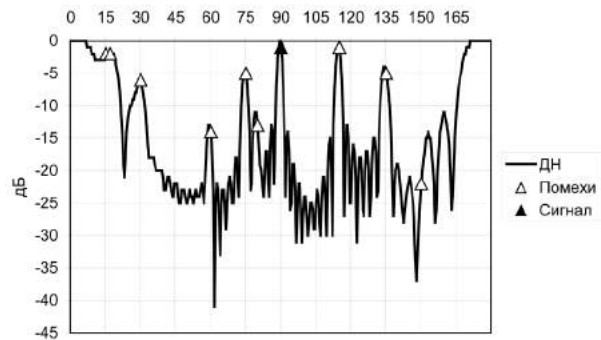


Рисунок 7. ДН после 1 итерации

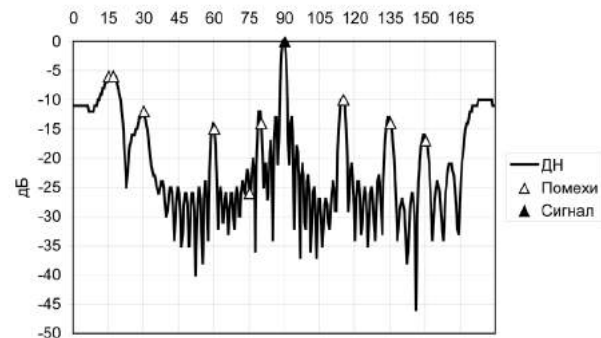


Рисунок 8. ДН после 10 итераций

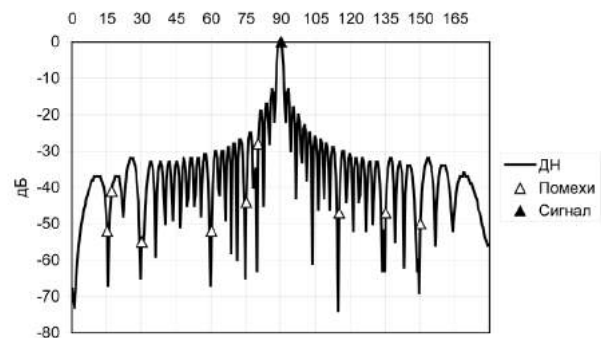


Рисунок 9. ДН после 100 итераций

### Заключение

Численное моделирование подтвердило адекватность предложенной модели для исследования процесса адаптации. Получаемые в результате моделирования ДН соответствуют задаваемой сигнально-помеховой ситуации. Определенная по результатам моделирования системы из 5 объектов

величина минимально необходимого множества обучающих реализаций, для значений отношения сигнал/шум равных и более 5, равна десятикратному количеству объектов. При меньших значениях отношения сигнал/шум требуемая величина обучающего множества быстро растет. Исследование системы из 50 объектов подтвердило достаточность

величины обучающего множества, равной десятикратному количеству объектов. Изменение формы ДН во время адаптации системы из 50 объектов позволяет сделать предположение, что на начальном этапе адаптации реализуется разделение источников излучения.

### Список литературы

1. Dargie W. Poellabauer C. Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice. NY: John Wiley and Sons, 2010.
2. Адаптивные антенные решетки. учеб. пособие: в 2 ч. [Текст] / В.А. Григорьев, С.С. Щесняк, В.Л. Гулюшин, Ю.А. Распаев, О.И. Лагутенко, А.С. Щесняк; под общ. ред. В.А. Григорьева. СПб: Университет ИТМО, 2016. 179 с.
3. Widrow B., Mantey P.E., Griffiths L.J., Goode B.B. Adaptive Antenna Systems // Proceedings of the IEEE. 1967. Vol. 55. № 12. pp. 2143-2159.
4. Widrow B. Thinking about Thinking: the Discovery of the LMS Algorithm — DSP History // IEEE Signal Processing Magazine. 2005. Vol. 22. № 1. P. 100-106.
5. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
6. Официальный сайт компании Rogue Wave [Электронный ресурс]. <http://www.roguewave.com/products-services/imsl-numerical-libraries>.

### References

1. Dargie W. Poellabauer C. Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice. NY: John Wiley and Sons, 2010.
2. Adaptivnye antennye reshetki: ucheb. posobie: v 2 ch. / V.A. Grigor'ev, S.S. Shhesnjak, V.L. Guljushin, Ju.A. Raspaev, O.I. Lagutenko, A.S. Shhesnjak; pod obshh. red. V.A. Grigor'eva. SPb: Universitet ITMO, 2016. 179 s.
3. Widrow B., Mantey P.E., Griffiths L.J., Goode B.B. Adaptive Antenna Systems // Proceedings of the IEEE. 1967. Vol. 55. № 12. pp. 2143-2159.
4. Widrow B. Thinking about Thinking: the Discovery of the LMS Algorithm — DSP History // IEEE Signal Processing Magazine. 2005. Vol. 22. № 1. P. 100-106.
5. Gonorovskij I.S. Radiotekhnicheskie cepi i signaly. M.: Radio i svjaz', 1986. 512 s.
6. Oficial'nyj sajt kompanii Rogue Wave [Elektronnyj resurs]. <http://www.roguewave.com/products-services/imsl-numerical-libraries>.



**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



**Закирова З. А.**  
**Zakirova Z. A.**

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



**Ахметшарипова К. Р.**  
**Ahmetsharipova K. R.**

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



**Яматова Р. А.**  
**Yamatova R. A.**

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



**Мухаметшин А. К.**  
**Muhametshin A. K.**

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



**Макаров К. В.**  
**Makarov K. V.**

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

УДК 614.8:665.6

## АНАЛИЗ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Недостаточный уровень безопасности опасных производственных объектов нефтегазового комплекса, представляющих собой совокупность сложных технологических процессов, способствует возникновению и развитию аварийных ситуаций. Анализ проблем и разработка эффективных методов оценки уровня безопасности опасных объектов является актуальной проблемой для специалистов, отвечающих за промышленную безопасность производства. Контроль деятельности и устранение нарушений должны осуществляться в



рамках систем управления промышленной безопасностью. В общем виде система обеспечения управления промышленной безопасностью опасных производственных объектов состоит из двух стадий: анализа риска аварий, реагирования на чрезвычайные ситуации. Необходимо отметить, что уровень безопасности будет значительно выше, если в рамках системы управления промышленной безопасностью будет также производиться количественная оценка риска, возникающего при осуществлении технологического процесса.

В связи с вышеизложенным в настоящей работе рассмотрены наиболее функциональные современные решения, обеспечивающие безопасность производственных объектов, к примеру, способ и система анализа и оценки безопасности технологического процесса сравниваются с системой мониторинга технического состояния и поддержки принятия управляющих решений по повышению безопасности и надежности комплексов гидротехнических сооружений гидроэлектростанций и иных объектов, также проводится анализ системы оценки безопасности и эффективности проектных решений по обеспечению безопасности опасного производственного объекта, способа проектирования системы комплексной безопасности объекта, системы, предназначенной для оценки и управления рисками безопасности, информационно-управляющей системы комплексного контроля безопасности опасных производственных объектов и системы прогнозирования и оценки безопасности опасного производственного объекта с использованием комплексной модели обеспечения безопасности.

**Ключевые слова:** промышленная безопасность, оценка риска, анализ риска, управление безопасностью, опасный производственный объект, нефтегазовая отрасль.

## ANALYSIS SYSTEMS OF INDUSTRIAL SAFETY OF DANGEROUS OBJECTS IN OIL AND GAS INDUSTRY

Inadequate safety of hazardous production facilities of oil and gas complex, representing an aggregate of complex technological processes, contributes to the emergence and development of emergencies. Analysis of problems and development of effective methods of hazardous objects safety assessment is an urgent problem for professionals responsible for industrial safety. Control activities and elimination of violations must be carried out within the framework of safety management systems. In general, the system of industrial safety management of dangerous objects consists of two stages: analysis of risk of accidents, emergency response. It should be noted that the level of security will be significantly higher if under the safety management system will also be carried out quantitative risk assessment arising in the implementation process.

In this connection, in this paper we consider the most functional modern solutions to ensure the safety of production facilities, for example, the method and system for analyzing and evaluating process safety compared with the system of monitoring the technical condition and support the adoption of management decisions to improve the safety and reliability of complex hydraulic structures of hydropower plants and other objects. Also, the analysis of safety and efficacy evaluation system design decisions to ensure the safety of hazardous production facilities, the method of integrated security system design object, the system is designed for the assessment and security risk management, information management integrated safety control system of dangerous objects and safety prediction and evaluation of hazardous production object using the integrated security model.

**Key words:** industrial safety, risk assessment, risk analysis, security management, dangerous production facilities, oil and gas industry.

Каждый опасный производственный объект (ОПО), задействованный в производствах нефтегазового комплекса, является сложной технической системой, которая в случае реализации аварийной ситуации может угрожать как здоровью обслуживаю-

щего персонала, так и жизни людей, которые находятся в границах деятельности этих организаций [1]. Таким образом, анализ проблем и разработка новых методов оценки промышленной безопасности опасных объектов в РФ являются актуальными научно-

практическими задачами, грамотное решение которых даст возможность повысить общий уровень безопасности технологических процессов и производств, а также снизить уровень риска возникновения нештатных ситуаций при их эксплуатации [2].

В общем виде система обеспечения безопасности ОПО должна содержать в себе две стадии:

- анализ риска аварий;
- реагирование на чрезвычайные ситуации [3].

Анализ риска аварии осуществляется в виде определенного научного обоснования, основанного на результатах качественного и количественного анализа потенциальной вероятности возникновения аварийной ситуации, последствий от ее реализации и выявления наиболее уязвимых мест в технической системе или комплексе [4]. Выбор методов анализа опасностей и риска определяется в зависимости от целей, задач анализа и возможностей исследователей [5]. Методы анализа риска могут иметь:

- количественный характер, который основывается на результатах, полученных путем расчета показателей опасностей и риска;

- качественный характер, который рассматривает результаты, представленные в виде текста, таблиц, диаграмм, экспертных оценок [6].

Необходимо отметить, что на опасных объектах нефтегазового комплекса аварии и несчастные случаи происходят реже, чем в других сферах промышленности [7]. Это можно объяснить тем, что, во-первых, на рассматриваемых объектах эксплуатируется, чаще всего, высокотехнологичное оборудование, отличающееся меньшей степенью опасности, а, во-вторых, осуществляется более строгий контроль над безопасным состоянием рабочих мест и производством работ. Но в случае возникновения аварий наблюдаются более тяжелые последствия, приводящие к значительным социально-экономическим потерям. Контроль над деятельностью производства, устранение имеющихся нарушений должны осуществляться нефтегазовыми предприятиями в рамках системы

управления промышленной безопасностью [8, 9]. Однако наряду с достаточно высокой эффективностью данных систем имеется и серьезный недостаток, который заключается в отсутствии объективного критерия мониторинга состояния промышленной безопасности — количественной оценки риска. Уровень безопасности будет значительно выше, если в рамках системы управления промышленной безопасностью будет также производиться количественная оценка риска, возникающего при осуществлении технологического процесса [10].

Рассмотрим современные системы оценки безопасности опасных производственных объектов, применимые для технологических процессов нефтегазовых производств.

Существуют способ и система анализа и оценки безопасности технологического процесса [11], включающие сбор и анализ исходной информации, определение критериев безопасности, моделирование и проведение качественного и количественного анализа безопасности, при этом в качестве критериев безопасности выбираются значения, превышающие допустимые уровни воздействия. Рассматриваемая система выявляет источники опасности, проводит анализ распределения зон действия выявленных источников по различным частям технологического процесса, строит детерминистские модели безопасности с учетом возможных сценариев нарушений. Данный способ дает возможность проведения анализа нарушений технологического процесса и разработки списка нарушений, приводящих к превышению допустимых уровней, однако не дает возможности оценить потенциальную опасность технологической системы на стадии проектирования, выявить ненадежные элементы разрабатываемой технологии, а, значит, не позволяет внедрить превентивные решения по повышению показателей надежности и безотказной работы системы.

Существует похожая автоматизированная система мониторинга технического состояния и поддержки принятия управляющих решений по повышению безопасности и надежности комплексов гидротехнических сооружений гидроэлектростанций и иных

объектов. Она состоит из блока мониторинга и диагностики технического состояния объекта, блока оценки состояния и уровня безопасности, блока планирования воздействий на рассматриваемый объект, блока управления знаниями в области безопасности и надежности, а также связи данных блоков с участниками системы, которые привлекаются для осуществления указанных процессов.

Недостаток данной системы заключается в том, что оценка уровня безопасности и надежности производится группой специалистов, что требует привлечения большого количества экспертов, обладающих высоким уровнем квалификации, в то время как в первом способе процесс такой оценки происходит в автоматическом режиме. Важным отличительным признаком предлагаемой системы является то, что в неё дополнительно включен блок моделирования. Данный блок дает возможность прогнозирования и оценки показателей безопасности, в результате чего выбирается наиболее безопасный вариант проектных решений и утверждается комплексная модель обеспечения безопасности.

Технический результат, который достигается применением указанного способа оценки состояния безопасности объекта, заключается в установлении наиболее уязвимых мест в системе безопасности, выработке рекоменда-

ций по проведению мероприятий, направленных на снижение вероятности возникновения аварий и масштабов их последствий.

Рассмотрим систему оценки безопасности и эффективности проектных решений по обеспечению безопасности опасного производственного объекта, структурная схема которой изображена на рисунке 1. Данная система способна предлагать решения, повышающие безопасность и надежность технологического процесса, на этапе принятия проектных решений [12].

Система включает в себя рабочие станции, сервер сбора, обработки и хранения данных, построения моделей, сервер оценки эффективности и принятия проектных решений, устройства сбора, обработки и ввода данных для моделирования, локальную вычислительную сеть, устройства вывода и отображения информации, коммутатор связи серверов, подсистему сбора и обработки данных, банк данных, подсистему моделирования, расчетную подсистему, подсистему анализа и принятия решений.

Существует аналогичный способ проектирования системы комплексной безопасности объекта, основанный на использовании компьютерных программ для построения модели опасного объекта, выборе датчиков с учетом возможных угроз, которые размещаются на

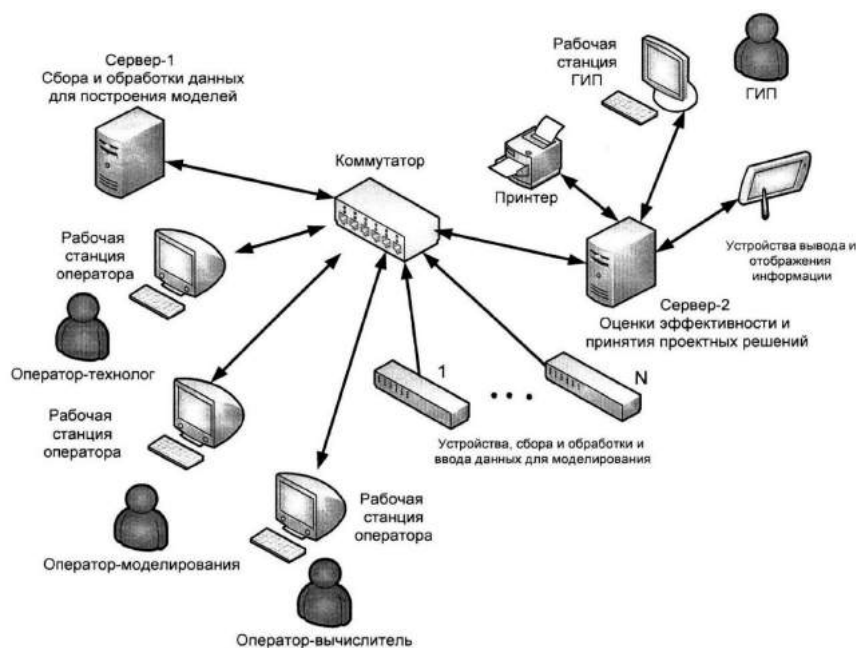


Рисунок 1. Структура системы оценки безопасности и эффективности проектных решений по обеспечению безопасности опасных производственных объектов

модели в пространстве объекта, обеспечивая охват этого пространства зонами обслуживания датчиков, проведении экспертной оценки проектируемого процесса, формировании модели системы комплексной безопасности, тестировании работы полученной модели, проведении обработки результатов тестирования с определением оценки работы системы, которая сравнивается с заданными значениями.

Основной недостаток рассматриваемой системы заключается в том, что данный способ направлен на выработку проектных решений, нацеленных на защиту объекта только от одного типа угроз. В то время как рассматриваемое решение дает возможность оценки не только безопасности, но и эффективности функционирования проектируемого объекта, определения способов достижения заданных величин эффективности и безопасности, а также оценки целесообразности принятых проектных решений. Вышеуказанные задачи решаются за счет того, что в систему оценки безопасности и эффективности проектных решений по обеспечению безопасности опасного производственного объекта включены подсистемы сбора и обработки данных.

Рассмотрим еще одну систему, предназначенную для оценки и управления рисками безопасности. Данная система содержит в себе последовательно соединенные средства загрузки приложения, среду загрузки и выполнения приложения, уполномоченного администратора, механизмы оценки, экспертный блок хранения данных, механизмы оптимизации риска, управления, противодействия [13].

Аналогичным рассматриваемому устройству по технической конструкции является система, состоящая из средства загрузки приложения, среды загрузки и осуществления приложения, уполномоченного администратора, интерфейса пользователя, механизма оценок. Данное техническое решение менее эффективно по осуществлению противодействия рискам безопасности, оно обладает относительно узкими функциональными возможностями, обусловленными тем, что система выполняет только оценку рисков без-

опасности и выдачу информации о рисках через загрузку приложения для специалиста, принимающего решение, но не позволяет управлять данными рисками.

Рассматриваемая система повышает эффективность противодействия рискам безопасности и обладает более широкими функциональными возможностями. Данного результата добиваются тем, что в устройство дополнительно вводятся последовательно соединенные экспертный блок хранения данных, механизм оптимизации риска, управленческий механизм, механизм противодействия.

Таким образом, благодаря усовершенствованию ранее используемого механизма достигается требуемый технический результат, заключающийся в повышении эффективности противодействия рискам безопасности, а также расширении функциональных возможностей, поскольку при сохранении возможности оценки рисков безопасности и выдачи пользователю информации о такой оценке для принятия им решения обеспечивается возможность управления рисками безопасности для гарантированного противодействия данным рискам без участия пользователя, что позволяет повысить надежность функционирования компьютера пользователя.

Рассмотрим информационно-управляющую систему комплексного контроля безопасности ОПО. Данное решение обеспечивает безопасность ОПО путем расширения арсенала систем контроля безопасности объектов, повышения надежности и увеличения функциональных возможностей системы мониторинга для предупреждения возможного возникновения аварий при использовании формируемой программным путем, комплексной оценки безопасности опасного производственного объекта (КОБО) (рисунок 2) [14].

Данная система обеспечивает предупреждение возникновения возможных аварий, в частности, опасных для человека и окружающей среды технологических отклонений, сопровождающихся выбросом опасных веществ, контроль безопасности обстановки на объекте, а также оценку технического состояния оборудования на ОПО.



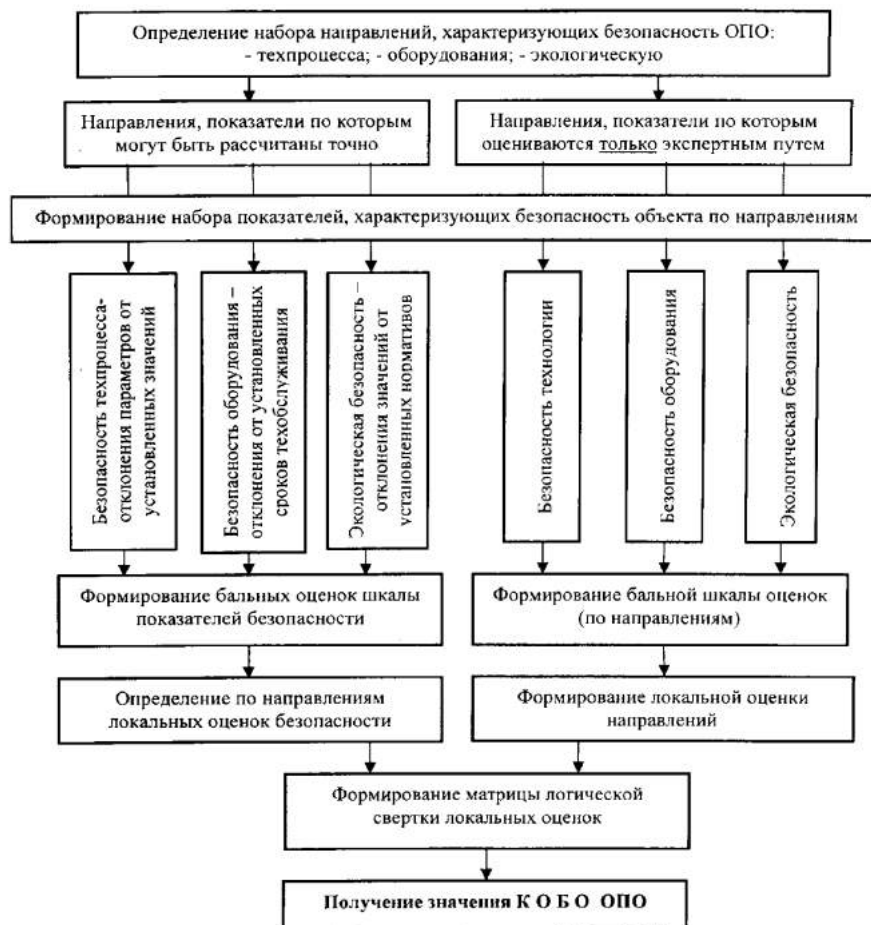


Рисунок 2. Алгоритм формирования комплексной оценки безопасности ОПО локальной информационно-управляющей системой

Технический результат от использования настоящего решения заключается в повышении надежности и расширении функциональных возможностей интегрированной системы мониторинга для предупреждения возможного возникновения нештатной (аварийной) ситуации при принятии превентивных мер на основе оценки отклонений технологических, экологических параметров от установленных значений и сроков соблюдения регламентов обслуживания оборудования.

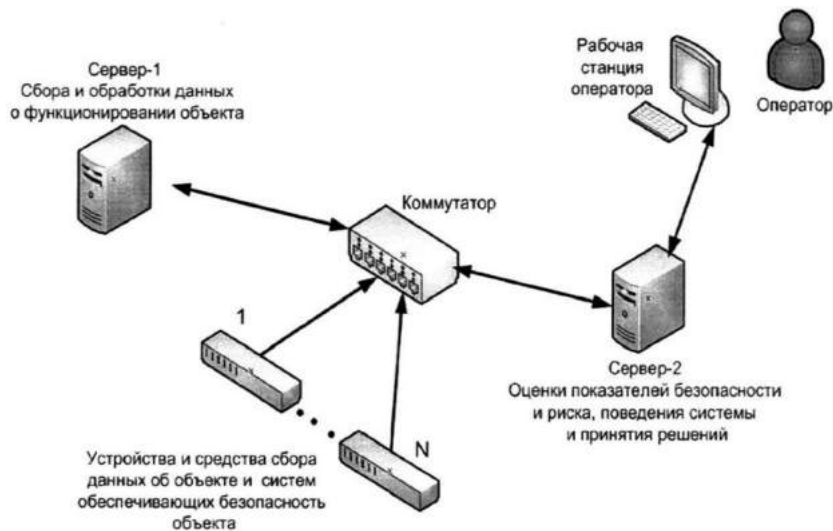
Система прогнозирования и оценки безопасности опасного производственного объекта с использованием комплексной модели обеспечения безопасности [14], схема работы которой изображена на рисунке 3, также является одним из современных решений для обеспечения промышленной безопасности нефтегазовых производств.

Данное решение может быть использовано на всех этапах жизненного цикла опасного объекта, а именно, при проектировании, строительстве, эксплуатации и ликвидации

ОПО, что дает значительное преимущество перед ранее рассматриваемыми решениями.

В процессе прогнозирования и оценки показателей безопасности выбирается наиболее безопасный вариант проектных решений и утверждается комплексная модель обеспечения безопасности, которая будет сопровождать объект на последующих этапах жизненного цикла.

Существует аналог данного устройства, включающий в себя сбор и анализ исходной информации, определение критериев безопасности, моделирование и проведение качественного и количественного анализа безопасности. Данный способ позволяет провести анализ и разработать список нарушений технологического процесса, приводящих к превышению допустимых воздействий, однако не дает возможности оценить потенциальную опасность технологической системы на этапе проектирования, выявить ненадежные элементы разрабатываемой системы, а следовательно, не позволяет принять эффектив-



**Рисунок 3.** Схема осуществления системы прогнозирования и оценки безопасности ОПО с использованием комплексной модели обеспечения безопасности

ные решения по повышению показателей надежности и безотказной работы объекта.

Отличительные признаки рассматриваемой системы от аналогичного устройства заключаются в том, что в состав дополнительно включен блок моделирования, который за счет создания на этапе проектирования компьютерных моделей производит оценку влияния проектных решений на безопасность объекта. В результате прогнозирования и оценки показателей безопасности выбирается наиболее безопасный вариант проектных решений, и утверждается комплексная модель обеспечения безопасности, которая будет сопровождать объект на последующих этапах жизненного цикла. На этапе строительства и ввода в эксплуатацию объекта путем задания возможных режимов

пуска и ввода в эксплуатацию объекта, параметров технологических процессов комплексная модель позволяет оценить возможные аварийные ситуации и их последствия, а также выдать необходимые рекомендации по их предотвращению, информацию для разработки планов локализации и ликвидации аварий [15].

### Вывод

Таким образом, проведение комплексного анализа существующих рисков при обеспечении безопасности ОПО нефтегазовой отрасли позволит повысить качество проведения мониторинга опасности промышленных объектов и повысить уровень промышленной безопасности за счет снижения риска возникновения аварийных ситуаций.

### Список литературы

1. Еникеева Т.М., Гайнуллина Л.А. Оценка профессионального риска // Нефть и газ — 2015: сб. тез. 69-й междунар. молодежн. науч. конф. 2015. С. 135.
2. Закирова З.А., Шаяхметова А.И. Повышение уровня безопасности на опасных производственных объектах, эксплуатируемых оборудованием, работающем под избыточным давлением // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2016. № 2. С. 240–253.
3. Закирова З.А., Мухаметдинов В.Ж. Целереализующий подход в управлении про-

мышленной безопасностью: основная методология или дополнительное средство? // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. 2016. Т. 7. № 1. С. 158–162.

4. Киреев И.Р., Закирова З.А., Латыпова Э.А. Методы устранения опасности возникновения взрывов и пожаров на ООО РН-Юганскнефтегаз // Безопасность жизнедеятельности. 2015. № 10 (178). С. 37–39.

5. Кускильдин Р.А., Закирова З.А., Гизатуллин А.Р., Камалов И.А. Совершенствование образовательных технологий подготовки производственного персонала //

Безопасность труда в промышленности. 2015. № 6. С. 72-74.

6. Абдрахманов Н.Х., Закирова З.А., Киреев И.Р., Жолобова Г.Н. Современные разработки, позволяющие повысить безопасность на взрывопожароопасных объектах // Промышленная безопасность на взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектах: сб. матер. VIII науч.-практ. конф. 2014. С. 32-34.

7. Абдрахимов Ю.Р., Закирова З.А., Бакиров И.К., Сахипгареева А.Р. Повышение безопасности эксплуатации печи пиролиза // Нефтегазовое дело. 2014. № 12-1. С. 159-163.

8. Федосов А.В., Прокина Д.Н., Штур В.Б. Применение информационных систем для оценки риска опасных производственных объектов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 2. С. 73-78.

9. Федосов А.В., Абдрахимов Ю.Р., Вадулина Н.В. Управление рисками и техническое регулирование. Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2013. 176 с.

10. Сухорученко К.О., Горькова Н.Н., Шатохин А.С. Оптимизация системы управления промышленной безопасности на опасном производственном объекте // Новая наука: современное состояние и пути развития. 2015. № 3. С. 76-80.

11. Пат. 2536657 Российская Федерация, МПК G 06 F 17/00, G 06 F 15/16, G 06 Q 10/00. Система оценки безопасности и эффективности проектных решений по обеспечению безопасности опасного производственного объекта / П.В. Ганченко, А.Д. Ермоленко, Д.В. Ибадулаев, Д.А. Калабин, В.П. Космачев, М.А. Лебедской-Тамбиев, В.Ф. Лузанов, С.Б. Обломский, И.В. Степанов (РФ). 2013135898/08; заяв. 30.07.2013; опубл. 27.12.2014. Бюл. № 36.

12. Пат. 2500070 Российская Федерация, МПК H 04 L 1/0. Система оценки и управления рисками безопасности / Р.А. Хворов, С.А. Никулин, К.А. Малыков, Д.В. Бут (РФ). 2012110645/08; заяв. 20.03.2012; опубл. 27.11.2013. Бюл. № 33.

13. Пат. 2536351 Российская Федерация, МПК 06 F 17/00, G 08 B 23/00, G 01 W 1/00. Информационно-управляющая система комплексного контроля безопасности опасного производственного объекта / В.А. Алексеев,

В.Н. Бурков, С.А. Вахрушев, И.В. Парганский, А.В. Толстых, О.К. Уткин, П.М. Фомин, А.В. Щепкин (РФ). 2013130085/08; заяв. 02.07.2013; опубл. 20.12.2013. Бюл. № 35.

14. Пат. 2549514 Российская Федерация, МПК G 06 F 17/00, G 06 F 15/16, G 06 Q 10/06. Система прогнозирования и оценки безопасности опасного производственного объекта с использованием комплексной модели обеспечения безопасности / П.В. Ганченко, Д.В. Ибадулаев, В.П. Космичев, В.Ф. Лузанов, С.Б. Обломский, И.В. Степанов (РФ). 2013135966/08; заяв. 30.07.2013; опубл. 27.04.2015.

15. 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. № 1. Т. 12. С. 117-124.

## References

1. Enikeeva T.M., Gajnullina L.A. Ocenka professional'nogo riska // Neft' i gaz — 2015: Sb. Tez. 69-j mezhdunar. Molodezhn. Nauch. konf. 2015. S. 135.

2. Zakirova Z.A., Shajahmetova A.I. Povysenie urovnja bezopasnosti na opasnyh proizvodstvennyh ob#ektah, jekspluatirujushhih oborudovanie, rabotajushhee pod izbytochnym davleniem // Jelektronnyj nauchnyj zhurnal «Neftegazovoe delo». 2016. № 2. S. 240-253.

3. Zakirova Z.A., Muhametdinov V.Zh. Celerealizujushhij podhod v upravlenii promyshlennoj bezopasnost'ju: osnovnaja metodologija ili dopolnitel'noe sredstvo? // Jekspertiza promyshlennoj bezopasnosti i diagnostika opasnyh proizvodstvennyh ob#ektov. 2016. Т. 7. № 1. S. 158-162.

4. Kireev I.R., Zakirova Z.A., Latypova Je.A. Metody ustraneniya opasnosti vozniknoveniya vzryvov i pozharov na OOO «RN-Juganskneftgaz» // Bezopasnost' zhiznedateljnosti. 2015. № 10 (178). S. 37-39.

5. Kuskil'din R.A., Zakirova Z.A., Gizatullin A.R., Kamalov I.A. Sovershenstvovanie obrazovatel'nyh tehnologij podgotovki proizvodstvennogo personala //

- Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2015. № 6. S. 72–74.
6. Abdrahmanov N.H., Zakirova Z.A., Kireev I.R., Zholobova G.N. Sovremennye razrabotki, pozvoljajushhie povysit' bezopasnost' na vzryvopozharoopasnyh ob#ektah // Promyshlennaja bezopasnost' na vzryvopozharoopasnyh i himicheski opasnyh proizvodstvennyh ob#ektah: sb. mater. VIII nauch.-prakt. konf. 2014. S. 32–34.
7. Abdrahimov Ju.R., Zakirova Z.A., Bakirov I.K., Sahipgareeva A.R. Povysenie bezopasnosti jekspluatacii pechi piroliza // Neftegazovoe delo. 2014. № 12-1. S. 159–163.
8. Fedosov A.V., Prokina D.N., Shtur V.B. Primenenie informacionnyh sistem dlja ocenki riska opasnyh proizvodstvennyh ob#ektov // Jeletrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2014. T. 10. № 2. S. 73–78.
9. Fedosov A.V., Abdrahimov Ju.R., Vadulina N.V. Upravlenie riskami i tehničeskoe regulirovanie. Ufa: Izd-vo «Neftegazovoe delo», 2013. 176 s.
10. Suhoruchenko K.O., Gor'kova N.N., Shatohin A.S. Optimizacija sistemy upravlenija promyshlennoj bezopasnosti na opasnom proizvodstvennom ob#ekte // Novaja nauka: sovremennoe sostojanie i puti razvitija. 2015. № 3. S. 76–80.
11. Pat. 2536657 Rossijskaja Federacija, MPK G 06 F 17/00, G 06 F 15/16, G 06 Q 10/00. Sistema ocenki bezopasnosti i jeffektivnosti proektnyh reshenij po obespečeniju bezopasnosti opasnogo proizvodstvennogo ob#ekta / P.V. Gančenko, A.D. Ermolenko, D.V. Ibadulaev, D.A. Kalabin, V.P. Kosmachev, M.A. Lebedskoj-Tambiev, V.F. Luzanov, S.B. Oblomskij, I.V. Stepanov (RF). 2013135898/08; zajav. 30.07.2013; opubl. 27.12.2014. Bjul. № 36.
12. Pat. 2500070 Rossijskaja Federacija, MPK H 04 L 1/0. Sistema ocenki i upravlenija riskami bezopasnosti / R.A. Hvorov, S.A. Nikulin, K.A. Malykov, D.V. But (RF). 2012110645/08; zajav. 20.03.2012; opubl. 27.11.2013. Bjul. № 33.
13. Pat. 2536351 Rossijskaja Federacija, MPK 06 F 17/00, G 08 B 23/00, G 01 W 1/00. Informacionno-upravljajushhaja sistema kompleksnogo kontrolja bezopasnosti opasnogo proizvodstvennogo ob#ekta / V.A. Alekseev, V.N. Burkov, S.A. Vahrushev, I.V. Partanskij, A.V. Tolstyh, O.K. Utkin, P.M. Fomin, A.V. Shhepkin (RU). 2013130085/08; zajav. 02.07.2013; opubl. 20.12.2013. Bjul. № 35.
14. Pat. 2549514 Rossijskaja Federacija, MPK G 06 F 17/00, G 06 F 15/16, G 06 Q 10/06. Sistema prognozirovanija i ocenki bezopasnosti opasnogo proizvodstvennogo ob#ekta s ispol'zovaniem kompleksnoj modeli obespečenija bezopasnosti / P.V. Gančenko, D.V. Ibadulaev, V.P. Kosmichev, V.F. Luzanov, S.B. Oblomskij, I.V. Stepanov (RF). 2013135966/08; zajav. 30.07.2013; opubl. 27.04.2015.
15. Fedosov A.V., Fedosov V.A., Shajmuhametov Je.F. Sovremennye sredstva izmerenija, primenjaemye pri provedenii jekspertizy promyshlennoj bezopasnosti tehničeskikh ustrojstv na opasnyh proizvodstvennyh ob#ektah // Jeletrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2016. № 1. T. 12. S. 117–124.





**Хасаншин В. Р.**  
**Khasanshin V. R.**

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



**Виноградова И. Л.**  
**Vinogradova I. L.**

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

УДК 621.391

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЯМИ СВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧИРПИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ**

В статье рассматриваются возможности создания адаптивных оптических устройств, преобразующих оптические сигналы за счет управления электромагнитным полем путем подачи дополнительного оптического излучения. Предполагается, что управляющее излучение изменяет показатель преломления оптической среды устройства, воздействуя тем самым на спектральный состав излучения и длительность импульсов. Линейная частотная модуляция оптических импульсов (чирп) приводит к уширению длительности импульса и увеличению ширины спектра. Соответственно, меняя коэффициент чирпирования, можно управлять структурой первичного информационного потока.

Для выполнения преобразований используется многолучевой интерферометр. Показано, что при использовании различных значений коэффициента отражения зеркал в интерферометре Фабри-Перо наблюдается различная зависимость набега фаз проходящей волны от ее интенсивности, а, следовательно, меняется коэффициент чирпа. Произведена оценка габаритов чирпирующего устройства на основе интерферометра Фабри-Перо.

Предложен принцип использования чирпирующих устройств на разветвленной сети для «мультиплексирования» в структуру первичного информационного потока дополнительной управляющей информации. Приведена структурная схема устройства передающей части адаптивной волоконно-оптической системы связи на основе оптических трансфазоров для управления лазером накачки. Данный подход предполагается использовать в программно-конфигурируемых сетях (SDN) для повышения живучести сети за счет более рационального использования канального ресурса на инфраструктурном уровне. Поскольку идеология SDN предполагает централизованное управление, передача управляющей информации совместно с информационными потоками является нерациональной. Предложенная схема позволяет повысить производительность сети, а также обеспечить дополнительную защиту передаваемой служебной информации стегаграфическим методом, поскольку скрывается сам факт передачи вторичного потока.

Предложен алгоритм подстройки параметров передачи в сети для выполнения задачи маршрутизации за счет сканирования состояния каналов и их автоматического переключения на альтернативные пути. Применение данного алгоритма позволяет повысить BER и скорость передачи информации, обеспечивая абонента приемлемыми показателями QoS.

**Ключевые слова:** программно-конфигурируемые сети (SDN), волоконно-оптический переключатель, рабочая точка интерферометра, управление разветвленной сетью, время задержки пакета.

## IMPROVING OF EFFICIENCY OF THE COMMUNICATION NETWORKS MANAGEMENT USING CHIRPED OPTICAL PULSES

The article discusses the possibility of creating adoptive optical devices that converts optical signals by controlling the electromagnetic field feeding additional optical radiation. It is assumed that the managing radiation changes the refractive index of the optical medium, thereby influencing the spectral composition of radiation and the pulse duration. Chirp leads to broadening of pulse duration and spectral width. Accordingly, changing the the chirp coefficient, you can control the structure of the primary information flow.

To perform conversions it's used multibeam interferometer. It is shown that by using different values of the reflection coefficient of the mirrors in the Fabry-Perot interferometer, there is a dependence between of phases of transmitted wave and the intensity, and, therefore, changing the ratio of chirp. It's estimated size of the device based on the Fabry-Perot interferometer.

The proposed principle of using chirp devices on an extensive network for «multiplexing» in the structure of the primary information flow control information additional. The block diagram of the device of the transmitting part of the adaptive fiber-optical communication system based on optical transfusion to control the pumping laser. This approach is supposed to be used in software-defined networking (SDN) to improve the survivability of network due to more rational use of the channel resource at the infrastructure level. Because this ideology assumes SDN centralized management, transmission of control information in conjunction with information flows is irrational. The proposed scheme allows to improve network performance, and provide additional protection of proprietary information steganographic method because it hides the fact of transferring the secondary stream.

It's proposed the algorithm of adjustment of parameters in the network to perform the routing problem due to the scanning state and automatically switching to an alternative path. The use of this algorithm allows to improve the BER and bit rate of the subscriber providing reasonable QoS metrics.

**Key words:** software-defined networks (SDN), fiber-optical switch, the working point of the interferometer, controlling of branched networks, time-delay.

### Введение

Одной из важнейших задач телекоммуникаций является повышение скорости передачи информации, при этом не ухудшая параметры передаваемых сообщений, такие как достоверность, вероятность битовой ошибки (BER) и др. В настоящее время все большее внимание уделяется вопросам управления телекоммуникационными процессами использованием физических эффектов (уровень L1 модели OSI). Так, в волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) зависимость показателя преломления от структуры проходящего света открывает широкие возможности для решения задач управления и разработки адаптивных оптических устройств [1]. Использование данных устройств особенно актуально при построе-

нии высокопроизводительных разветвлённых сетей передачи данных как городского масштаба (MAN), так и магистральных сетей. Причём для MAN повышение производительности на периферии сети, т.е. сегмента, на котором во главу угла ставятся параметры QoS для пользователя, основано не столько на росте битовой скорости, сколько на ускорении процессов управления сигналами [2]. Данный факт влечет за собой непрямую «интеллектуализацию» ВОСП и, соответственно, оправдывает поиск дополнительных параметров физических процессов, использование которых обеспечит наращивание ресурса управления, а значит, позволит расширить функциональные возможности сети.

Поскольку такие параметры неразрывно связаны с физической природой передавае-

мых сигналов, то они не могут наращиваться неограниченно. Преимущественно они уже известны и успешно внедряются в телекоммуникационные системы. Соответственно обнаружение нового параметра представляет существенный технический интерес и является актуальным. С этой точки зрения исследование возможностей применения такого параметра, как чирп (линейная частотная модуляция) оптического сигнала, при построении высокоскоростных сетей, к которым относятся современные и перспективные MAN, представляется актуальной технической задачей [3–5].

### 1. Технические аспекты реализации интерференционных чирпирующих устройств

Одним из способов получения оптического чирпа на ВОЛС является применение волоконных интерферометров, к примеру, Фабри-Перо (ИФП). Изменение показателя преломления кристалла, наполняющего ИФП, за счет подачи дополнительного управляющего излучения от лазера накачки приводит к изменению спектрального состава излучения и дисперсионных свойств среды. Как следствие, в проходящих в интерферометре импульсах возникает линейная частотная модуляция, коэффициент которой и будет являться управляющим параметром в интеллектуальных ВОСП.

Применение интерференционных устройств в интеллектуальных ВОСП осложняется рядом проблем. В интерферометре Фабри-Перо возможно возникновение постоянной составляющей в интерференционной картине, что приводит к аддитивному шуму в смежном канале и снижению динамического диапазона сигнала. А также необходимо учитывать размеры резонаторов для эффективной работы устройства и возможности использования их на реальных линиях.

Значение постоянной составляющей интерференционной картины обладает прямой зависимостью от коэффициента отражения зеркал  $\rho$  (рисунок 1). При увеличении коэффициента  $\rho$  до и более 0,8 постоянная составляющая становится меньше 10 % от максимальной амплитуды [6].

Пусть длина волны излучения лазера составляет [6]:

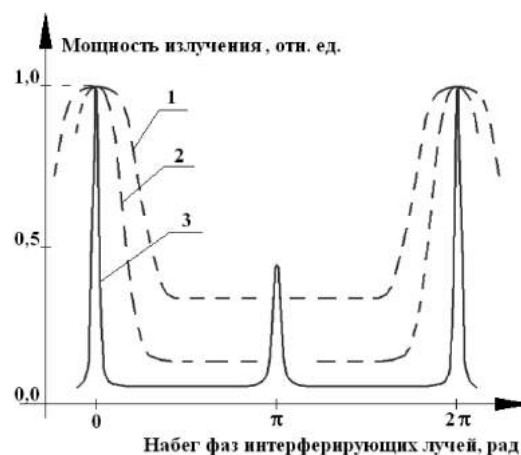


Рисунок 1. Зависимость мощности от набега фаз лучей для различных значений  $\rho$ : 0,6 (1); 0,8 (2); два резонатора 0,8 (3)

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{\partial \lambda}{\partial I} \cdot I(t) = \lambda_0 + \Delta \lambda. \quad (1)$$

Если  $\Delta \lambda$  не превосходит 0,1, ..., 0,5 % относительно  $\lambda_0$ , то зависимость фазы от спектрального состава имеет вид:

$$\delta(\lambda) = \frac{4\pi n h}{\lambda}; \quad |\Delta \delta(\Delta \lambda)| = \frac{4\pi n h}{\lambda^2} \cdot \Delta \lambda = \delta \cdot \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0}, \quad (2)$$

где  $h$  — расстояние между зеркалами.

Для интерферометра с коэффициентом отражения порядка 0,8 передача логической «1», либо логического «0» будет соответствовать требуемой рабочей точке. На качество приема искаженные фронты влияния практически не окажут, а лишь приведут к преобразованию поступающей энергии [7].

Произведем оценку радиуса смесителя на основе интерферометра Фабри-Перо. Коэффициент преломления зависит от интенсивности управляющего излучения  $I_{yup}$  [6]:

$$n = n_0 + \hat{n} \cdot 2I_{yup} \cdot \bar{Z}, \quad (3)$$

где  $\hat{n}$  — нелинейная составляющая показателя преломления, приблизительно составляющая  $10^{-15} \text{ м}^2/\text{В}^2$ ;

$\bar{Z}$  — волновое сопротивление среды.

Пусть при отключении управляющего излучения интерферометр пропускает максимум информационного излучения. Подача управляющего излучения изменяет показатель преломления, и рабочая точка смещается по его передаточной характеристике. Обозначим для первого случая разность хода лучей  $\delta_1$ , для второго —  $\delta_2$  (рисунок 2). Тогда соотношение между интенсивностью информационного сигнала на выходе  $I_{инф}^{вых}$  относительно интенсивности на входе  $I_{инф}^{вх}$  имеет вид [8]:

$$I_{инф,1}^{6\text{вх}} = I_{инф}^{6\text{вх}}(\delta_1) = 1 \cdot I_{инф}^{6\text{вх}} = I_{инф}^{6\text{вх}}; \quad (4)$$

$$I_{инф,2}^{6\text{вх}} = I_{инф}^{6\text{вх}}(\delta_2) = \frac{I_{инф}^{6\text{вх}}}{1 + \frac{4\rho}{(1-\rho)^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\delta_2}{2}\right)}$$

Поскольку передаточная функция имеет постоянную составляющую:

$$I_{инф,min}^{6\text{вх}} = I_{инф}^{6\text{вх}} \cdot \left(\frac{1-\rho}{1+\rho}\right)^2, \quad (5)$$

и реализуемое технически наименьшее значение может превосходить  $I_{инф,min}^{6\text{вх}}$  в  $\alpha$  раз, то для  $I_{инф,2}^{6\text{вх}}$  выражение примет вид [9]:

$$\frac{I_{инф}^{6\text{вх}}(\delta_2)}{I_{инф}^{6\text{вх}}} = \frac{1}{1 + \frac{4\rho}{(1-\rho)^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\delta_2}{2}\right)} = \alpha \cdot \left(\frac{1-\rho}{1+\rho}\right)^2. \quad (6)$$

Из (6) получаем соотношение для  $\delta_2/2$ :

$$\frac{\delta_2}{2} = \arcsin \sqrt{S}, \quad S = \left(\frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{1+\rho}{1-\rho}\right)^2 - 1\right) \cdot \frac{(1-\rho)^2}{4\rho}. \quad (7)$$

Поскольку  $\Delta\delta(\Delta n) = \frac{4\pi h}{\lambda} \cdot \Delta n$  и  $\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1$ , то учитывая (7), запишем [7]:

$$\frac{2\pi h}{\lambda} \cdot \Delta n = \arcsin \sqrt{S} = \frac{4\pi h}{\lambda} \cdot \hat{n} \cdot \bar{Z} \cdot \frac{P}{\pi r^2}, \quad (8)$$

где  $r$  — радиус смесителя,  $P$  — мощность (Вт) управляющего излучения, подаваемого в смеситель для смещения рабочей точки.

Выражение (8) учитывает соотношение между геометрическими параметрами устройства: длиной  $h$  и радиусом  $r$  смесителя, а также мощностью управляющего излучения  $P$ .

Оценим коэффициент отражения зеркал  $r$  из следующего соображения. В смесителе устройства предполагается использовать эрбиевую

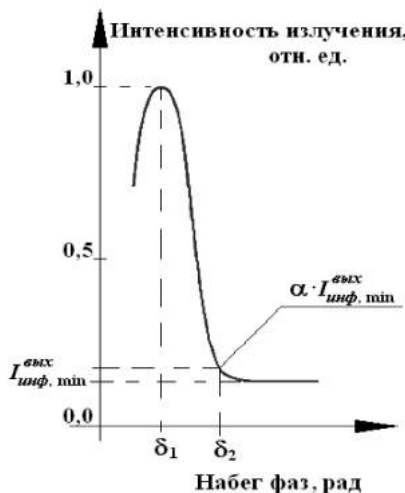


Рисунок 2. Смещение рабочей точки интерферометра при изменении  $\delta$

среду, которая, как известно, при накачке на длине волны 980 нм имеет провал усиления в области 1540–1545 нм [9]. Чтобы скомпенсировать провал, подберем рабочую точку, определяемую через  $\rho$ , таким образом, чтобы максимум передаточной функции приблизительно совпадал с минимумом передаточной функции эрбиевой среды, т.е. находился в пределах 1540–1545 нм. Приблизительное совпадение связано с тем, что передаточная функция интерферометра симметрична относительно максимума, а зависимость коэффициента усиления эрбиевой среды от длины волны — не симметрична.

Так, длина волны, на которой наступает максимум передаточной функции интерферометра,  $\lambda_{\max} = 1540$  нм, для нее интенсивность излучения на выходе  $I_{\max} = 1$  отн. ед. При изменении длины волны на  $\Delta\lambda$  интенсивность излучения на выходе интерферометра изменится на  $\Delta I$ . Пусть для спектральной границы многоканального сигнала  $\Delta\lambda = 1550$  нм — 1540 нм = 10 нм. В соответствии с выражением для передаточной функции интерферометра [9], запишем:

$$1 = \frac{1}{1 + H \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi n \cdot l_0}{\lambda_{\max}}\right)}; \quad (8)$$

$$1 - \Delta I = \frac{1}{1 + H \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi n \cdot l_0}{\lambda_{\max} + \Delta\lambda}\right)},$$

где  $H = \frac{4\rho}{(1-\rho)^2}$ .

Соотношение между  $l_0$  и порядком интерференции  $m_1$  дает:

$$\frac{2\pi n \cdot l_0}{\lambda_{\max}} = \frac{\pi}{2} \cdot m_1. \quad (9)$$

Отсюда, с учетом (8) и (9) получаем:

$$H = \frac{\Delta I}{1 - \Delta I} \cdot \sin^{-2}\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{m_1 \cdot \lambda_{\max}}{\lambda_{\max} + \Delta\lambda}\right). \quad (10)$$

Из-за того, что интерферометр оказывает влияние также и на управляющее излучение, желательно, чтобы он был настроен на максимум передаточной функции и на длине волны  $\lambda_{\text{pump}} = 980$  нм, поэтому, принимая во внимание (10), запишем:

$$l_0 \cong \frac{\lambda_{\max} \cdot m_1}{4n} = \frac{\lambda_{\text{pump}} \cdot m_2}{4n}. \quad (11)$$



Очевидно, что соотношение целочисленных параметров  $m_1$  и  $m_2$  должно приблизительно соответствовать соотношению  $\lambda_{max}$  и  $\lambda_{pump}$ . Так как числа 1540 и 980 соотносятся как 11:7, то необходимо выполнение условия:

$$m_1 : m_2 = 7 : 1. \quad (12)$$

Пусть значение  $\Delta I$ , которое должно соответствовать в относительных единицах перепаду характеристики усиления легированной среды, равно  $\Delta I \cong 0,87I$ , что соответствует усилению линейного EDFA — в 9,5 дБм [10]. С учетом этого коэффициент  $r$  может быть найден в результате решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{4\rho}{(1-\rho)^2} = \frac{\Delta I}{1-\Delta I} \cdot \sin^{-2} \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{m_1 \cdot \lambda_{max}}{\lambda_{max} + \Delta\lambda} \right); \\ \frac{\lambda_{max} \cdot m_2}{4n} \cdot \frac{\pi\sqrt{\rho}}{1-\rho} \cong l_0. \end{cases} \quad (13)$$

Исходя из соображений о реальности параметров конструкции, получено, что при  $n=1,48$  и  $m_1=4,103$  (для  $l_0 \approx 4,5267$  мм и  $m_2 \approx 6313$ ) коэффициент  $r \approx 0,3367$ . В этом случае эффективное число интерферирующих лучей [9] в интерферометре составляет 12,358, откуда следует, что  $N_e \cong 12-13$ .

Произведем численную оценку радиуса смесителя на основе ИФП для наиболее типичных конструктивных параметров волоконного интерферометра, [9]:  $h \cong 0,1$  мм. Уменьшение длины неизбежно приведет к увеличению стоимости, в то время как для смесителя с большей длиной начнется заметное размытие интерференционной картины. Пусть длина волны управляющего излучения составляет 980 нм. Волновое сопротивление излучению среды смесителя составляет приблизительно  $120 \cdot \pi$  Ом. Тогда для  $\rho=0,8$  получаем:  $S=0,90795$ . Отсюда, для диапазона мощностей управляющего сигнала 0,5–1 Вт средний радиус смесителя должен составлять 10–24 мкм.

## 2. Применение chirпированных сигналов на разветвленных сетях передачи информации

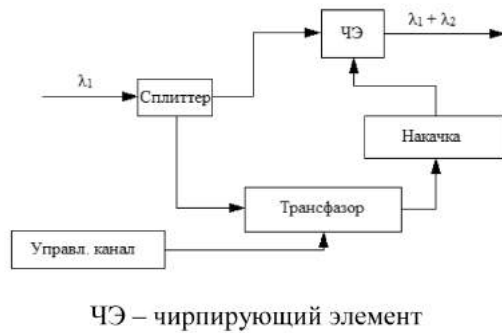
Chirпирование (линейная частотная модуляция) оптических импульсов как физический эффект, влияющий на структуру передаваемых данных, позволяет организовать независимый обмен данными между контроллерами в программно-конфигурируемых сетях SDN (SDN — Software Defined Networks) по волоконно-

оптическим каналам. Суть концепции SDN состоит в применении контроллеров, работающих под специализированной сетевой операционной системой, для управления сетевыми устройствами инфраструктурного уровня, которые обычно представляют собой коммутаторы L2. Протокол управления потоками в SDN — Open Flow представляет собой унифицированный с точки зрения конфигурирования оборудования сети механизм. Наиболее уязвимой для живучести сети частью SDN является централизованный принцип взаимодействия контроллеров и коммутаторов. Данная проблема проявляется в высокой вероятности отказа как по причине обрыва линий связи, так и перегруженности каналов инфраструктурного уровня. Поскольку управляющая информация транслируется вместе с потоком данных, то в моменты пиковой нагрузки имеется риск потери управления сетью. В настоящий момент данная задача решается путем дублирования управляющих функций контроллерами удаленных сегментов, что опять-таки снижает производительность сегментов. Применение chirпа как носителя служебной информации позволит независимо от транспортных каналов и с высокой степенью защищенности обеспечить многозвенное управление в SDN.

Функционал программно-конфигурируемых сетей в настоящее время переносят на транспортные сети, что приводит к необходимости использования оптической инфраструктуры для передачи данных. Это позволяет решать поставленную задачу при помощи оптических эффектов, в частности, использовать положительный chirп оптических импульсов для «мультиплексирования» канала управления в структуру основного информационного потока (рисунок 3).

Под влиянием накачки chirпирующий элемент (ЧЭ) осуществляет частотную модуляцию заднего фронта импульса, что приводит к возникновению девиации длины волны относительно центральной длины волны излучения  $\lambda_1 + \lambda_2$ . При этом управляющая информация передается на длине волны  $\lambda_2$  вместе с основным информационным потоком.

Оптический трансфозор представляет собой бистабильный оптический элемент — интерферометр Фабри-Перо, в резонаторе



ЧЭ – чирпирующий элемент  
Рисунок 3. Схема «мультиплексирования» управляющего сигнала

которого содержатся кристаллы GaInAs либо GaSe. Данное устройство обладает порогом пропускания, который может преодолеть излучение с определенной мощностью (в зависимости от кристалла мощность переключения может составлять 10–20 мВт).

Очевидно, что для адекватной работы системы необходимо, чтобы в основном канале использовался код NRZ, что позволит «совместить» информационный и управляющий потоки, поскольку в этом случае возникновение чирпа возможно как в момент логической «1», так и логического «0».

Под действием линейной частотной модуляции (чирпа) форма огибающей оптического импульса имеет вид [10]:

$$U(z, T) = \frac{T_0^2}{T_0^2 - i\beta_2 z(1 + iC)} \exp\left(-\frac{(1 + iC)T^2}{2[T_0^2 - i\beta_2 z(1 + iC)]}\right), \quad (14)$$

где  $C$  — коэффициент чирпирования.

Мультиплексирование каналов при помощи чирпа обладает существенным преимуществом — внедрение вторичного канала не приводит к уширению спектра передаваемого сигнала и, очевидно, повышает спектральную эффективность.

Выделение управляющей информации на приемной стороне выполняется когерентным фильтром, к примеру, интерферометром Фабри-Перо. Требования к фильтру должны учитывать малую девиацию длины волны между основным сигналом и чирпированным, составляющую порядка 0,01 нм.

Альтернативным способом детектирования является применение фазоразностной схемы. Для ее применения необходима генерация эталонного сигнала, близкого по структуре к первичному информационному потоку,

но без влияния вторичного чирпирования. Эталонный сигнал представляет собой последовательность импульсов фиксированной ширины. Отличия в ширине импульса позволяют путем вычитания из смеси первичного и вторичного потоков выделить вторичный сигнал. Данный способ имеет ряд недостатков. В частности, необходимо выполнять высокие требования к синхронизации последовательности импульсов, а также имеется общее усложнение схемы приема, поскольку ее реализация в виде оптических устройств является сложной инженерной задачей.

Аналогичные устройства могут применяться для решения более сложных 1-коммутационных задач, связанных, например, с выполнением маршрутизации и коммутации на одном уровне, и т.п. Из-за того, что согласно предложенной схеме управления соединениями на сегменте 1-VPN, возможна подстройка параметров линии, то возникает задача нахождения компромисса между интервалом времени  $D_n$ , позволительно затрачиваемым на настройку устройства преобразования  $U$ , и параметрами передаваемого сигнала (в частности, битовой скоростью и характеристиками ее изменения), зависящими от трафикового контракта, актуального в сетях с коммутацией пакетов. Такими устройствами следует управлять из ближайшего узла (пункта управления), передающего оптический сигнал транзитом в том числе.

К решению поставленной задачи возможно два подхода:

1) выполнение операции подстройки линии инициирует служебный сигнал, приводящий к ожиданию передающего устройства (коммутатора, маршрутизатора), с допустимой длительностью ожидания  $D_{ож,1}$ , находящейся в пределах служебного времени, отводимого на реконфигурацию (составляющего порядка от десятков до сотен миллисекунд);

2) выполнение указанной операции не производит каких-либо служебных сигналов на вышестоящий сетевой уровень. В этом случае длительность  $D_{ож,2}$  не должна превосходить, вообще говоря, длительности тактового интервала, который для высокоскорост-

ных систем передач 10/40 Гбит/с составляет порядка  $10^{-10}$  с.

Очевидно, что второй случай реализовать гораздо сложнее, особенно, если подстройка предполагает несколько итераций изменения параметров реконфигураторов (с возможным использованием пересчета в зависимости от свойств сигнала) либо даже выполнение измерений.

Рассмотрим случай, когда настройка параметров линии выполняется по инициативе специализированного оборудования подстройки (ОП) (расположенного, например, на регенерационном пункте (РП)) в результате получения им служебного сигнала от маршрутизатора (либо рабочей станции, управляющей сетью) с выработкой соответствующего встречного служебного сигнала.

На рисунке 4 обозначено: ОП — оборудование подстройки адаптивных реконфигураторов; АП — операция анализа подстройки (измерительный комплекс в общем случае может находиться на другом узле связи, измерения в этом случае должны выполняться дистанционно); Router 2, расположенный на РП, может являться автоматическим ключом, не выполняющим преобразований сигнала, а просто перенаправляющим его.

При необходимости переключения сегментов линии передающий маршрутизатор (Router 1) генерирует служебный сигнал 1, после чего переходит в режим ожидания разрешающего сигнала от рабочей станции. Предполагается, что Router 1 устанавливает сегментарный маршрут «из конца в конец».

Рабочая станция генерирует сигнал 2 для ОП, содержащий кроме прочего информацию о параметрах переключаемого сигнала. ОП готовит режим подстройки (операция 3) и затем подстраивает реконфигураторы (операция 4, на рисунке указан логический путь, физически это может быть реализовано средствами сигнала). После этого, при необходимости, может быть выполнен анализ (5) параметров работоспособности на вновь подключаемой схеме, и в случае его положительного завершения ОП сигнализирует об этом на рабочую станцию (6). Последняя выводит из режима ожидания передающий маршрутизатор (7), что и завершает операцию переключения (операция 8 — передача информационного сигнала по новому маршруту). Операция 7 может направляться не на передающий узел, а на Router 2, если тот, например, является автоматическим ключом.

Вероятность битовой ошибки на приеме из-за недостаточной подстройки  $PE_C$  связанная как с отличием длины волны от требуемого значения, искажением формы импульса из-за физических свойств преобразователя, так и возможной ошибкой оценки состояния сети, инициирующей подстройку, можно оценить как:

$$PE_C \cong \Theta \cdot \exp\left(-\frac{\Delta_n}{\tau_n}\right), \quad (15)$$

где  $\Theta$  — нормировочный коэффициент.

Очевидно, для снижения  $PE_C$  необходимо увеличивать  $\Delta_n$ .

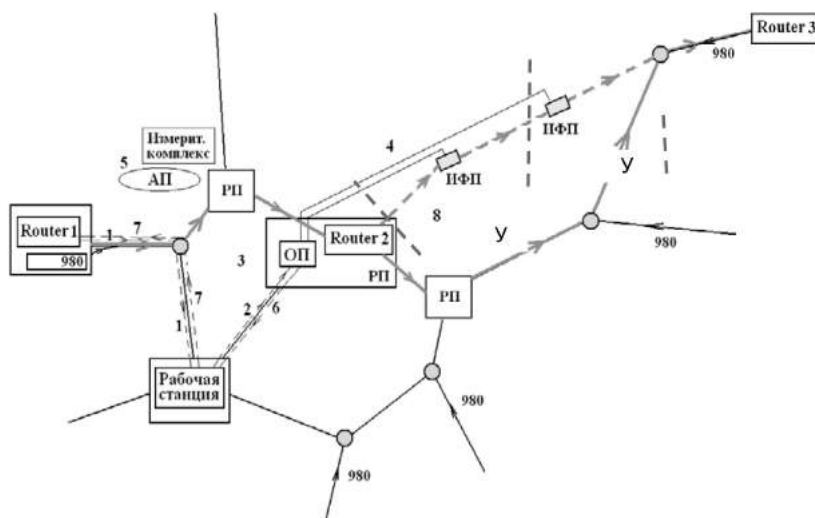
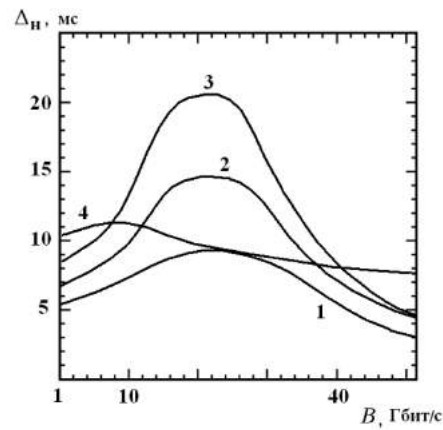


Рисунок 4. Иллюстрация алгоритма управления сетью при использовании адаптивных реконфигураторов

Но за время ожидания  $\Delta_{ож,1}$  увеличивается очередь пакетов, поступающих на маршрутизатор 1. Известно, что время ожидания пакета в очереди является ограниченной величиной, по превышению которой производится аннулирование пакета. Это приводит к необходимости повторного запроса пакета на принимающей стороне, в результате чего на приемной стороне наблюдается задержка. Известно также, что технология Ethernet больше других (в сравнении с FrameRelay, TakingRing и др.) страдает от повышения времени ожидания доступа к среде при повышении загрузки сегмента (оборудования). Кроме того, наиболее популярные сегодня виды трафика: передача видеоизображения, телевизионного сигнала и IP-голоса критичны к задержкам (в сравнении с другими типами трафика: передача файловых данных файловой службой, службой электронной почты или службой печати).

Пусть вероятность битовой ошибки вследствие избыточной очереди составляет:  $PE_L \sim \Xi \times (L - \Lambda_0)$  до возникновения отказа по причине потери большого количества (данный случай не рассматривается, т.к. приводит к остановке работы сегмента); здесь  $L$  — длина (в битах) накопившейся очереди из-за дополнительной задержки;  $\Lambda_0$  — нормально обслуживаемая длина очереди;  $\Xi$  — коэффициент пропорциональности. Очевидно, что  $L$  зависит от типа трафика. Для таких видов трафика, как CBR, rt-VBR, ABR и UBR, которые могут обслуживать передачу, связанную с каналом (видео и голос в режиме реального времени) (рисунок 5), указанную длину очереди можно представить как:

$$\begin{aligned} \Lambda_{CBR} &= [B \cdot \Delta_{ож,1}] \cdot \left[ \sum_{j=i-1}^{\gamma-1} (-1)^{j-1} \sum_{k=i}^{\gamma} C_k^j \exp(-kB\Delta_{ож,1}) \right], \\ \Lambda_{rt-VBR} &= [B \cdot \Delta_{ож,1}] \times \\ &\times \left[ \sum_{j=i-1}^{\gamma-1} \sum_{k=i}^{j+1} C_k^j C_{j+1}^k \sum_{m=0}^{j+1-k} (-1)^m C_{j+1-k}^m \cdot e^{-mB\Delta_{ож,1}} \right], \\ \Lambda_{ABR} &= [B \cdot \Delta_{ож,1}] \times \\ &\times \left[ \sum_{j=i-1}^{\gamma} C_{j+1}^i \cdot (1 - \exp(-B \cdot \Delta_{ож,1}))^{j+1-i} \right], \\ \Lambda_{UBR} &= [B \cdot \Delta_{ож,1}] \times \\ &\times \left[ \sum_{j=i-1}^{\gamma} \sum_{k=i}^{j+1} C_k^j C_{j+1}^i \cdot (-1)^k \cdot C_{j+1-i}^k \exp(-jB\Delta_{ож,1}) \right], \end{aligned} \tag{16}$$



1 — CBR; 2 — rt-VBR; 3 — ABR; 4 — UBR

**Рисунок 5.** Зависимость допустимого интервала подстройки адаптивных реконфигураторов и битовой скорости передачи для различных видов трафика

где  $i$  — длина пакета в битах, соответствующая рассматриваемому протоколу;  
 $\gamma$  — количество ячеек заполнения;  
 $B$  — битовая скорость работы протокола (бит/с);  
 $C_{j+1}^i$  — число сочетаний из  $i$  по  $j+1$ ;  
 $[ \bullet ]$  — операция выделения целой части рационального числа.

Нахождение данных параметров позволяет оценить целесообразность подстройки реконфигураторов, а также определиться с возможностью изменения маршрута передачи, если подстройка необходима в условиях ограниченных временных рамок (например, высокая битовая скорость по отношению к необходимой для данного участка  $D_H$ ). Подстройка может быть отменена при наличии альтернативных сегментов с низким уровнем загруженности или в случаях, когда время устранения коллизий не критично.

**Выводы**

Таким образом, в результате исследования возможностей построения адаптивных оптических сетей на основе chirпирующих элементов, управляемых оптическим излучением, можно прийти к следующему заключению. Техническая реализация данных устройств ввиду малых габаритов и низких мощностей управляющего излучения позволит повысить эффективность сетей передачи данных. Интерферометр Фабри-Перо с эрбиевой средой в резонаторе приводит к линейной частотной модуляции импульсов с коэффициентом, достаточным для «мультиплексирова-



ния» вторичного потока в структуру информационного с приемлемым уровнем BER, поскольку данное решение обладает высокой чувствительностью к фазовому набегу волн.

Для расширения функциональности существующих на сегодняшний день сетей взаимодействия контроллеров SDN предложено использовать схему «включения» управляющего потока в структуру основного информационного канала. При использовании линейного кода без возврата к нулю (NRZ) и импульсной накачки данный метод позволяет

увеличить пропускную способность канала без влияния на ширину спектра, что увеличивает, в конечном итоге, спектральную эффективность системы, а также обеспечивается секретность передачи служебной информации, поскольку факт ее передачи неочевиден для стороннего наблюдателя и может быть определен только лишь методами спектрального анализа. Во временной области изменение сигнала схоже с естественными дисперсионными процессами, присущими протяженным волоконно-оптическим линиям.

### Список литературы

1. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы MPLS. СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 2005. 304 с.
2. Перспективы развития сети Интернет [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://infopud.ucoz.ru/publ/5-1-0-38>.
3. Меккель А.М. Коммутация в оптических транспортных сетях // Фотон-экспресс. 2010. № 7. С. 28–33.
4. Can 100 Gb/s Wavelengths be Deployed Using 10Gb/s Engineering Rules? // R. Saunders, G. Nicholl, K. Wollenweber, T. Schmidt [Electron Resource]. Available at URL: <http://www.oclaro.com>.
5. Nortel: Solving the 100 Gbps Transmission Challenge [[Electron Resource]. Available at URL: <http://www.exfo.com/en/ExpertiseHub>.
6. Матвеев А.Н. Оптика: учеб. пособие для физ. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1985. 351 с.
7. Виноградова И.Л., Кашбиев А.А., Зевиг В.Г. и др. Применение chirпированного сигнала для построения адаптивных волоконно-оптических сетей связи // Вестник УГАТУ. 2013. № 2. С. 20–28.
8. Гауэр Дж. Оптические системы связи: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 504 с.
9. Султанов А.Х., Виноградова И.Л., Салихов А.И. Подход к комплексному моделированию профилированного интерферометра типа Фабри-Перо, обеспечивающего переключение оптических сигналов // Вестник УГАТУ. 2009. № 1. С. 172–179.
10. Agrawal Govind P. Nonlinear Fiber Optics. Boston: Academic Press, 2000. 458 p.

### References

1. Gol'dshtein A.B., Gol'dshtein B.S. Tekhnologiya i protokoly MPLS. SPb.: BKhV-Sankt-Peterburg, 2005. 304 s.
2. Perspektivy razvitiya seti Internet [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: URL: <http://infopud.ucoz.ru/publ/5-1-0-38>.
3. Mekkel' A.M. Kommutatsiya v opticheskikh transportnykh setyakh // Foton-ekspress. 2010. № 7. S. 28–33.
4. Can 100 Gb/s Wavelengths be Deployed Using 10Gb/s Engineering Rules? // R. Saunders, G. Nicholl, K. Wollenweber, T. Schmidt [Electron Resource]. Available at URL: <http://www.oclaro.com>.
5. Nortel: Solving the 100 Gbps Transmission Challenge [[Electron Resource]. Available at URL: <http://www.exfo.com/en/ExpertiseHub>.
6. Matveev A.N. Optika: ucheb. posobie dlya fiz. spets. vuzov. M.: Vysshaya shkola, 1985. 351 s.
7. Vinogradova I.L., Kashbiev A.A., Zevig V.G. i dr. Primenenie chirpirovannogo signala dlya postroeniya adaptivnykh volokonno-opticheskikh setei svyazi // Vestnik UGATU. 2013. № 2. S. 20–28.
8. Gauer Dzh. Opticheskie sistemy svyazi: per. s angl. M.: Radio i svyaz', 1989. 504 s.
9. Sultanov A.Kh., Vinogradova I.L., Salikhov A.I. Podkhod k kompleksnomu modelirovaniyu profilirovannogo interferometra tipa Fabri-Pero, obespechivayushchego pereklyuchenie opticheskikh signalov // Vestnik UGATU. 2009. № 1. S. 172–179.
10. Agrawal Govind P. Nonlinear Fiber Optics. Boston: Academic Press, 2000. 458 p.



**Петрова И. Ю.**  
**Petrova I. Yu.**

доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы», ГАОУ ВО «Астраханский государственный архитектурно-строительный университет», г. Астрахань, Российская Федерация



**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



**Николаев А. В.**  
**Nikolaev A. V.**

аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

УДК 681.5.09

## **КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗОНЫ РЕЗАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ**

Процесс механической обработки является сложным, потому как на него оказывают влияние многие факторы, большинство из которых напрямую влияет на производительность обработки и на качество поверхности обрабатываемого изделия. Исключительное значение приобретает повышение контроля над процессом резания путем введения систем диагностирования.

Огромное количество разнообразных моделей металлорежущих станков указывает на целесообразность использования бесконтактных способов контроля, позволяя тем самым осуществлять оперативную установку и настройку информационно-измерительной системы. В качестве метода мониторинга и диагностирования технического состояния зоны резания углеродосодержащих сплавов предлагается использовать метод газового анализа. В предыдущих работах авторами статьи была разработана информационная автоматизированная система мониторинга и диагностирования технического состояния зоны резания углеродосодержащих сплавов. Как и любое другое средство измерений, предназначенное для измерения физической величины, информационная автоматизированная система должна удовлетворять всем метрологическим правилам и нормам. Большое количество разновидностей погрешностей, причин их возникновения и методов описания в научно-технической литературе вызвало необходимость систематизации источников погрешностей, проведения их анализа и классификации применительно к информационной автоматизированной системе мониторинга и диагностированию технического состояния зоны резания углеродосодержащих сплавов.

В связи с этим в данной работе рассматриваются вопросы, связанные с анализом погрешностей, возникающих в процессе измерений. Установлено, что основным источником погрешностей являются систематические и методические погрешности. Выявлена природа возникновения погрешностей, разработана их классификация, дана аналитическая характеристика и рекомендации по их уменьшению.

Практическая значимость работы состоит в возможности на основании предложенной классификации погрешностей обобщить и систематизировать источники погрешностей информационной автоматизированной системы мониторинга и диагностирования технического состояния зоны резания углеродосодержащих сплавов для их дальнейшего анализа с целью их учета и уменьшения влияния на конечный результат.

**Ключевые слова:** информационно-измерительная система, механическая обработка, концентрация газов в зоне резания, оксид углерода, источники погрешностей, средство измерений, классификация, измерения.

## CLASSIFICATION OF ERRORS THE INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR NONCONTACT INSPECTION OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE CUTTING ZONE WHEN MACHINING CARBON-CONTAINING MATERIALS

The machining process is complex because it is affected by many factors, most of which directly affects the processing performance and surface quality of the workpiece. Of exceptional importance is the increasing control over the cutting process through the introduction of diagnostic systems.

A huge variety of models of machine tools indicates the feasibility of using contactless methods of control, allowing you to implement rapid installation and configuration of the information-measuring system. As a method of monitoring and diagnosing the technical condition of the cutting zone carbon-containing alloys it is proposed to use a method of gas analysis. In previous articles, the authors developed an information automated system for monitoring and diagnosing the technical condition of the cutting zone carbon-containing alloys. Like any other means of measurement intended for measuring a physical quantity, information automated system must meet all the metrological rules and norms. A large number of varieties of errors, their causes and methods of description in scientific literature caused the necessity of systematization of the sources of errors, their analysis and classification in relation to the automated information system of monitoring and diagnosing the technical condition of the cutting zone carbon-containing alloys.

In this regard, this paper discusses the issues related to the analysis of errors arising in the measurement process. It is established that the main source of error are the systematic and methodological error. Identified nature of occurrence of errors, developed their classification, they provide an analytical characterization and recommendations for their reduction.

Practical significance of work consists in possibility on the basis of the proposed classification of errors allows to generalize and systematize the sources of errors of the automated information system of monitoring and diagnosing the technical condition of the cutting zone carbon-containing alloys for further analysis with a view to their registration and reduce the influence on the final result.

**Key words:** information-measuring system, machining, gas concentration in the cutting zone, the carbon monoxide, error sources, means of measurement, classification, measurement.

Обработка металлов резанием является на сегодняшний день одной из наиболее значимых областей процесса производства деталей в машиностроении. Процесс обработки деталей резанием имеет большое преимущество перед другими методами формообразования, так как обеспечивает высокую точность, универсальность, гибкость и т.д. Однако данный процесс не всегда бывает экономически эффективным, так как на него оказывают влияние многие факторы, большинство из

которых напрямую влияет на производительность обработки.

Исключительное значение приобретает повышение контроля над процессом резания путем введения систем диагностирования. Работа системы диагностирования основана на контроле процессов, происходящих в зоне резания. Разработка составляющих системы диагностирования и их внедрение в технологическую систему, а также учёт большинства ограничивающих факторов процесса резания

позволяют избежать катастрофического износа отдельных элементов технологической системы, отказов режущих инструментов, распространения высоких температур в зоне резания и во всей технологической системе, снижения надёжности работы оборудования в целом.

На рисунке 1 представлена функциональная схема информационной автоматизированной системы мониторинга и диагностирования технического состояния зоны резания углеродосодержащих сплавов [1].

Информационная автоматизированная система мониторинга и диагностирования технического состояния зоны резания углеродосодержащих сплавов является разновидностью средств измерений. Как и любое другое средство измерений, предназначенное для измерения физической величины, информационная автоматизированная система должна удовлетворять всем метрологическим правилам и нормам.

*Обязательными компонентами любого измерения являются:*

- 1) физическая величина, значение которой нужно измерить;
- 2) единица физической величины;
- 3) метод измерения;

- 4) средство измерения;
- 5) наблюдатель (ЭВМ);
- 6) условия окружающей среды;
- 7) результат измерения.

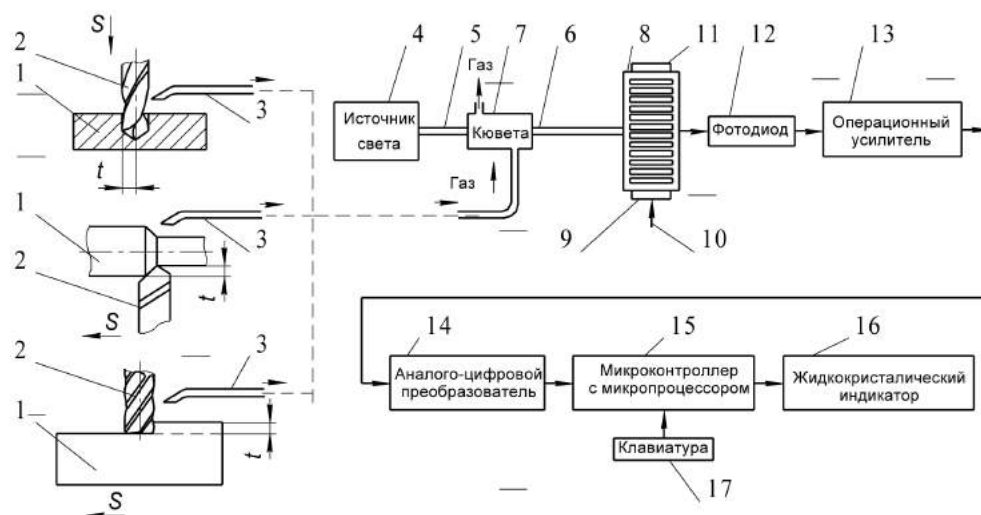
Погрешность вызывается совместным изменением перечисленных выше компонент в процессе измерения физической величины.

Большое количество разновидностей погрешностей, причин их возникновения и методов описания в научно-технической литературе вызвало необходимость систематизации источников погрешностей, их анализ и классификацию применительно к информационной автоматизированной системе мониторинга и диагностирования технического состояния зоны резания углеродосодержащих сплавов.

Рассмотрим погрешности информационной автоматизированной системы мониторинга и диагностирования технического состояния зоны резания углеродосодержащих сплавов по двум направлениям: по способу выражения и по закономерностям проявления.

*По способу выражения* классифицируют погрешности следующим образом:

- абсолютная погрешность — отражает разность между действительным значением



1 — обрабатываемая деталь; 2 — режущий инструмент; 3 — зонд для забора газа; 4 — источник оптического излучения в виде лазерного диода; 5 — оптическое волокно; 6 — кювета; 7 — оптическое волокно; 8 — акустооптический преобразователь; 9 — пьезоизлучатель для создания ультразвуковой волны в акустооптическом преобразователе; 10 — генератор радиочастот для питания пьезоизлучателя; 11 — демпфер для гашения ультразвуковой волны; 12 — фотодиод; 13 — преобразователь ток-напряжение на базе операционного усилителя; 14 — аналогово-цифровой преобразователь; 15 — микроконтроллер со встроенным микропроцессором; 16 — жидкокристаллический индикатор; 17 — клавиатура управления режимом работы микроконтроллера

**Рисунок 1.** Функциональная схема информационно-измерительной системы



концентрации оксида углерода  $C_d$  вблизи зоны резания и измеренным значением концентрации  $C_{изм}$  (выражается в единицах измеряемой величины):

$$\Delta = C_d - C_{изм};$$

- относительная погрешность — отражает отношение абсолютной погрешности  $D$  к измеренному значению концентрации оксида углерода  $C_{изм}$ . Характеризует погрешность только в данной точке шкалы и зависит от значения измеряемой величины:

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{C_{изм}} \cdot 100\%;$$

- приведённая погрешность — отражает отношение абсолютной погрешности  $D$  к нормирующему значению концентрации оксида углерода  $C_{норм}$ , установленному для приведенных значений:

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{C_{норм}} \cdot 100\%.$$

Такая классификация позволяет представить погрешность измерения лишь по форме числового выражения и не позволяет увидеть причину возникновения погрешности. Поэтому рассмотрим классификацию *по закономерностям проявления*:

- систематические погрешности — остаются постоянными или изменяются по известной закономерности во все время проведения измерений;
- случайные погрешности — изменяются случайным образом, незакономерно при проведении повторных измерений одной и той же величины;
- промахи или грубые погрешности, значительно превышают предполагаемые в данных условиях проведения измерений систематические и случайные погрешности.

Рассмотрим каждый тип погрешности более подробно.

Такой тип, как промахи или грубые погрешности, появляются из-за грубых ошибок оператора в процессе проведения измерения, неожиданного изменения внешних условий, технической неисправности информационной автоматизированной системы мониторинга и диагностирования технического состояния зоны резания углеродосодержащих сплавов. Их обычно исключают из результатов измерений и не учитывают при обработке результатов.

Случайные погрешности можно рассмотреть по закону рассеивания значений:

- предельный;
- среднеквадратичный;
- вероятный;
- средний;
- среднеарифметический.

Случайную погрешность невозможно полностью устранить, она всегда в некоторой степени искажает конечные результаты измерений. Но можно сделать результат измерения более точным за счет проведения повторных измерений.

Систематические погрешности в отличие от случайных обнаружить тяжелее, поскольку даже при проведении повторной серии экспериментов они остаются постоянными. Существует два вида систематических погрешностей: по виду источника и по характеру проявления.

*По виду источника погрешности бывают:*

- *методические* — погрешности, которые могут быть определены и количественно оценены с помощью формального описания измерительной процедуры путем построения математической модели. Количественная оценка погрешностей и их характеристик при этом выполняется на основе расчетов или имитационного моделирования [2]. К такому можно отнести погрешность дискретизации; погрешность, связанную с формальным описанием процесса измерения и т.д.;
- *инструментальные* — погрешности, принадлежащие данному средству измерения и определяющиеся при его испытании. К такому можно отнести: неточность настройки компонентов измерительной системы; неправильное расположение компонентов относительно друг друга; нестабильность излучения источника света; старение и износ компонентов и многое другое. С целью уменьшения инструментальных погрешностей информационной автоматизированной системы мониторинга и диагностирования технического состояния зоны резания углеродосодержащих сплавов, необходимо проводить:

- операцию грубой настройки — настройка освещения, центрирование, фокусирование и развороты вокруг оптической оси отдельных узлов, а также установка всех устройств по отвесу;

— операции тонкой настройки — фокусирование при поперечных измерениях и центрирование при продольных;

— проверку значения опорного сигнала (сигнала в отсутствие загрязняющих веществ на трассе: источник излучения открыт, объектив открыт, кюветное отделение пусто) по всему диапазону. Полученные результаты должны быть положительны;

— выбор рациональной конструкции элементов системы и оптимальной технологии их изготовления [3, 4].

Таким образом, указанные выше операции позволят максимально сократить влияние инструментальной погрешности на результат измерений информационной автоматизированной системой мониторинга и диагностирования технического состояния зоны резания углеродосодержащих сплавов;

• *субъективные* — погрешности, связанные с индивидуальными особенностями лица, выполняющего измерения. Поскольку процесс измерения информационной автоматизированной системы мониторинга и диагностирования технического состояния зоны резания углеродосодержащих сплавов максимально автоматизирован, то субъективные погрешности незначительны [2, 5].

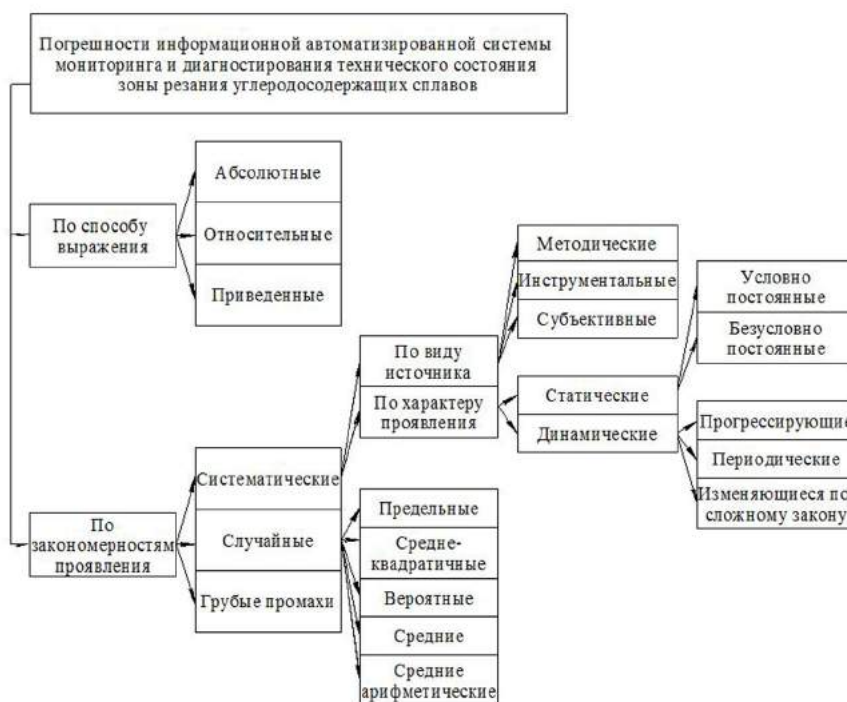
*По характеру проявления погрешности бывают:*

• статическая погрешность результата измерений, свойственная условиям статического измерения, то есть при измерении постоянных величин после завершения переходных процессов в элементах приборов и преобразователей. Статическая погрешность средства измерений возникает при измерении с его помощью постоянной величины;

• динамическая погрешность результата измерений, свойственная условиям динамического измерения. Динамическая погрешность появляется при измерении переменных величин и обусловлена инерционными свойствами средств измерений. Динамические погрешности можно разделить по характеру изменения:

- прогрессирующие;
- периодические;
- изменяющиеся по сложному закону.

На основании вышеизложенного была построена схема классификации погрешностей информационной автоматизированной системы мониторинга и диагностирования технического состояния зоны резания углеродосодержащих сплавов, представленная на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Классификация погрешностей информационной автоматизированной системы мониторинга и диагностирования технического состояния зоны резания углеродосодержащих сплавов

**Вывод**

Данная классификация позволяет обобщить и систематизировать источники погрешностей информационной автоматизированной системы мониторинга и диагностирования технического состояния зоны резания углеродосодержащих сплавов для их

дальнейшего анализа с целью их учета и уменьшения влияния на конечный результат.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-50122 мол\_нр.*

**Список литературы**

1. Ураксеев М.А., Николаев А.В. Информационно-измерительная система контроля газовоздушной среды в зоне резания при механической обработке // Приборы. 2015. № 12. С. 28-30.
2. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
3. Креопалова В.А., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 380 с.
4. Кривовяз Л.М., Пуряев Д.Т., Знаменская М.А. Практика оптической измерительной лаборатории. М.: Машиностроение, 1974. 332 с.
5. Сурикова Е.И. Погрешности приборов и измерений. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1976. 158 с.

**References**

1. Urakseev M.A., Nikolaev A.V. Informatsionno-izmeritel'naya sistema kontrolya gazovozdushnoi sredy v zone rezaniya pri mekhanicheskoi obrabotke // Pribory. 2015. № 12. S. 28-30.
2. Novitskii P.V., Zograf I.A. Otsenka pogreshnostei rezul'tatov izmerenii. L.: Energoatomizdat, 1985. 248 s.
3. Kreopalova V.A., Lazareva N.L., Puryaev D.T. Opticheskie izmereniya. M.: Mashinostroenie, 1987. 380 s.
4. Krivovyaz L.M., Puryaev D.T., Znamenskaya M.A. Praktika opticheskoi izmeritel'noi laboratorii. M.: Mashinostroenie, 1974. 332 s.
5. Surikova E.I. Pogreshnosti priborov i izmerenii. L.: Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta, 1976. 158 s.



**Леонов В. В.**  
**Leonov V. V.**

*кандидат биологических наук,  
заведующий сектором электрохимических  
исследований лаборатории «Физико-  
химическая механика», ФГБУН «Институт  
механики» Уфимского научного центра  
Российской академии наук,  
г. Уфа, Российская Федерация*



**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*

УДК 530.1:536.7:539.3:538.9

## **ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МИКРОБНОЙ КОРРОЗИИ**

В рамках создания методики электрохимического исследования микробной коррозии разработан способ определения влияния микроорганизмов на коррозионные процессы. В статье представлены данные научно-исследовательских работ по определению особенностей формирования коррозионно-опасного биоценоза микроорганизмов нефтепромысловых вод в условиях коррозионных электрохимических систем проточного типа, сопровождаемого изменением основных термодинамических и кинетических параметров процесса коррозии, что отражено в изменении комплекса электрохимических показателей, характеризующих коррозионное разрушение металла. Разработаны простые и надежные экспериментальные методики, позволяющие однозначно вычленил микробную составляющую из общего коррозионного фона. Определены подходы к исследованию механизмов влияния химических реагентов на макрокинетические параметры микробной коррозии, имеющие электрохимическую природу, с использованием методов электрохимии, что дает возможность наработать базу данных для объективного сравнения применяемых и перспективных бактерицидов в рамках производства продуктов малотоннажной химии.

Электрохимический метод разработан для изучения коррозии низкоуглеродистой стали в нефтепромысловых водах с участием микроорганизмов, а также представлена методика определения интенсивности микробных коррозионных процессов на фоне общей коррозионной агрессивности жидких сред систем добычи нефти.

Метод разработан с целью повышения эффективности определения биологической составляющей коррозионной агрессивности жидких сред. Результатом применения метода является упрощение известных способов определения биологической составляющей коррозионной агрессивности и повышение надежности ее установления в процессах общей коррозии.

Поставленная задача решается путем определения интенсивности процессов коррозии амперометрически с установлением стационарных значений силы тока общей коррозии и ее фоновой небиологической составляющей, биологическую составляющую коррозионной агрессивности жидкой среды определяют количественно. Прямое амперометрическое определение интенсивности процессов коррозии в исследовании биологических систем ранее не предлагалось.



С использованием разработанной методики определена микробиологическая составляющая коррозионных процессов в водах месторождений ряда нефтеносных регионов. Установлена высокая коррозионная активность микрофлоры нефтепромысловых биоценозов, наличие которых определяет возрастание скорости коррозии в 1,5 — 3 раза. Микроорганизмы образуют закрепленные формы на поверхности металла, формируя биопленки и биообразования.

Влияние микробиологического фактора существенно изменяет макрокинетические параметры коррозионного процесса, определяя характерный вид экспериментальных токовых кривых, иллюстрирующих перенос заряда в электрохимической системе. Микроорганизмы преодолевают высокий активационный барьер при переходе на новый режим растворения металла, поддерживая его длительное время, необходимое для их развития и жизнедеятельности.

**Ключевые слова:** микробная коррозия, электрохимия, электрохимический метод.

## ELECTROCHEMICAL METHOD OF THE MICROBIAL CORROSION RESEARCH

As part of the method of electrochemical studies of microbial corrosion developed a method for determining microbial effect on corrosion processes. The article presents the research work to identify the features of formation of corrosion-hazardous biocenosis microorganisms oilfield water in a corrosive electrochemical systems flow type, followed by a change in the basic thermodynamic and kinetic parameters of the corrosion process, which is reflected in the change of complex electrochemical parameters describing corrode metal. A simple and reliable experimental techniques to uniquely detect that the microbial component of the overall corrosion background. Approaches to the study of mechanisms of the effect of chemicals on macrokinetic parameters microbial corrosion with electrochemical nature, using electrochemistry techniques, which makes it possible to accumulate a database used for objective comparison and promising microbicides as part of the production of low-tonnage chemistry products.

Electrochemical method designed to examine the corrosion of low carbon steel in oilfield waters with organisms, as well as methods of detecting the intensity of microbial processes corrosive against the overall corrosiveness of the liquids oil production systems.

The aim of the method is to increase the efficiency of the biological component of the definition of corrosiveness of liquid media. The result of the method is to simplify the known methods for determining the biological component of the corrosion activity and increasing the reliability of its establishment in general corrosion processes.

The problem is solved by the fact that the intensity of corrosion processes is determined amperometrically, with the establishment of the common values of stationary corrosion current and the background of its non-biological component and the biological component of the corrosiveness of the fluid is quantified. Direct amperometric determination of the intensity of corrosion processes in the study had not previously suggested biological systems.

Using the developed methodology defined microbiological component of the corrosion processes in the waters of a number of oil fields regions. The high corrosivity of the microflora of biocenoses oilfield, the presence of which determines the increase in the corrosion rate of 1,5 — 3 times. Microorganisms attached form a shape on the metal surface, and forming a biofilm bioobrazovaniya.

Effect of microbiological factor macrokinetic significantly modifies the parameters of the corrosion process, defining the distinctive look of the current experimental curves illustrating charge transfer in an electrochemical system. Microorganisms overcome the high activation barrier in the transition to a new metal dissolution mode, supporting long periods of time required for their development and functioning.

**Key words:** microbial corrosion, electrochemistry, electrochemical method.

## Введение

Проблема защиты от коррозионных разрушений систем добычи нефти в настоящее время является одной из наиболее актуальных в нефтяной промышленности, что связано с высокой металлоемкостью используемых технологий заводнения продуктивных пластов — коллекторов в целях поддержания пластового давления, подготовки и транспортировки извлеченной продукции. Коррозионная агрессивность жидких технологических сред, находящихся в контакте с промышленным оборудованием и трубопроводами, постоянно возрастает по мере увеличения длительности времени эксплуатации месторождений. Помимо влияния на коррозионный процесс традиционных факторов, имеющих физико-химическую природу, при использовании для технологических целей вод из природных водоемов, не прошедших специальной противомикробной обработки, существенный вклад в коррозию вносит микробиологическая составляющая.

Формирование коррозионно-опасного биоценоза микроорганизмов нефтепромысловых вод сопровождается изменением основных термодинамических и кинетических параметров процесса коррозии, что находит свое отражение в изменении комплекса электрохимических показателей, характеризующих коррозионное разрушение металла. Результаты многочисленных коррозионных экспериментов [1, 2] позволяют сделать заключение о многоуровневом механизме влияния микроорганизмов на коррозионный процесс. Ряд предположений, выдвинутых исследователями с начала 20-х гг. XX столетия, связывает возможность взаимодействия микробных клеток с поверхностью металла вплоть до квантового уровня путем выравнивания энергий зон Ферми с использованием туннельного эффекта при перемещении электрона.

В то же время макрокинетика коррозионных процессов в присутствии микроорганизмов изучена недостаточно. Несмотря на наличие мощного арсенала средств исследования коррозии, в том числе, и электрохимических методов, особенности протекания коррозионных реакций с участием микробов

не позволяют использовать их в существующем виде для постановки коррозионных экспериментов в целях определения реального вклада микробиологического фактора в коррозионный процесс. Простых и надежных экспериментальных методик, позволяющих однозначно выделить микробную составляющую из общего коррозионного фона, в настоящее время не существует. Как следствие, результаты экспериментов не поддаются однозначному истолкованию и не могут быть сопоставлены.

Предложенный метод относится к способам контроля коррозионной агрессивности жидких природных и техногенных сред и может быть использован в различных отраслях промышленности, в том числе, в нефтяной.

Известны способы определения коррозионной агрессивности жидких сред с использованием гравиметрических и поляризационных методов, основными регистрируемыми параметрами которых служит изменение массы и поляризационного сопротивления испытуемых металлических образцов — электродов [3, 4]. Недостатками известных способов являются низкая чувствительность существующих методик измерения и сложность разделения компонент аналитического сигнала, представленного в интегральной форме регистрируемого импеданса, что препятствует применению таких методов в биологических исследованиях.

Известны также способы определения коррозионной агрессивности жидких сред, зараженных микроорганизмами, с использованием базовой в коррозионной электрохимии группы методов снятия поляризационных кривых — классической вольтамперометрии [3, 5].

Недостатками способа по прототипу являются необходимость снятия полных поляризационных кривых в определенный момент времени, в результате которого может быть получен дискретный ряд значений коррозионных токов, а также необходимость использования внешнего источника стабилизированного тока, поляризующего исследуемый образец — электрод. Существенным недостатком способа снятия поляризационных кривых в биологических исследованиях

является также прохождение тестирующего тока через систему, содержащую биообъекты — клетки микроорганизмов, что нарушает их жизнедеятельность и искажает процесс биологической коррозии. Наконец, существует ряд принципиальных трудностей, определяющих использование методов вольтамперометрии в исследовании процессов коррозии в природных и техногенных жидких средах, представляющих собой сложные многокомпонентные системы. Присущая таким системам стохастическая модель поведения определяет низкую сходимость результатов повторных экспериментов, полученных в пределах имеющихся проб исследуемых жидких сред. Это объясняется размытостью спектров характеристических времен релаксации отдельных составляющих системы в процессе проводимого электролиза.

#### *Описание метода*

Преимуществом предлагаемого метода является повышение эффективности определения биологической составляющей коррозионной агрессивности жидких сред. Применение метода приведет к упрощению известных способов определения биологической составляющей коррозионной агрессивности и повышению надежности ее установления в процессах общей коррозии.

Поставленная задача решается тем, что интенсивность процессов коррозии определяют амперометрически с установлением стационарных значений силы тока общей коррозии и ее фоновой небиологической составляющей. Биологическую составляющую коррозионной агрессивности жидкой среды определяют по формуле

$$K = \frac{I - I_0}{I} 100\%, \quad (1)$$

где  $K$  — биологическая составляющая коррозионной агрессивности, %;

$I$  — стационарное значение тока коррозии, А;  
 $I_0$  — стационарное значение силы тока фоновой небиологической составляющей общей коррозии, А.

Коррозионную электрохимическую систему стабилизируют путем параллельного подключения идентичных электрохимиче-

ских систем, выполняющих функции опытной и контрольной.

При высокой исходной биологической составляющей коррозионной агрессивности анализируемых жидких сред фоновую небиологическую составляющую общей коррозии определяют в присутствии бактерицида в контрольной электрохимической системе.

В отличие от прототипа предлагаемое техническое решение предполагает прямое амперометрическое определение интенсивности процессов коррозии в кинетическом режиме без использования внешнего источника тока — поляризующей ЭДС.

В настоящее время процессы коррозии вообще и биокоррозии, в частности, исследуются в рамках традиционного метода снятия поляризационных кривых — основного в классической вольтамперометрии. При этом жидкофазную составляющую электрохимической системы подвергают электролизу, в процессе которого баланс вещества и энергии оказывается нарушенным, и конечное состояние системы неэквивалентно начальному. Особенно это касается сложных многокомпонентных систем, содержащих неорганические и органические компоненты. В таких реальных системах оказывается принципиально осуществимо лишь стационарное состояние, характеризующее суммарным переносом заряда, регистрируемым в качестве результирующего тока. В случае преобладания процесса убыли массы металла алгебраический ток уже полностью характеризует процесс коррозии, и его регистрация в различных условиях позволяет дать непосредственную количественную оценку вклада биологической составляющей в общую коррозию, что и является решаемой задачей изобретения. Стабильность работы исследуемой коррозионной электрохимической системы обеспечивают опорой на общий электрод сравнения и параллельным подключением аналогичных электрохимических систем, энергетический баланс которых находят с использованием правил Кирхгофа для токов и ЭДС.

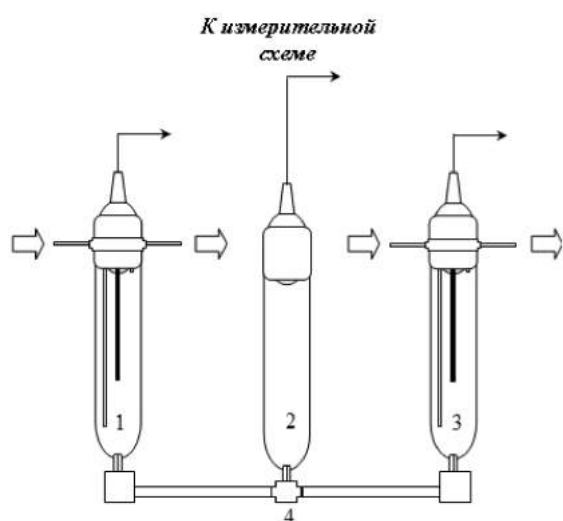
Для реализации метода берут образец жидкой исследуемой среды. Затем определяют интенсивность процесса фоновой небиологической составляющей общей кор-

розии с установлением стационарного значения силы тока небиологической составляющей коррозии  $I_0$ . Далее определяют интенсивность процесса общей коррозии с установлением стационарного значения силы тока общей коррозии  $I$ .

Биологическую составляющую коррозионной агрессивности жидкой среды рассчитывают по формуле (1).

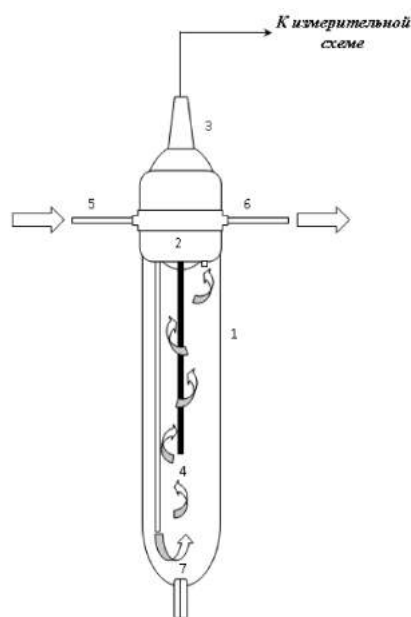
Осуществление метода предполагает использование проточной электрохимической системы, представленной на рисунке 1, состоящей из двух аналогичных ячеек: опытной и контрольной — электрода сравнения и электролитического ключа-тройника.

Вид отдельной ячейки приведен на рисунке 2. Следует также отметить, что известный вольтамперметрический способ снятия поляризационных кривых весьма сложно автоматизировать с целью получения зависимости тока от времени, поскольку требуется громоздкая система потенциостатирования либо использование электронного полярографа в режиме периодической вольтамперметрии. Кроме того, временное разрешение метода поляризационных кривых в ходе эксперимента ограничено, в связи с чем реально получают ряд дискретных значений токов коррозии, найденных в результате трудоемкого построения касательных к полученным поляризационным кривым.



1 — опытная ячейка; 2 — электрод сравнения; 3 — контрольная ячейка; 4 — электролитический ключ-тройник

**Рисунок 1.** Схема проточной системы для исследования коррозионной активности микроорганизмов методами электрохимии



1 — полиэтиленовый корпус; 2 — уплотнение из резинопластика; 3 — токосъемник с кабелем; 4 — рабочий электрод; 5 — входной патрубок; 6 — выходной патрубок; 7 — диафрагма

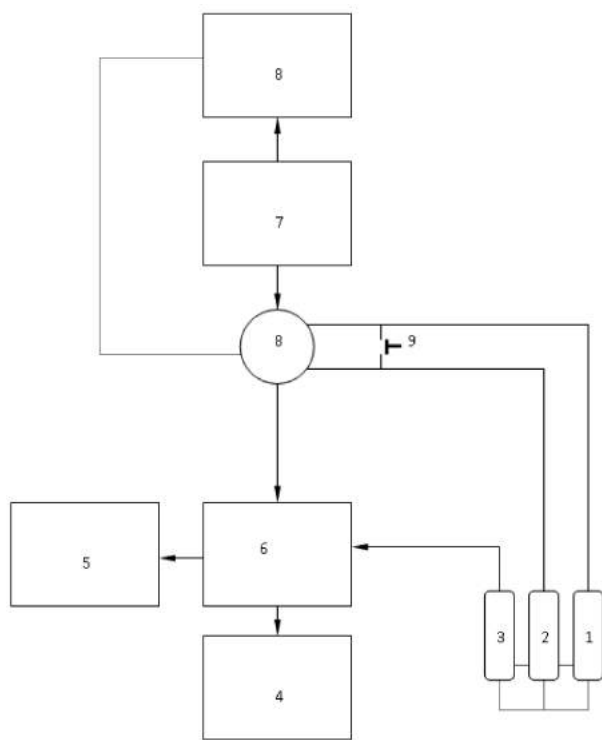
**Рисунок 2.** Проточная электрохимическая ячейка для исследования коррозионной активности микроорганизмов

В противоположность прототипу предлагаемый способ весьма просто автоматизировать с использованием доступного оборудования, что отражено на рисунке 3, где приведена блок-схема измерительной и управляющей цепей проточной электрохимической системы, используемой в реализации способа. При этом электрохимические системы: опытная и контрольная с электродом сравнения подключены к входу операционного усилителя, имеющего связь с высокочувствительным гальванометром-микроамперметром и самописцем.

Подключение электрохимических систем осуществляют через контакт реле времени, добавочный контакт которого управляет работой перистальтического насоса. Контакт предназначен для параллельного замыкания рабочих электродов электрохимических систем с использованием законов Кирхгофа.

В случае автоматизированного способа реализации предлагаемого метода использовали двухканальный вариант с применением двух одинаковых емкостей вместимостью 200 см<sup>3</sup> и ячеек вместимостью 10 см<sup>3</sup>. Поток через систему задавали многоканальным перистальтическим насосом (типа 304).





1, 2 — электрохимические ячейки; 3 — электрод сравнения; 4 — гальванометр (микроамперметр); 5 — самописец; 6 — операционный усилитель; 7 — перистальтический насос; 8 — реле времени (таймер); 9 — коммутирующий контакт

**Рисунок 3.** Блок-схема измерительной и управляющей цепей проточной электрохимической системы

Система термостатирована в суховоздушном термостате. Определение общей, фоновой и биологической составляющих проводили с использованием штыревых электродов из низкоуглеродистой стали 20 с внешним диаметром 2 мм и линейным размером 40 мм.

Измерение тока проводили высокопрецизионным микроамперметром (М2005 класса точности 0,2), связанным с транзисторным преобразователем прибора (Ф195) в режиме операционного усилителя. Регистрацию выходного сигнала осуществляли самопишущим потенциометром (типа КСП-4).

Рабочие электроды зачищали, обезжиривали, после чего осуществляли сборку электрохимических систем-ячеек, подключая их к проточной системе. Системы заполняли исследуемой жидкой средой с последующим удалением воздушных пузырей и герметизацией. Использовали стохастический режим изменения скорости подачи жидкости насосом с применением сблокированного с управляющей цепью электромеханического реле

времени (типа 2РВМ), программный компаратор которого ориентирован для выдачи случайных последовательностей интервалов времени.

В рабочем состоянии проточная система полностью герметизирована, используемые емкости и соединительные шланги выполнены из полиэтилена и не контактируют с механическими частями перекачивающего механизма насоса. Идентичность производительности каналов перекачки предварительно определяли путем калибровки.

Измерительную и управляющую цепи подключали к рабочим электродам и электроду сравнения, измеряя вручную в течение первого часа значение тока с интервалом 2 мин, одновременно регистрируя его величину самописцем. По достижении стационарных значений силы тока небологической составляющей систему переводили в автоматический режим, контроль которого осуществляла управляющая цепь. Результаты стационарных значений токов сравнивали, используя приведенную ранее формулу (1) и определяя биологическую составляющую коррозионной агрессивности в процентах [6–9].

#### *Примеры применения метода*

##### *1. Определение биологической составляющей коррозионной агрессивности речной воды*

В речных водах содержится сравнительно невысокое количество коррозионно-опасной микрофлоры, и ее начальная активность незначительна, в связи с чем токовый электрохимический отклик на присутствие коррозионного микробиологического фактора запаздывает, что позволяет выделить биологическую составляющую из общего коррозионного процесса без применения бактерицидов. Результаты реализации предлагаемого способа для речной воды, используемой в технологических цепях добычи нефти Мамонтовского месторождения ОАО «Юганскнефтегаз», и проведенный расчет показывают, что после развития коррозионного процесса вклад биологического фактора в общую коррозию составляет 77,8 %, что в 3,5 раза превышает значение фоновой корро-

зии, установившейся до развития биологической составляющей.

### *2. Определение биологической составляющей коррозионной агрессивности питательных сред и культуральных жидкостей*

Развитие ряда микроорганизмов в питательных средах приводит к значительному возрастанию коррозионной агрессивности образующихся культуральных жидкостей, что требует обоснованного подхода к выбору металлического оборудования для технологических процессов микробиологических производств. Традиционные способы контроля коррозионной агрессивности указанных жидкостей не учитывают влияния биологической составляющей на общую коррозионную агрессивность. Предлагаемый способ позволяет выделить биологическую составляющую коррозии на фоне коррозионной агрессивности культуральной жидкости, определяемой химическими компонентами исходной питательной среды и продуктами жизнедеятельности микроорганизмов, что особенно актуально с учетом непрерывного цикла многих микробиологических производств. Результаты реализации предлагаемого метода для синтетической питательной среды с глюкозой в качестве единственного источника углерода и энергии в процессе развития культуры микроорганизмов *Pseudomonas fluorescens* показывают его высокую эффективность. Начальная активность бактерий высока, в связи с чем для ее подавления в культуральную жидкость внесен высокоэффективный бактерицид — глутаральдегид. Из приведенных данных следует, что в результате влияния биологического фактора коррозионная агрессивность исходной питательной среды возрастает на 82,8 %, в то время как фильтрат, не содержащий клеток микроорганизмов, агрессивен лишь в 1,4 раза.

### *3. Определение биологической составляющей коррозионной агрессивности вод системы оборотного водоснабжения нефтехимических предприятий*

Воды системы оборотного водоснабжения при отсутствии обеззараживания содержат коррозионно-опасную микрофлору различающейся активности, зависящей от темпера-

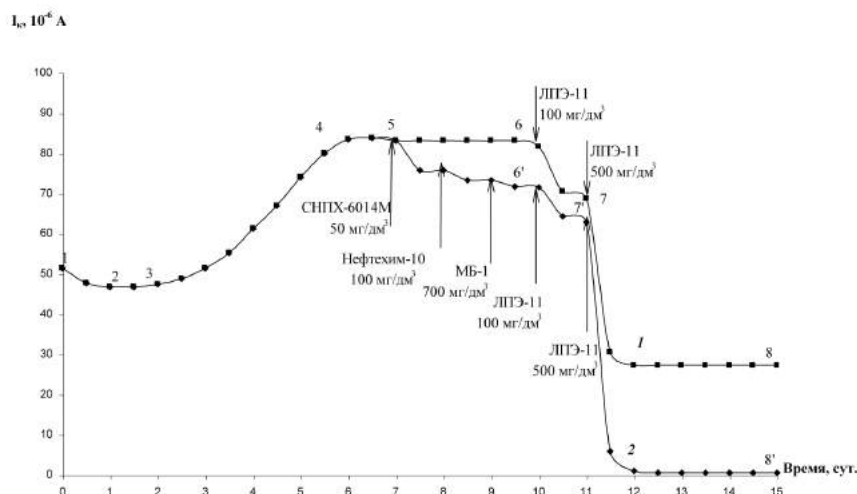
туры на данном участке технологической цепи. Предлагаемый способ позволяет выделить биологическую составляющую коррозии и определить вклад ее в коррозионную агрессивность оборотных вод при различных температурах. Результаты реализации предлагаемого способа для вод систем оборотного водоснабжения АО «Уфаоргсинтез» показывают независимость биологической составляющей коррозионной агрессивности от температуры в процессе длительного контакта металла с зараженными водами. Для всех изученных температур биологическая составляющая коррозионной агрессивности имеет около 70,8 %, различие состоит лишь во времени выхода коррозионного тока на максимум.

### *Экспериментальные результаты и их обсуждение*

Нефтепромысловые воды, различающиеся по химическому составу, общей коррозионной агрессивности и микробиологической зараженности, в ходе развития процессов коррозии при контакте с низкоуглеродистой сталью проявляют ряд общих закономерностей, что определяется вкладом микробиологической составляющей.

Ниже представлены токовые кинетические кривые, характеризующие разрушение металла для вод Удмуртского, Ноябрьского и Башкирского нефтеносных регионов. Кинетика изменения тока коррозии отображена на рисунке 4.

Начальные участки токовых кривых до внесения в проток реагентов практически совпадают. Кривые характеризуются снижением тока коррозии (участок 1), что объясняется вовлечением на данном этапе в процесс переноса заряда быстрореагирующих компонентов коррозионной среды. По мере снижения их содержания скорость токообразующих реакций тоже снижается. В течение примерно 1 сут кривые стабилизируются на значениях тока около  $50 \cdot 10^{-6}$  А, после чего сравнительно короткое время стационарны (участки 2–3). Стационарный уровень тока определяет фоновую составляющую коррозии, т.е. ее «абиогенную» (безмикробную фазу).



1 — с конечной дозировкой бактерицида ЛПЭ-11; 2 — с последовательной дозировкой реагентов СНИХ-6014М, Нефтехим-101, МВ-1, ЛПЭ-11

**Рисунок 4.** Изменение тока коррозии в проточной электрохимической системе с водой БКНС Гремихинского месторождения (Удмуртия)

Дальнейшее развитие коррозионного процесса характеризуется подключением биологической составляющей, под влиянием которой изменение тока коррозии определяется наличием двух участков полученной кинетической кривой. Отмечен резкий подъем тока (участки 3–4), сменяемый стабилизацией (участки 4–5) на высоких значениях. Таким образом, усиление тока зависит от активности микроорганизмов, на первых этапах эксперимента не участвующих в процессе из-за относительно малой концентрации в жидкой фазе системы.

По мере оседания микробов на металле ток коррозии нарастает. Максимальное значение тока связано с «насыщением» поверхности электрода адгезированными клетками

микроорганизмов. Реальный вклад биологической составляющей определяется конечным нарастанием тока в 1,6 раз по сравнению с фоновым значением.

### Выводы

Таким образом, предлагаемый способ действительно позволяет определить биологическую составляющую коррозионной агрессивности жидких сред амперометрически с высокой надежностью и достоверностью. Способ проще прототипа в техническом осуществлении, поддается автоматизации, эффективен и промышленно применим, т.к. при его реализации используются доступные оборудование и материалы.

### Список литературы

1. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. М.: Высш. шк., 1984. 519 с.
2. Лопатин Б.А. Теоретические основы электрохимических методов. М.: Высш. шк., 1975. 295 с.
3. Методика контроля микробиологической зараженности нефтепромысловых вод и оценка бактерицидного действия реагентов: РД 39-3-973-83 / ВНИИСПТнефть. 1984. 38 с.
4. Леонов В.В., Рагулин В.В., Денисова О.А. Микробная коррозия металлов. Уфа, 2015. Ч. 1. 70 с.
5. Леонов В.В., Рагулин В.В., Денисова О.А. Катодная защита металлов. Уфа, 2016. 71 с.
6. Леонов В.В., Рагулин В.В., Денисова О.А. Адсорбция и адгезия реагентов на твердой поверхности. Уфа, 2016. 68 с.
7. Леонов В.В., Денисова О.А. Электродинамика вязкого течения конденсированных сред // Научно-технические технологии. 2016. Т. 17. № 2. С. 37–46.
8. Леонов В.В., Денисова О.А. Электродинамика сдвигового действия и реализация режима турбулентности в конденса-

рованных средах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. № 2. С. 90–97.

9. Леонов В.В., Рагулин В.В., Денисова О.А. Электродинамика коррозионного массопереноса в конденсированных средах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. Т. 11. № 3. С. 105–112.

### References

1. Antropov L.I. Teoreticheskaya elektrokimiya. M.: Vyssh. shk., 1984. 519 s.

2. Lopatin B.A. Teoreticheskie osnovy elektrokhimicheskikh metodov. M.: Vyssh. shk., 1975. 295 s.

3. Metodika kontrolya mikrobiologicheskoy zarazhennosti neftepromyslovykh vod i otsenka bakteritsidnogo deystviya reagentov: RD 39-3-973-83 / VNIISPTneft. 1984. 38 s.

4. Leonov V.V., Ragulin V.V., Denisova O.A. Mikrobnaya korroziya metallov. Ufa, 2015. Ch. 1. 70 s.

5. Leonov V.V., Ragulin V.V., Denisova O.A. Katodnaya zashchita metallov. Ufa, 2016. 71 s.

6. Leonov V.V., Ragulin V.V., Denisova O.A. Adsorbtsiya i adgeziya reagentov na tverdoy poverkhnosti. Ufa, 2016. 68 s.

7. Leonov V.V., Denisova O.A. Elektrodinamika vyazkogo techeniya kondensirovannykh sred // Naukoemkie tekhnologii. 2016. Т. 17. № 2. S. 37–46.

8. Leonov V.V., Denisova O.A. Elektrodinamika sdvigovogo deystviya i realizatsiya rezhima turbulentnosti v kondensirovannykh sredakh // Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. 2015. № 2. S. 90–97.

9. Leonov V.V., Ragulin V.V., Denisova O.A. Elektrodinamika korroziionnogo massopere-nosa v kondensirovannykh sredakh // Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. 2015. Т. 11. № 3. S. 105–112.





**Доломатов М. Ю.**  
**Dolomatov M. Yu.**

кандидат технических наук, доктор химических наук, профессор кафедры «Технология нефти и газа», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика электронных процессов и наноматериалов», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



**Шамова Н. А.**  
**Shamova N. A.**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология нефти и газа», доцент кафедры «Газохимия и моделирование химико-технологических процессов», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



**Трапезникова Е. Ф.**  
**Trapeznikova E. F.**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Нефтехимия и химическая технология», доцент кафедры «Химическая кибернетика», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



**Ильина Е. Г.**  
**Ilyina E. G.**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Нефтехимия и химическая технология», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

УДК 530.1:536.7:539:3

## **ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ «СТРУКТУРА — СВОЙСТВО» ДЛЯ РАСЧЕТОВ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ «ЖИДКОСТЬ — ПАР»**

Исследование и моделирование физико-химических свойств углеводородных систем является сложной и актуальной задачей. А такие физико-химические свойства, как температура, давление и коэффициент сжимаемости в критической области фазовых переходов «жидкость — газ» не только актуальны, но и необходимы для проведения научных и инженерных расчетов в различных областях. В настоящее время известно большое количество способов расчета критических характеристик. Однако они не позволяют проводить точные вычисления для сложных молекулярных систем. Другими недостатками методов расчета

критических характеристик являются сложность расчета и ограничение точности в рядах изомеров веществ, масса которых одинакова.

Целью данной работы является разработка нелинейной двухпараметрической топологической модели типа «структура — свойство» для адекватного расчета критических параметров углеводородов в фазовых переходах первого рода «жидкость — газ».

В работе предлагается двухпараметрическая нелинейная топологическая модель «структура — свойство» (QSPR) для расчета критических свойств — давления, температуры и коэффициента сжимаемости в рядах нормальных и изоалканов в фазовых переходах первого рода «жидкость — газ». В основе модели уравнения связывающие относительные значения критических параметров с топологическими характеристиками молекулярных графов — индексов Винера и функции собственных значений топологической матрицы молекулы. Адекватность модели подтверждается статистической обработкой данных. Приведено сравнение справочных и расчетных значений параметров, погрешность расчётов по предложенному методу не превышает 1 %. Результаты могут быть использованы в научных и инженерных расчетах.

**Ключевые слова:** нормальные и изоалканы, критические свойства, температура, давление, коэффициент сжимаемости, индекс Винера, топологические параметры, собственные значения топологической матрицы, коэффициенты, модель.

## SEMI-EMPIRICAL MODEL «STRUCTURE — PROPERTY» PARAMETERS FOR CALCULATING CRITICAL PHASE TRANSITION «LIQUID — VAPOR»

Study and modeling of physic-chemical properties of the carbon-hydrogen systems is a complicated and important task. And these physic-chemical properties like temperature, pressure and compressibility in the critical region of phase transition «liquid — gas» is not only relevant but also necessary for scientific and engineering calculations in various fields. Currently, many methods of calculation of critical characteristics are known. However, they do not allow accurate calculations for complex molecular systems. Another disadvantage of the methods of calculation of the critical characteristics is the complexity of the calculation and limitation of accuracy in the ranks of the isomers of the substances whose mass is the same.

The aim of this work is to develop a nonlinear two-parameter topological models of type structure-property adequate for the calculation of critical parameters of hydrocarbon in the phase transitions of first order «liquid — gas».

The paper proposes a two-parameter non-linear topological model «structure — property» (QSPR) for the calculation of critical properties — pressure, temperature and compressibility factor in series of normal and isoalkanes in the phase transitions of first order «liquid — gas». The model equations relating the relative values of the critical parameters with topological characteristics of molecular graphs — indices of Wiener and functions of the eigenvalues of the topological matrix molecules. The model adequacy is confirmed by statistical data processing. The comparison of reference and calculated values of the parameters, the error of calculations by the proposed method does not exceed 1 %.

**Key words:** normal and isoalkanes, critical properties, temperature, pressure, Wiener index, topological parameters, the eigenvalues of the matrix topology, coefficients, model.

Оценка физико-химических свойств углеводородов, таких как давление, коэффициенты сжимаемости, температура и др., в критической области фазовых переходов первого рода «жидкость — газ» актуальна для решения инженерных и научных задач. Эти физические параметры необходимы для проведения научных и инженерных расчетов в химии и хими-

ческой технологии, нефтяной промышленности, энергетике. В настоящее время известно большое количество способов расчета критических характеристик (КХ). Существуют различные методы оценки КХ, основанные на методе инкрементов и теории скэйлинга [1, 2], которые не позволяют проводить точные вычисления для сложных молекулярных

систем. Известен метод расчета КХ углеводов [3] на основе зависимостей молярной массы и критических параметров [1]. В работе [4] показано, что связь молярной массы и КХ обусловлена энтропией вблизи критического состояния, которая определяется соотношением относительных молекулярных масс и фрактальной размерностью корреляционного объема веществ. Однако недостатками метода являются сложность расчета и ограничение точности в рядах изомеров веществ, масса которых одинакова. Кроме того, существует группа методов, использующих структурные топологические параметры молекул — модели QSPR (Quantitative Structure — Properties Relationship) [5, 6]. В основе этого подхода топологические индексы (ТИ) молекулярных графов (МГ) молекул, которые связываются с их термодинамическими свойствами, например со свободной энергией, теплотой, энтропией образования и др. Примером является корреляция физико-химических свойств с топологическими характеристиками молекул, в частности индексом Винера, который рассчитывается через матрицу инцидентности молекулярных графов [3]. Недостатком этого способа является невозможность его использования в рядах соединений с совпадающими индексами Винера, например, в изомерах.

Целью данной работы является разработка нелинейной двухпараметрической топологической модели типа QSPR для адекватного расчета критических параметров углеводов в фазовых переходах первого рода «жидкость — газ».

Для решения данной задачи в гомологических рядах молекул, близких по структуре, представим ФХС как функцию двух переменных, зависящих от топологической структуры МГ, отражающих внутреннюю энергию молекул (параметр  $\varepsilon$ ) и индекс, отражающий взаимное расположение атомов (индекс  $I$ ). Приведем термодинамическое обоснование модели.

Из первого и второго законов термодинамики [7] следует линейная система уравнений, связывающая работу ( $A$ ) и энтропию системы ( $S$ ):

$$dG = \pm A - TdS; \quad (1)$$

$$A = \pm \sum X_i dq_i, \quad (2)$$

где  $X_i$  — обобщенная сила;  $dq_i$  — соответствующая обобщенная координата; учитывая, что измерение любого физико-химические свойства систем требует затраты энергии. Если  $Z$  измеряется путем совершения работы внешних сил над системой с преодолением внутренних сил, имеем:

$$Z = X = \frac{\partial A_s}{\partial q}. \quad (3)$$

Тогда из (1) — (3) следует, что

$$\pm X_i dq_i = \pm \sum_{i \neq j}^n X_j dq_j + TdS. \quad (4)$$

При постоянстве всех свойств, кроме измеряемых, имеем:

$$\pm X_i dq_i = \pm X_j dq_j + TdS; \quad (5)$$

$$A_j = \pm X_j dq_j;$$

$$Z_i = \frac{\partial A_j}{\partial q_j} + T \frac{\partial S}{\partial q_i}.$$

Уравнение (5) показывает, что каждое свойство системы проявляется через работу внешних или внутренних сил (энергию молекулярных взаимодействий) и связано с изменением энтропии.

Для системы молекул, близких по структуре, представим свойства как функцию двух переменных, зависящих от внутренних потенциалов энергии взаимодействия атомов  $\varepsilon$  и структуры молекул  $I$ . Считая  $Z$  непрерывной функцией двух переменных, разложим ее в ряд Тейлора (Taylor) по степеням  $(\varepsilon - \varepsilon_0)$  и  $(I - I_0)$  и некоторого остаточного члена  $R$ :

$$Z(\varepsilon, I) = Z(\varepsilon_0, I_0) + \left[ \frac{\partial Z(\varepsilon_0, I_0)(\varepsilon - \varepsilon_0)}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial Z(\varepsilon_0, I_0)(I - I_0)}{\partial I} \right] + \frac{1}{2!} \left[ \frac{\partial^2 Z(\varepsilon_0, I_0)}{\partial I^2} (I - I_0)^2 + \frac{\partial^2 Z(\varepsilon_0, I_0)(\varepsilon - \varepsilon_0)}{\partial \varepsilon^2} + \frac{\partial Z(\varepsilon_0, I_0)(\varepsilon - \varepsilon_0)(I - I_0)}{\partial I \partial \varepsilon} \right] + R(\varepsilon_0, I_0). \quad (6)$$

Разложение (6) представляет собой квадратичную функцию двух переменных:

$$Z(\varepsilon, I) = A_0 + D(\varepsilon - \varepsilon_0) + E(I - I_0) + \frac{1}{2} [A(\varepsilon - \varepsilon_0)^2 + 2B(\varepsilon - \varepsilon_0)(I - I_0) + C(I - I_0)^2] + R(\varepsilon_0, I_0), \quad (7)$$

где  $A_0, D, E, A, B, C$  — коэффициенты, а  $R$  — остаточный член.

Полагая, что  $\varepsilon_0 = 0$  и  $I_0 = 0$ ,  $R_2 \rightarrow 0$ , перепишем формулу (7) в виде:

$$Z(\varepsilon, I) = a_0 + a_1 \varepsilon + a_2 I + a_3 \varepsilon^2 + a_4 \varepsilon I + a_5 I^2. \quad (8)$$

**Таблица 1.** Критические свойства n-алканов

Название	$P_{кр}$ , кгс/см <sup>2</sup>			$T_{кр}$ , К			$Z_{кр}$		
	табл.	расч.	отклонение	табл.	расч.	отклонение	табл.	расч.	отклонение
Метан	46,95	47,18	0,23	190,55	191,34	0,79	0,288	0,2875	0,0005
Этан	49,76	48,86	0,90	305,43	302,33	3,10	0,285	0,2869	0,0019
Пропан	43,33	44,42	1,09	369,82	373,52	3,70	0,281	0,2796	0,0014
Бутан	38,71	38,63	0,08	425,16	424,98	0,18	0,274	0,2716	0,0024
Пентан	34,35	33,85	0,50	469,65	467,94	1,71	0,262	0,266	0,004
Гексан	30,72	30,58	0,14	507,35	506,73	0,62	0,264	0,2631	0,0009
Гептан	27,90	28,17	0,27	540,15	541,22	1,07	0,263	0,2616	0,0014
Октан	25,35	25,68	0,33	568,76	569,84	1,08	0,259	0,2593	0,0003
Нонан	23,33	22,92	0,41	594,56	593,14	1,42	0,254	0,2545	0,0005
Декан	21,45	21,57	0,12	617,50	617,90	0,40	0,247	0,2468	0,0002

**Таблица 2.** Критические свойства изоалканов

Название	$P_{кр}$ , кгс/см <sup>2</sup>			$T_{кр}$ , К			$Z_{кр}$		
	табл.	расч.	отклонение	табл.	расч.	отклонение	табл.	расч.	отклонение
2-метилбутан	34,48	34,57	0,09	460,39	463,16	2,77	0,270	0,271	0,001
2-метилпентан	30,70	31,10	0,40	497,45	496,11	1,34	0,267	0,268	0,001
2,3-диметилбутан	31,88	31,50	0,38	499,93	496,44	3,49	0,269	0,269	0,00
2-метилгексан	27,88	28,22	0,34	530,31	529,63	0,68	0,261	0,264	0,003
2,2,3-триметилбутан	30,12	29,90	0,22	531,11	534,15	3,04	0,266	0,267	0,001
2-метилгептан	25,33	25,43	0,10	559,57	559,34	0,23	0,261	0,258	0,003
2,3-диметилгексан	26,80	26,82	0,02	563,42	563,22	0,20	0,263	0,259	0,003
2-метил-3-этилпентан	27,53	27,37	0,16	567,02	565,11	1,91	0,254	0,260	0,006
2,3,4-триметилпентан	27,83	27,75	0,08	566,34	566,53	0,19	0,267	0,261	0,006
2-метилоктан	23,35	22,90	0,45	586,60	585,33	1,27	0,254	0,250	0,004
3-этилгептан	24,49	23,99	0,50	590,40	587,11	3,29	0,250	0,250	0
2,3-диметилгептан	24,49	24,27	0,22	589,60	587,86	1,74	0,252	0,251	0,001
4-этилоктан	22,21	22,38	0,17	609,60	609,90	0,34	0,237	0,242	0,005

**Таблица 3.** Коэффициенты квадратичной функции (8) для расчета критических свойств n-алканов

ФХС	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$
$P_{кр}$	1,0049	0,2419	0,0343	0,00017	-0,008	-0,0646
$T_{кр}$	1,0041	0,2314	0,329	0,00014	-0,007	-0,073
$T_{кр}$	0,9982	0,0506	0,0015	0,00003	-0,002	-0,013

**Таблица 4.** Коэффициенты квадратичной функции (8) для расчета критических свойств изоалканов

ФХС	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$
$P_{кр}$	1,51342	0,00583	-0,1704	0,0000474	-0,00116	0,009876
$T_{кр}$	2,42738	0,01743	-0,1120	0,0000868	-0,00233	0,013951
$T_{кр}$	1,15926	0,00516	-0,0583	0,0000311	-0,00075	0,003972



Физический смысл коэффициентов  $a_1 - a_5$  в (8) заключается в характеристике возмущения свойств под влиянием структурных топологических факторов и энергии взаимодействия. Известно, что в простых моделях взаимодействия атомов типа Изинга или Хюккеля энергия молекул коррелирует с суммой собственных значений МГ.

В качестве исследования в данной работе выбраны углеводороды ряда  $C_nH_{2n+2}$  нормальные и изоалканы (моно-, ди-, три- и тетразамещенные метил- и этилизоалканы).

В качестве исследуемых свойств нами выбраны критические свойства этих углеводородов: критическая температура, давление и коэффициент сжимаемости. Для удобства коэффициенты находились для приведенных критических параметров. Под приведенными в данном случае мы понимаем свойства, отнесенные к соответствующему свойству метана:

$$Z_1 = \frac{T_{кр}}{T_{кр(CH_4)}}; \quad (9)$$

$$Z_2 = \frac{P_{кр}}{P_{кр(CH_4)}}; \quad (10)$$

$$Z_3 = \frac{Z_{кр}}{Z_{кр(CH_4)}}. \quad (11)$$

В таблицах 1 и 2 представлены данные по критическим параметрам  $n$ - и изоалканов.

Точность полученных моделей в QSPR подходе оценивалась с помощью статистических характеристик — коэффициента корреляции, коэффициента множественной корреляции и стандартной ошибки. В таблицах 3 и 4 представлены данные по коэффициентам

### Список литературы

1. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: справ. пособие: пер. с англ. / Под ред. Б.И. Соколова. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1982. 592 с.
2. Анисимов М.А., Рабинович В.А., Сычев В.А. Термодинамика критического состояния индивидуальных веществ. М.: Энергоатомиздат, 1990. 190 с.
3. Ахметов С.А., Гайсина А.Р. Моделирование и инженерные расчеты физико-химических свойств углеводород-

квадратичной функции (8). Среднее абсолютное отклонение расчета от эксперимента составляет для  $P_{кр}$  — 0,37, для  $T_{кр}$  — 4,77, для  $Z_{кр}$  — 0,004.

Для характеристики качества регрессионного уравнения был вычислен коэффициент множественной корреляции  $R \approx 0,97$ , указывающий на сильную связь предложенных топологических факторов со свойствами. Коэффициент корреляции  $R \approx 0,97 - 0,99$ . Для статистической достоверности посчитали кор-

реляционную поправку  $S_r = \frac{1-R^2}{\sqrt{n-1}}$  для  $n < 30$ . В нашем случае  $S_r = 0,01$  и  $\left| \frac{R}{S_r} \right| = \left| \frac{0,97}{0,01} \right| = 97 \geq 3$ , следовательно, связь нельзя считать случайной.

Регрессионное уравнение проходит через центр облака исходных точек. Следовательно, равенство (8) запишется в виде

$$Z(\varepsilon, I) = a_0 + a_1\varepsilon + a_2I + a_3\varepsilon^2 + a_4\varepsilon I + a_5I^2.$$

### Выводы

В результате работы предложены двухпараметрические квадратичные модели, устанавливающие связь между критическими параметрами фазового перехода «жидкость — газ» и топологическими особенностями молекул. Полученная закономерность подтверждается статистической обработкой данных в рядах производных нормальных и изоалканов.

Двумерную зависимость (8) можно использовать для предсказания параметров критического состояния сложных молекул углеводородов.

ных систем: учеб. пособие. СПб.: Недра, 2010. 128 с.

4. Урядов В.Г., Аристова Н.В., Офицеров Е.Н. Взаимосвязь чисел термодинамического подобия и топологических характеристик структуры органических молекул // Журнал физической химии. 2007. Т. 81. № 5. С. 801–805.

5. Станкевич М.И., Станкевич И.В., Зефиоров Н.С. Топологические индексы в органической химии // Успехи химии. 1988. Т. 57. № 3. С. 337–366.

6. Витюк Н.В. Расчет и прогнозирование критических параметров хлорсодержащих алканов на основе топологической модели // Физическая химия. 1992. Т. 66 (10). С. 2665–2670.

7. Базаров И.П. Термодинамика: учебник для вузов. М.: Высш. шк., 1991. 376 с.

### References

1. Rid R., Prausnitz Dzh., Shervud T. *Svoistva gazov i zhidkosti: sprav. posobie: per. s angl. / Pod red. B.I. Sokolova. 3-e izd., pererab. i dop.* L.: Khimiya, 1982. 592 s.

2. Anisimov M.A., Rabinovich V.A., Sychev V.A. *Termodinamika kriticheskogo sostoyaniya individual'nykh veshchestv.* M.: Energoatomizdat, 1990. 190 s.

3. Akhmetov S.A., Gaisina A.R. *Modelirovanie i inzhenernye raschety fiziko-*

*khimicheskikh svoystv uglevodorodnykh sistem: ucheb. posobie.* SPb.: Nedra, 2010. 128 s.

4. Uryadov V.G., Aristova N.V., Ofitserov E.N. *Vzaimosvyaz' chisel termodinamicheskogo podobiya i topologicheskikh kharakteristik struktury organicheskikh molekul // Zhurnal fizicheskoi khimii.* 2007. Т. 81. № 5. S. 801–805.

5. Stankevich M.I., Stankevich I.V., Zefirov N.S. *Topologicheskie indeksy v organicheskoi khimii // Uspekhi khimii.* 1988. Т. 57. № 3. S. 337–366.

6. Vityuk N.V. *Raschet i prognozirovaniye kriticheskikh parametrov khlorosoderzhashchikh alkanov na osnove topologicheskoi modeli // Fizicheskaya khimiya.* 1992. Т. 66 (10). S. 2665–2670.

7. Bazarov I.P. *Termodinamika: uchebnik dlya vuzov.* M.: Vyssh. shk., 1991. 376 s.

---

## ОБ АВТОРАХ

### **Аипов Рустам Сагитович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и электрооборудование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: aipovrs@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Ахметшарипова Карина Радиковна**

магистрант 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

### **Байназаров Валинур Галинурович**

аспирант кафедры «Электрические машины и электрооборудование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: baynazv@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Валишин Денис Евгеньевич**

старший преподаватель кафедры «Электрические машины и электрооборудование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: denis.w@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Виноградова Ирина Леонидовна**

д-р техн. наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: vil-4@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Гвоздев Владимир Ефимович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая кибернетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: kir-konst@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Горюшин Юрий Александрович**

главный эксперт Департамента инновационного развития, ПАО «ФСК ЕЭС», e-mail: i.a.lebedev@gmail.com, г. Москва, 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 кафедры «Управление и сервис в технических системах», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика электронных процессов и наноматериалов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: dolomatov@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

### **Жернаков Юрий Валерьевич**

заместитель директора ООО «НПП «ППТ», e-mail: i.a.lebedev@gmail.com, г. Снежинск, Российская Федерация

---

**Закирова Земфира Ахметовна**

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

**Ильина Елена Геннадьевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Нефтехимия и химическая технология», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

**Имильбаев Рамис Ринатович**

инженер ООО «УфаСистемаГаз», e-mail: foraspi@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Кириллов Константин Витальевич**

аспирант кафедры «Техническая кибернетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: kir-konst@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Ковтун Геннадий Николаевич**

первый заместитель генерального директора — главный инженер Филиала ПАО «ФСК ЕЭС» — МЭС Юга, e-mail: i.a.lebedev@gmail.com, e-mail: i.a.lebedev@gmail.com, г. Железноводск, Российская Федерация

**Кольцов Андрей Валерьевич,**

генеральный директор Филиала ПАО «ФСК ЕЭС» — Центр технического надзора, e-mail: i.a.lebedev@gmail.com, г. Москва, Российская Федерация

**Конесев Сергей Геннадьевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: KonesevSG@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Копылов Константин Николаевич**

технический директор АО «СУЭК», e-mail: s\_kubrin@mail.ru, г. Москва, Российская Федерация

**Костюкова Анастасия Петровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая кибернетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: kir-konst@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Кошкин Игорь Владимирович**

кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электроэнергетика и физика», Костанайский государственный университет им. А. Байтурсынова, e-mail: koshkin@mail.kz, г. Костанай, Республика Казахстан

**Кошкина Анастасия Игоревна**

студентка, Костанайский государственный университет им. А. Байтурсынова, e-mail: koshkin@mail.kz, г. Костанай, Республика Казахстан

**Крымский Виктор Григорьевич**

д-р техн. наук, профессор кафедры «Управление и сервис в технических системах», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: vikrymsky@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация



---

**Кубрин Сергей Сергеевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий Лабораторией геотехнологических рисков освоения недр, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр» Российской академии наук, e-mail: s\_kubrin@mail.ru, г. Москва, Российская Федерация

**Кушнир Алексей Сергеевич**

аспирант, Костанайский государственный университет им. А. Байтурсынова, e-mail: valkush@mail.ru, г. Костанай, Республика Казахстан

**Кушнир Валентина Геннадьевна**

доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Машины, тракторы и автомобили», Костанайский государственный университет им. А. Байтурсынова, e-mail: valkush@mail.ru, г. Костанай, Республика Казахстан

**Лебедев Иван Александрович**

кандидат технических наук, начальник отдела новых технологий филиала АО «НТЦ ФСК ЕЭС» — СибНИИЭ, e-mail: i.a.lebedev@gmail.com, г. Новосибирск, Российская Федерация

**Леонов Вадим Владимирович**

кандидат биологических наук, заведующий сектором электрохимических исследований лаборатории «Физико-химическая механика», Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт механики» Уфимского научного центра Российской академии наук, e-mail: denisovaolga@bk.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Линенко Андрей Владимирович**

доктор технических наук, профессор кафедры «Электрические машины и электрооборудование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: linenko-bsau@ya.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Макаров Константин Валерьевич**

магистрант 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

**Мухаметшин Аскар Камилевич**

магистрант 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

**Николаев Антон Владимирович**

аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: e-mail: paskalnew1@rambler.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Нгуен Данг Тао**

(Социалистическая Республика Вьетнам), аспирант, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», e-mail: ep.analytics@bk.ru, г. Москва, Российская Федерация

**Павлов Артём Иванович**

ведущий инженер отдела линий электропередачи Филиала АО «НТЦ ФСК ЕЭС» — СибНИИЭ, e-mail: pavlov@ntcsib.ru, г. Новосибирск, Российская Федерация

---

**Пентегов Игорь Владимирович**

доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела электротермии Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, e-mail: elmag@paton.kiev.ua, г. Киев, Украина

**Петрова Ирина Юрьевна**

доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы», Государственное автономное образовательное учреждение Астраханской области высшего образования «Астраханский государственный архитектурно-строительный университет», e-mail: cad@ausu.ru, г. Астрахань, Российская Федерация

**Репин Александр Иванович**

кандидат технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела линий электропередачи Филиала АО «НТЦ ФСК ЕЭС» — СибНИИЭ, e-mail: potapenko@ntcsib.ru, г. Новосибирск, Российская Федерация

**Решетняк Сергей Николаевич**

старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр» Российской академии наук, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», e-mail: reshetniak@inbox.ru, г. Москва, Российская Федерация

**Рымар Сергей Владимирович**

доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела электротермии Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, e-mail: cantata@voliacable.com, г. Киев, Украина

**Савотин Олег Александрович**

начальник отдела линий электропередачи филиала АО «НТЦ ФСК ЕЭС» — СибНИИЭ, e-mail: savotin@ntcsib.ru, г. Новосибирск, Российская Федерация

**Салихзянов Роман Михайлович**

главный специалист отдела линий электропередачи филиала АО «НТЦ ФСК ЕЭС» — СибНИИЭ, e-mail: i.a.lebedev@gmail.com, г. Новосибирск, Российская Федерация

**Сираев Шамил Флюрович**

ст. преподаватель кафедры «Электрические машины и электрооборудование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: shamilsiraev@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Суханов Павел Иванович**

начальник отдела аварийно-восстановительных работ на линиях электропередачи Департамента воздушных линий ПАО «ФСК ЕЭС», e-mail: potapenko@ntcsib.ru, г. Москва, Российская Федерация

**Трапезникова Елена Фанисовна**

кандидат технических наук, доцент кафедр «Нефтехимия и химическая технология» и «Газохимия и моделирование химико-технологических процессов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: natalyagus@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Туктаров Марат Фанисович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и электрооборудование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: Marat.TukZar@yandex.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

**Хазиева Регина Тагировна**

аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: khazievart@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Хасаншин Вадим Ренатович**

ассистент кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: vadim\_hasanshin@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Шамова Наталья Александровна**

кандидат технических наук, доцент кафедр «Технология нефти и газа» и «Газохимия и моделирование химико-технологических процессов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: natalyarus@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Юнусов Андрей Рифович**

кандидат технических наук, директор ООО «УфаСистемаГаз», e-mail: yunusov@molniya-ufa.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Яматова Рима Айратовна**

магистрант 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

---

## ABOUT THE AUTHORS

### **Ahmetsharipova Karina R.**

Master Student, Industrial Safety and Labor Protection Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: pbot@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Aipov Rustam S.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Electrical Machines and Equipment Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», e-mail: aipovrs@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Baynazarov Valinur G.**

Post-Graduate Student of Electrical Machines and Equipment Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», e-mail: baynazv@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Denisova Olga A.**

Dr. Tech. 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 of Chair «Petrochemical and Chemical Engineering», Head of the Laboratory «Electronics and Nanotechnology», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: dolomatov@gmail.com, 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», e-mail: pbot@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Goryushin Yuri A.**

Chief Expert of the Innovative Development Department PJSC «FGC UES», e-mail: i.a.lebedev@gmail.com, Moscow, Russian Federation

### **Gvozdev Vladimir E.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Technical Cybernetics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: kir-konst@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

### **Ilina Elena G.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor Chair of «Petrochemical and Chemical Engineering», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: natalyarus@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Imilbaev Ramis R.**

Engineer of LLC «UfaSistemaGaz», e-mail: foraspi@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

### **Khasanshin Vadim R.**

Assistant of Telecommunication Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: vadim\_hasanshin@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Khazieva Regina T.**

Post-graduate Student of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: khazievart@mail.ru, Ufa, Russian Federation



---

**Kirillov Konstantin V.**

post-graduate student of Technical Cybernetics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: kir-konst@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

**Koltsov Andrey V.**

General Director of the Branch of PJSC «FGC UES» — Technical Inspection Center, e-mail: i.a.lebedev@gmail.com, Moscow, Russian Federation

**Konesev Sergey G.**

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: KonesevSG@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

**Kopylov Konstantin N.**

Technical Director JSC «SUEK», e-mail: s\_kubrin@mail.ru, Moscow, Russian Federation

**Koshkin Igor V.**

Cand. Sci. Tech., Head of Electric Power and Physics Chair, Kostanay State University Named after A. Baitursynov, e-mail: koshkin@mail.kz, Kostanay, Republic of Kazakhstan

**Koshkina Anastasiya I.**

Student, Kostanay State University Named after A. Baitursynov, e-mail: koshkin@mail.kz, Kostanay, Republic of Kazakhstan

**Kostyukova Anastasia P.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Technical Cybernetics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: kir-konst@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

**Kovtun Gennady N.**

First Deputy General Director — Chief Engineer of the Branch of PJSC «FGC UES» — MES South, e-mail: i.a.lebedev@gmail.com, Moscow, Russian Federation

**Krymsky Viktor G.**

Dr. Sci. Tech., Professor of Management and Service in the Technical Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: vikrymsky@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Kubrin Sergey S.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Laboratory, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, e-mail: s\_kubrin@mail.ru, Moscow, Russian Federation

**Kushnir Valentina G.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Machinery, Tractors and Automobiles Chair, Kostanay State University Named after A. Baitursynov, e-mail: valkush@mail.ru, Kostanay, Republic of Kazakhstan

**Kushnir Aleksey S.**

Post-graduate Student, Kostanay State University Named after A. Baitursynov, e-mail: valkush@mail.ru, Kostanay, Republic of Kazakhstan

**Lebedev Ivan A.**

Cand. Sci. Tech., Head of the New Technologies of the Branch of JSC «STC UES FGC» — SibNIIIE, e-mail: i.a.lebedev@gmail.com, Novosibirsk, Russian Federation

**Leonov Vadim Vladimirovich**

Cand. Sci. Biology, Head of Sector of Electrochemical Researches of Physical and Chemical Mechanics Laboratory, Federal State Budgetary Institution of Science «Institute of Mechanics», Ufa Scientific Center, Russian Academy of Sciences, e-mail: denisovaolga@bk.ru, Ufa, Russian Federation

---

**Linenko Andrey V.**

Dr. Sci. Tech., Professor of Electrical Machines and Equipment Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», e-mail: [linenko-bsau@ya.ru](mailto:linenko-bsau@ya.ru), Ufa, Russian Federation

**Makarov Konstantin V.**

Master Student, Industrial Safety and Labor Protection Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: [pbot@mail.ru](mailto:pbot@mail.ru), Ufa, Russian Federation

**Muhametshin Askar K.**

Master Student, Industrial Safety and Labor Protection Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: [pbot@mail.ru](mailto:pbot@mail.ru), Ufa, Russian Federation

**Nguyen Dang Tao**

(Socialist Republic of Vietnam), Post-graduate Student, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Moscow Institute of Physics and Technology (State University)», e-mail: [ep.analytics@bk.ru](mailto:ep.analytics@bk.ru), Moscow, Russian Federation

**Nikolaev Anton V.**

Post-Graduate Student of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: [paskalnew1@rambler.ru](mailto:paskalnew1@rambler.ru), Ufa, Russian Federation

**Pavlov Artem I.**

Leading Engineer of Electric Power Lines Department of the Branch of JSC «STC UES FGC» — SibNIIIE, e-mail: [pavlov@ntcsib.ru](mailto:pavlov@ntcsib.ru), Novosibirsk, Russian Federation

**Pentegov Igor V.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Leading Researcher of Electroheat Department, the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: [elmag@paton.kiev.ua](mailto:elmag@paton.kiev.ua), Kiev, Ukraine

**Petrova Irina Y.**

Dr. Sci. Tech., Professor of Information Systems Chair, State Autonomous Educational Institution of Higher Education Astrakhan Region «State University of Architecture and Civil Engineering», e-mail: [cad@aucu.ru](mailto:cad@aucu.ru), Astrakhan, Russian Federation

**Repin Alexandr I.**

Cand. Sci. Tech., Professor, Leading Researcher of Department of Electric Power Lines of the Branch of JSC «STC UES FGC» — SibNIIIE, e-mail: [potapenko@ntcsib.ru](mailto:potapenko@ntcsib.ru), Novosibirsk, Russian Federation

**Reshetnyak Sergey N.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Energy and Energy Efficiency of Mining Industry Chair, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National University of Science and Technology «MISiS», e-mail: [reshetniak@inbox.ru](mailto:reshetniak@inbox.ru), Moscow, Russian Federation

**Rymar Sergey V.**

Dr. Sci. Tech., Senior Researcher, Leading Researcher of Electroheat Department, the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: [cantata@voliacable.com](mailto:cantata@voliacable.com), Kiev, Ukraine

**Salihzyanov Roman M.**

Chief Specialist of the Transmission Lines of the Branch of JSC «R&D FGC UES» — SibNIIIE, e-mail: [i.a.lebedev@gmail.com](mailto:i.a.lebedev@gmail.com), Novosibirsk, Russian Federation

---

**Savotin Oleg A.**

Head of Electric Power Lines Department of the Branch of JSC «STC UES FGC» — SibNIIIE, e-mail: savotin@ntcsib.ru, Novosibirsk, Russian Federation

**Shamova Natalya A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Chairs «Gas Chemistry and Chemical-Engineering Processes Modeling» and «Chemical Cybernetics», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: natalyarus@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Siraev Shamil F.**

Senior Lecturer of Electrical Machines and Equipment Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», e-mail: shamilsiraev@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

**Suhanov Pavel I.**

Head of Emergency Repair Works on Electric Power Lines Overhead Lines Department PJSC «FGC UES», e-mail: potapenko@ntcsib.ru, Moscow, Russian Federation

**Trapeznikova Elena F.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor Chair of «Petrochemical and Chemical Engineering» and «Chemical cybernetics», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: natalyarus@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Tuktarov Marat F.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electrical Machines and Equipment Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», e-mail: Marat.TukZar@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

**Valishin Denis E.**

Senior Lecturer of Electrical Machines and Equipment Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», e-mail: denis.w@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Vinogradova Irina L.**

Dr. Sci. Tech., Professor of Telecommunication Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: vil-4@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Zakirova Zemfira A.**

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», e-mail: pbot@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Zhernakov Yuri V.**

Deputy Director of OOO «NPP «POS», e-mail: i.a.lebedev@gmail.com, Snezhinsk, Russian Federation

**Yamatova Rima A.**

Master Student, Industrial Safety and Labor Protection Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: pbot@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Yunusov Andrey R.**

Cand. Sci. Tech., Director of LLC «UfaSistemaGaz», e-mail: yunusov@molniya-ufa.ru, Ufa, Russian Federation

## СПИСОК СТАТЕЙ, ИЗДАНЫХ В 2016 ГОДУ

*Абдрахманов В.Х., Важдает К.В., Салихов Р.Б.* Информационно-измерительная система дистанционного контроля параметров микроклимата, № 3, С. 91.

*Авдзейко В.И., Карнышев В.И., Мецераков Р.В.* Прогнозирование направлений развития силовой электроники на основе временных рядов по данным Международной патентной классификации, № 2, С. 23.

*Аипов Р.С., Валишин Д.Е.* Математическая модель линейного асинхронного привода плунжерного насоса с периодической коммутацией фазы источника трёхфазного напряжения, № 4, С. 13.

*Андреанов А.В., Зикий А.Н., Зламан П.Н.* Моделирование и экспериментальное исследование микрополоскового фильтра на полуволновых резонаторах, № 3, С. 32.

*Артюшенко В.М., Воловач В.И.* Определение вероятностей обнаружения движущихся объектов при постоянных и изменяющихся условиях обнаружения, № 3, С. 57.

*Вавилов В. Е., Бекузин В. И., Айгузина В. В.* Сравнение различных методов снижения влияния высших гармоник для магнитоэлектрического генератора, № 2, С. 11.

*Вавилов В.Е., Саяхов И.Ф.* Исследование магнитного поля реакции ротора асинхронного электродвигателя, № 1, С. 13.

*Важдает К.В., Абдрахманов В.Х., Салихов Р.Б.* Интеллектуальная система жилых зон на основе информационно-измерительных систем управления, № 2, С. 70.

*Воловач В.И., Анфалов К.В.* Оценка эффективности последовательного ввода в синхронизм составляющих последовательностей при передаче служебных данных, № 1, С. 75.

*Воронков Г.С., Кузнецов И.В.* Подход к концепции построения низкоскоростных OFDM-модемов для энергодефицитных систем связи, № 3, С. 44.

*Галиуллин Р.Р., Каримов И.И.* Эффективность использования светодиодных светильников в тепличных хозяйствах, № 1, С. 34.

*Гвоздев В.Е., Костюкова А.П., Кириллов К.В.* Статистическое оценивание показателей надежности систем обработки данных и управления по неполным сведениям о выборочных данных, № 4, С. 73.

*Дегтярев А.Р., Киселев С.К.* Отказоустойчивые реконфигурирующиеся комплексы интегрированной модульной авионики, № 1, С. 89.

*Денисов В.А., Третьякова М.Н., Бородин О.А.* Математическое моделирование асинхронных электроприводов с векторным управлением, № 1, С. 5.

*Диденко Е.Е., Мецераков В.Н.* Управление электроприводом петледержателя при входе полосы в межклетевой промежуток чистой группы стана горячей прокатки, № 3, С. 26.

*Доломатов М.Ю., Паймурзина Н.Х., Ковалева Э.А.* Полуэмпирическая оценка потенциалов ионизации молекул полициклических органических полупроводников, № 3, С. 100.

*Доломатов М.Ю., Шамова Н.А., Трапезникова Е.Ф., Ильина Е.Г.* Полуэмпирические модели «структура – свойство» для расчетов критических параметров фазовых переходов «жидкость – пар», № 4, С. 120.

*Зайнуллин А.Р.* Исследование статистики распределения перекрестных помех в многожильных волокнах, № 3, С. 64.

*Зикий А.Н., Зламан П.Н.* Многоканальный частотный дискриминатор трехсантиметрового диапазона, № 1, С. 107.

*Имильбаев Р.Р.* Анализ эффективности применения алгоритмов прогнозирования в процессе контроля состояния газораспределительной сети, № 1, С. 64.

*Имильбаев Р.Р., Крымский В.Г., Юнусов А.Р.* Использование интервальных временных рядов для прогнозирования состояния газораспределительной сети, № 4, С. 62.

*Карабельская И.В., Абызбаев И.И., Ахметов И.В.* Обобщенная формула Грина интегрального представления решения, № 2, С. 29.



- Карагодин В.В., Полянский К.А.* Задача оптимизации структуры системы бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей объектов Министерства обороны, № 1, С. 20.
- Козловский В.Н., Петровский С.В., Новикова А.П.* Электротехнический и информационно-диагностический комплекс оценки параметров функционирования автономного транспортного объекта, № 2, С. 5.
- Кольцов А.В., Ковтун Г.Н., Горюшин Ю.А., Жернаков Ю.В., Салихзянов Р.М., Лебедев И.А.* Новые решения в системах плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения 220 и 330 кВ, № 4, С. 21.
- Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Конев А.А.* Исследование режимов работы дросселя резонансной испытательной установки, № 3, С. 5.
- Конесев С.Г., Хазиева Р.Т.* Анализ динамики патентования индуктивно-емкостных преобразователей для систем стабилизации тока, № 4, С. 55.
- Копылов К.Н., Решетняк С.Н., Кубрин С.С.* Пути модернизации выемочного комбайна угольной шахты, № 4, С. 41.
- Куликов Г.Г., Антонов В.В., Фахруллина А.Р.* Логико-семантическая модель информационно-справочных систем в государственном управлении, № 1, С. 84.
- Кушнир В.Г., Кошкин И.В., Кошкина А.И., Кушнир А.С.* Имитационное моделирование системы «ветронасос – гидротурбина», № 4, С. 28.
- Кушнир В.Г., Кошкин И.В., Кошкина А.И., Кушнир А.С.* Обоснование автономности питания циркуляционного насоса системы горячего водоснабжения от солнечной станции, № 1, С. 28.
- Латыпов К.Ф., Долomatов М.Ю.* Полуэмпирическая оценка энергии потенциалов ионизации металлов по интегральным коэффициентам отражения электромагнитного излучения, № 2, С. 90.
- Леонов В.В., Денисова О.А.* Электрохимический метод исследования процессов микробной коррозии, № 4, С. 111.
- Линенко А.В., Туктаров М.Ф., Сираев Ш.Ф., Байназаров В.Г.* Нечеткий регулятор в системе управления линейным электроприводом зерноочистительной машины, № 4, С. 34.
- Матанцев А.Б., Ясовеев В.Х., Уразбахтина Ю.О.* Узлы и элементы электронной измерительной системы для дыхательной диагностики хеликобактериоза, № 1, С. 124.
- Мельничук О.В., Фетисов В.С.* Особенности заряда и разряда литиевых аккумуляторных батарей и современные технические средства управления этими процессами, № 2, С. 41.
- Мухамадиев А.А., Фаррахов Р.Г.* Калибровка акустооптического монохроматора с электронным управлением, № 2, С. 75.
- Мухамадиев А.А., Фаррахов Р.Г.* Сканирующий оптико-электронный преобразователь температуры, № 3, С. 75.
- Нгуен Данг Тао* Моделирование адаптивной системы синхронизированных по фазе приемопередаточных объектов, № 4, С. 79.
- Павлов С.В., Павлов А.С., Сайдуганов А.Р., Кунаккужина Н.Ф.* Информационно-вычислительная система построения графов инженерных сетей на основе картографической информации, № 2, С. 54.
- Павлова А.С.* Стандартизация технологических объектов многосвязного регулирования, № 2, С. 60.
- Пентегов И.В., Рымар С.В.* Применение метода тепловых источников при учете распределения источников тепла при индукционном нагреве, № 4, С. 5.
- Пентегов И.В., Рымар С.В.* Практическое применение метода тепловых источников при анализе тепловых процессов в электротехнических системах, № 3, С. 11.
- Петрова И.Ю., Ураксеев М.А., Николаев А.В.* Информационно-измерительная и управляющая система контроля стойкости режущего инструмента для станков с ЧПУ, № 3, С. 87.

*Петрова И.Ю., Ураксеев М.А., Николаев А.В.* Классификация погрешностей информационно-измерительной системы для бесконтактного контроля технического состояния зоны резания при механической обработке углеродсодержащих материалов, № 4, С. 105.

*Плёткин А.П.* Проблема защищенности процесса синхронизации от несанкционированного доступа в системе квантового распределения ключа, № 3, С. 50.

*Решетняк С.Н.* Перспективы применения пространственно-векторной модуляции в системе электроприводов пластинчатого питателя, № 2, С. 35.

*Родимов Н.В., Труднев С.Ю., Марченко А.А.* Диагностирование асинхронного электродвигателя для электроприводов теплового насоса и компрессорных установок методом спектрального анализа потребляемого тока с применением пакета SPECTRALAB, № 1, С. 39.

*Рыков В.И., Долomatов М.Ю., Мартынов В.В., Журавлёва Н.А., Закиева Е.Ш., Прошин Е.Н., Лысенко И.А., Вальдриева З.Р.* Информационная технология реализации компьютерной системы анализа и управления конфликтными социальными процессами на базе интеллектуальных моделей, № 1, С. 100.

*Сироткин С.Л., Коньков А.Н.* Повышение помехоустойчивости приема время-интервальных кодов, № 3, С. 70.

*Суханов П.И., Савотин О.А., Павлов А.И., Репин А.И.* Универсальная быстромонтируемая опора для проведения аварийно-восстановительных работ, № 4, С. 47.

*Тимофеев А.О., Ясовеев В.Х.* Анализ корреляции между скважинной динамограммой и энергией, потребляемой электродвигателем станка-качалки, № 2, С. 85.

*Ураксеев М.А., Левина Т.М., Бажанова Т.В.* Алгоритм работы цифрового устройства интегрирования в измерительном комплексе контроля электрического тока и магнитного поля, № 2, С. 80.

*Федосов А.В., Федосов В.А., Шаймухаметов Э.Ф.* Современные средства измерения, применяемые при проведении экспертизы промышленной безопасности технических устройств на опасных производственных объектах, № 1, С. 117.

*Федосов А.В., Закирова З.А., Ахметшарипова К.Р., Яматова Р.А., Мухаметшин А.К., Макаров К.В.* Анализ систем обеспечения промышленной безопасности опасных производственных объектов нефтегазовой отрасли, № 4, С. 87.

*Федосов А.В., Мизгирева В.В., Щербакова Э.Д., Янтирякова А.Р.* Особенности применения ультразвукового контроля для экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов, № 3, С. 81.

*Фетисов В.С., Мельничук О. В., Кудашов Д.Д., Сизоненко Р.В.* Имитационное моделирование состояния контактной системы на посадочной платформе для подзарядки воздушных роботов, № 1, С. 54.

*Хакимов Д.В. Киселев С.К.* Оптимизация структуры комплексов бортового оборудования летательных аппаратов на основе оптимизации функциональной структуры на ранних стадиях проектирования, № 2, С. 65.

*Хамидуллин И.Н., Ильин В.К.* К вопросу о надежности воздушных линий электропередачи 35-500 кВ, № 1, С. 45.

*Хасанишин В.Р., Виноградова И.Л.* Повышение эффективности управления сетями связи с применением chirпированных оптических импульсов, № 4, С. 96.

*Шабанов В.А., Юсупов Р.З., Алексеев В.Ю.* Устройство адаптивного автоматического включения резерва на нефтеперекачивающих станциях, № 2, С. 16.

*Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Юсупов Р.З.* Пути повышения эффективности блокировки защиты минимального напряжения от токовой защиты ввода, № 3, С. 18.

*Шапиро С.В., Саенко А.Г.* Теория озонатора с осесимметричными высоковольтными электродами, № 2, С. 49.

*Яруллин Р.Б., Мулюков А.Р.* Автоматический вибратор частотно-регулируемого асинхронного электропривода вибромашины с вертикальной осью вращения дебалансов, № 3, С. 36.

## LIST OF ARTICLES PUBLISHED IN 2016

*Abdrakhmanov V.Kh., Vazhdaev K.V., Salikhov R.B.* Information-measuring system of remote control of microclimate, № 3, p. 91.

*Aipov R.S., Valishin D.E.* Mathematical model of linear induction drive plunger pump with periodic switching phases of three-phase voltage source, № 4, p. 13.

*Andrianov A.V., Zikiy A.N., Zlaman P.N.* Modeling and experimental study of microstrip filter on half-wave resonators, № 3, p. 32.

*Artyushenko V.M., Volovach V.I.* Determination of probabilities of detection of objects moving at constant and varying conditions of detection, № 3, p. 57.

*Avdzejko V.I., Karnyshev V.I., Meshcheryakov R.V.* Forecasting of power electronics development directions based on International patent classification time series, № 2, p. 23.

*Degtyarev A.R., Kiselev S.K.* Fault-tolerant reconfigurable complexes of integrated modular avionics, № 1, p. 89.

*Denisov V.A., Tretyakova M.N., Borodin O.A.* Mathematical modelling of asynchronous electric drives with vector management, № 1, p. 5.

*Didenko E.E., Mecherykov V.N.* Control of the electric drive of looper at the strip entrance to the gap between two stand of finishing group of the hot rolling mill, № 3, p. 26.

*Dolomatov M.Yu., Paymurzina N.Kh., Kovaleva E.A.* Semi-empirical efficiency of polycyclic organic semiconductors molecules ionization potential, № 3, p. 100.

*Dolomatov M.Yu., Shamova N.A., Trapeznikova E.F., Ilina E.G.* Semi-empirical model «structure – property» parameters for calculating critical phase transition «liquid – vapor», № 4, p. 120.

*Fedosov A.V., Fedosov V.A., Shaimukhametov E.F.* The modern gages applied at expertise of industrial safety of technical devices on hazardous production facilities, № 1, p. 117.

*Fedosov A.V., Mizgireva V.V., Shcherbakova E.D., Yantiryakova A.R.* Features of application of ultrasonic testing for examination of industrial safety of hazardous production facilities, № 3, p. 81.

*Fedosov A.V., Zakirova Z.A., Ahmetsharipova K.R., Yamatova R.A., Muhametshin A.K., Makarov K.V.* Analysis systems of industrial safety of dangerous objects in oil and gas industry, № 4, p. 87.

*Fetisov V.S., Melnichuk O.V., Kudashov D.D., Sizonenko R.V.* Simulation modeling of contact system state for aerial robots charging platform, № 1, p. 54.

*Galiullin R.R., Karimov I.I.* Efficiency led lamps in greenhouses, № 1, p. 34.

*Gvozdev V.E., Kostyukova A.P., Kirillov K.V.* Statistical estimation of reliability indices of data processing and management systems based on incomplete information on sample data, № 4, p. 73.

*Imilbaev R.R.* Analysis of effectiveness of forecasting algorithms application to state control of gas distribution network, № 1, p. 64.

*Imilbaev R.R., Krymsky V.G., Yunusov A.R.* Application of interval time series to forecasting the state of gas distribution network, № 4, p. 62.

*Karabelskaya I.V., Abyzbaev I.I., Akhmetov I.V.* Generalized Green's formula integral representation for solution, № 2, p. 29.

*Karagodin V.V., Polyanskiy K.A.* The problem of the structure optimization of an uninterrupted power supply system of the responsible consumers of the objects of the department of defense, № 1, p. 20.

*Khakimov D.V., Kiselev S.K.* Structure optimization the onboard equipment of the aircraft based on the optimization of the functional structure early in the design, № 2, p. 65.

*Khamidullin I.N., Ilyin V.K.* The issue of reliability overhead power lines of 35-500 kV, № 1, p. 45.

*Khasanshin V.R., Vinogradova I.L.* Improving of efficiency of the communication networks management using chirped optical pulses, № 4, p. 96.

*Koltsov A.V., Kovtun G.N., Goryushin Y.A., Zhernakov Y.V., Salihzyanov R.M., Lebedev I.A.* New ice-melting solutions for 220 and 330 kV AC overhead transmission lines, № 4, p. 21.

*Konesev S.G., Khazieva R.T.* Analysis of patenting of inductive-capacitive transducers for current stabilization systems, № 4, p. 55.

- 
- Konesev S.G., Muhametshin A.V., Konev A.A.* Modelling modes inductor resonance test set, № 3, p. 5.
- Kopylov K.N., Reshetnyak S.N., Kubrin S.S.* Way of coal mining complex modernization, № 4, p. 41.
- Kozlovskiy V.N., Petrovskiy S.V., Novikova A.P.* Electrotechnical and information-diagnostic complex for evaluation of parameters of functioning of autonomous transport object, № 2, p. 5.
- Kulikov G.G., Antonov V.V., Fahrullina A.R.* Logical-semantic model information and reference systems in public administration, № 1, p. 84.
- Kushnir V.G., Koshkin I.V., Koshkina A.I., Kushnir A.S.* System simulation of «wind pump – water turbines» system, № 4, p. 28.
- Kushnir V.G., Koshkin I.V., Koshkina A.I., Kushnir A.S.* Justification independent power supply circulating pump DHW solar station, № 1, p. 28.
- Latypov K.F., Dolomatov M.Yu.* Semi-empirical assessment energy metals ionization potentials on integral coefficient of reflection of electromagnetic radiation, № 2, p. 90.
- Leonov V.V., Denisova O.A.* Electrochemical method of the microbial corrosion research, № 4, p. 111.
- Linenko A.V., Tuktarov M.F., Siraev Sh.F., Baynazarov V.G.* Fuzzy controller in the control system of linear inductor drive of grain cleaning machine, № 4, p. 34.
- Matantsev A.B., Yasoveev V. Kh., Urazbakhtina Y.O.* Nodes and elements of electronic measurement system for breath diagnosis of Helicobacter pylori infection, № 1, p. 124.
- Melnichuk O.V., Fetisov V.S.* Some features of charging and discharging of lithium rechargeable batteries and corresponding up-to-date technologies of control, № 2, p. 41.
- Mukhamadiev A.A., Farrakhov R.G.* Calibration of the acousto-optic monochromator with electronic control, № 2, p. 75.
- Mukhamadiev A.A., Farrakhov R.G.* Scanning temperature optical-to-electrical converter, № 3, p. 75.
- Nguyen Dang Tao* Simulation of an adaptive system is synchronized with the phase of the transmitting and receiving objects, № 4, p. 79.
- Pavlov S.V., Pavlov A.S., Sayduganov A.R., Kunakkuzhina N.F.* Information-computation system for engineering networks graph development using cartographic information, № 2, p. 54.
- Pavlova A.S.* Standardization of technological objects of the multicoupling regulation, № 2, p. 60.
- Pentegov I.V., Rymar S.V.* Application of the heat sources method with account for the heat sources' distribution in the case of induction heating, № 4, p. 5.
- Pentegov I.V., Rymar S.V.* Practical application of the heat sources method to the analysis of thermal processes in electrotechnical systems, № 3, p. 11.
- Petrova I.Y., Urakseev M.A., Nikolaev A.V.* Classification of errors the information-measuring system for noncontact inspection of the technical condition of the cutting zone when machining carbon-containing materials, № 4, p. 105.
- Petrova I.Yu., Urakseev M.A., Nikolaev A.V.* Information-measuring and operating system of control of stability of cutting tools for CNC machines, № 3, p. 87.
- Pljonkin A.P.* Protection problem of synchronization from unauthorised access in quantum key distribution system, № 3, p. 50.
- Reshetnyak S.N.* The prospects for application of space vector modulation in the motor drive system of the feeder plate, № 2, p. 35.
- Rodimov N.V., Trudnev S.Yu., Marchenko A.A.* Diagnosis asynchronous electric motors for electric heat pumps and compressor units by spectral analysis current consumption with application package SPECTRALAB, № 1, p. 39.
- Rykov V.I., Dolomatov M.Yu., Martynov V.V., Zhuravleva N.A., Zakieva E.Sh., Proshin E.N., Lysenko I.A., Valdrieva Z.R.* Implementation technology of analysis and management system of conflict social processes based on intelligent models, № 1, p. 100.



- 
- Shabanov V.A., Yusupov R.Z., Alekseev V.Yu.* Device for adaptive automatic to reserve source on oil pumping stations, № 2, p. 16.
- Shabanov V.A., Alekseev V.Yu., Yusupov R.Z.* Improving the efficiency of lock protection minimum voltage by overcurrent relay protection, № 3, p. 18.
- Shapiro S.V., Saenko A.G.* Theory ozonator with axially symmetrical high-voltage electrodes, № 2, p. 49.
- Sirotkin S.L., Konkov A.N.* The increase of immunity of receiving time-interval codes, № 3, p. 70.
- Suhanov P.I., Savotin O.A., Pavlov A.I., Repin A.I.* Emergency Restoration Kit for restoring faulty overhead transmission lines, № 4, p. 47.
- Timofeev A.O., Yasoveev V.Kh.* An analysis of the correlation between the downhole dynamometer card and the energy consumed by the motor of the pumping unit, № 2, p. 85.
- Urakseev M.A., Levina T.M., Bazhanova T.V.* Algorithm of the digital integrating device in the measuring system for control of the electric current and magnetic field, № 2, p. 80.
- Vavilov V.Ye., Bekuzin V.I., Aiguzina V.V.* Comparison of different methods reduce the impact of higher harmonics for magnetoelectric generator, № 2, p. 11.
- Vavilov V.E., Sayakhov I.F.* Study of magnetic field response rotor asynchronous motor, № 1, p.13.
- Vazhdaev K.V., Abdrakhmanov V.Kh., Salikhov R.B.* Intelligent system of living areas on the basis of information-measuring control systems, № 2, p. 70.
- Volovach V.I., Anfalov K.V.* Evaluation efficiency serial input in synchronism constituents sequence at service data transmission, № 1, p. 75.
- Voronkov G.S., Kuznetsov I.V.* Low-speed OFDM-modems for low power consuming telecommunication systems building concepts, № 3, p. 44.
- Yarullin R.B., Muljukov A.R.* Automatic vibrators for frequency-controlled asynchronous electric vibrators with vertical rotation axis of the unbalance, № 3, c. 36.
- Zainullin A.R.* Distribution statistics studing of crosstalk in multicore fibers, № 3, p. 64.
- Zikiy A.N., Zlaman P.N.* Three-sentimetre range multi-channel amplitude frequency discriminator, № 1, p. 107.

## **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.**