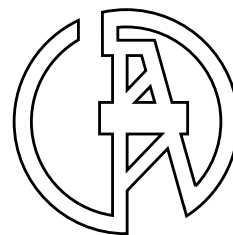


# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УГНТУ

№ 2, т. 15, 2019

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

## Учредитель

Федеральное государственное бюджетное 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:

### И.о. главного редактора:

Ш.З. Валиев — канд. техн. наук, д-р экон. 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)



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



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



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



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



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



В.Г. Крымский — д-р техн. 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. 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 «Башкирский государственный аграрный 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)



**Ответственный секретарь:** А.А. Мухамадиев

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

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

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

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

© Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2019.

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

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

Цена свободная. 12+

Подписано в печать 08.07.2019 г. Формат 60×84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 17.09.

Тираж 1000 экз. Заказ №

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.

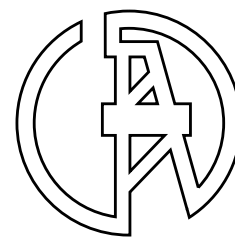
Материалы приводятся в авторской редакции.

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

№ 2, v. 15, 2019

The journal was founded in 2005. Issued 4 times a year.

## Founder

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University» (USPTU)

The journal is included in the «List of peer-reviewed scientific publications, which should be published basic scientific results of these 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:

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

### Deputy editor-in-chief:

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

### Members of an editorial board:

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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



**Assistant editor:** A.A. Mukhamadiev

**Technical editor:** S.V. Khalitova

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

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

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

© Ufa State Petroleum Technological University, 2019.

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

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

Price is free. **12+**

Publishing authorized on 08.07.2019. Paper format 60×84/8. Offset printing. 17.09 publication base sheets.

Volume 1000 copies. Order №

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

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

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

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

# СОДЕРЖАНИЕ

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Пентегов И.В., Рымар С.В., Губатюк Р.С.</i> Применение модернизированного метода тепловых источников Фурье в случае поперечного полосового поверхностного нагрева и охлаждения трубы	5
<i>Татевосян А.А.</i> Исследование влияния конструктивных параметров тихоходных синхронных генераторов с постоянными магнитами в составе электротехнических комплексов на их энергетические характеристики	15
<i>Васильев Б.Ю., Ле Ван Тунг</i> Косвенные системы модуляции матричных преобразователей частоты	26
<i>Поспелов А.С., Дмитриев А.А.</i> Повышение энергоэффективности системы электроснабжения загородного дома или коттеджа	34
<i>Шабанов В.А., Путинцева А.А., Резник Е.С., Васильев П.И.</i> Согласование токовой отсечки электродвигателей с защитой минимального напряжения и максимальной токовой защитой вводного выключателя	41
<i>Кубрин С.С., Решетняк С.Н., Бондаренко А.М.</i> Математическое моделирование параметров удельных норм электропотребления выемочных участков угольных шахт	50

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Попов А.А., Овсянкин А.К., Юринский Ю.А.</i> Проектирование экспертной системы в виде мобильного приложения для диагностирования неисправностей в работе вычислительной техники	57
<i>Шабанов Э.В., Гиниятуллин В.М.</i> Дифференциальная гиперболическая трилатерация	63
<i>Лихачев Е.А., Зайцева А.А., Клименко О.В.</i> Методика моделирования отказов САУ вертолета Ка-226	70
<i>Самаров Е.К.</i> Синтез алгоритма оптимальной линейной модуляции шума в цифровой обработке изображений	77
<i>Ахунова Д.А., Султанов А.Х., Мешков И.К., Грахова Е.П.</i> Повышения эффективности функционирования сверхширокополосных систем связи на основе технологии ортогонального частотного мультиплексирования	84
<i>Мурлин А.Г., Мурлина В.А., Янаева М.В., Кривоногов С.В.</i> Многокритериальная оптимизация логистических маршрутов сбора и вывоза твёрдых бытовых отходов	92

## МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

<i>Табет Наиф Кайед Абдулла, Фетисов В.С.</i> Термодинамический способ определения толщины отложений парафина на внутренней поверхности нефтепровода	105
<i>Долатчи С.М., Денисова О.А.</i> Автоматизированный информационно-измерительный комплекс для получения силоксановой поверхности полусферических резонаторов	113
<i>Артюшенко В.М., Воловач В.И.,</i> Оценка точности измерения векторного информационного параметра сигнала при воздействии мультипликативных негауссовских помех	122
<i>Сироткин С.Л., Коньков А.Н.</i> Автоматическое переключение диапазонов при измерении средней частоты импульсов	131
<b>Об авторах</b>	137

# CONTENT

## ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Pentegov I.V., Rymar S.V., Gubatyuk R.S.</i> Application of the modernized method of Fourier heat sources in the case of transverse strip surface heating and pipe cooling	5
<i>Tatevosyan A.A.</i> Investigation of the effect of constructive parameters of synchronous generators with permanent magnets as a part of electrical complexes on their energy characteristics	15
<i>Vasiliev B.Yu., Le Van Tung</i> Indirect modulation systems of matrix frequency converters	26
<i>Pospelov A.S., Dmitriev A.A.</i> Improving the energy efficiency of the power supply system of a country house or cottage	34
<i>Shabanov V.A., Putintseva A.A., Reznik E.S., Vasilyev P.I.</i> Coordination of electric motor cutoff with under-voltage protection and main circuit breaker's over current protection	41
<i>Kubrin S.S., Reshetnyak S.N., Bondarenko A.M.</i> Mathematical modelling of specific energy consumption norms of coal extraction sections of coalmines	50

## DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Popov A.A., Ovsyankin A.K., Yurinski Yu.A.</i> Designing the experts system as a mobile application for diagnostic troubleshooting in computing technology	57
<i>Shabanov E.V., Giniyatullin V.M.</i> Differential hyperbolic trilateral	63
<i>Likhachev E.A., Zaytseva A.A., Klimenko O.V.</i> Ka-226 helicopter self-propelled gun failure modeling technique	70
<i>Samarov E.K.</i> Synthesis of the algorithm for optimal linear noise modulation in digital image processing	77
<i>Akhunova D.A., Sultanov A.Kh., Meshkov I.K., Grakhova E.P.</i> Improving the efficiency of functioning of ultra-wide-band communication systems based on technology of orthogonal frequency multiplexing	84
<i>Murlin A.G., Murlina V.A., Yanayeva M.V., Krivonogov S.V.</i> Multicriteria optimization of logistic routes of collecting and export of municipal solid waste	92

## METROLOGY

### AND INFORMATION-MEASURING DEVICES

<i>Thabet Nayef Kayed Abdulla, Fetisov V.S.</i> Thermodynamic method of determination of thickness of paraffin sediments on oil pipeline inner surface	105
<i>Dolapchi S.M., Denisova O.A.</i> Automated information-measuring complex for obtaining a siloxane surface of a semispherical resonators	113
<i>Artyushenko V.M., Volovach V.I.</i> Estimation of measurement accuracy of the vector information signal parameter under influence multiplicative non-gaussian noise	122
<i>Sirotkin S.L., Konkov A.N.</i> Automatic rang switching when measuring the average frequency of the pulses	131
<b>About the authors</b>	137





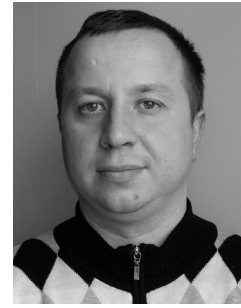
**Пентегов И.В.**  
**Pentegov I.V.**

*доктор технических наук,  
профессор, ведущий  
научный сотрудник отдела  
физики газового разряда и  
техники плазмы,  
Институт электросварки  
им. Е.О. Патона НАН  
Украины, г. Киев,  
Украина*



**Рымар С.В.**  
**Ryumar S.V.**

*доктор технических наук,  
старший научный сотруд-  
ник, заведующий лаборато-  
рией электротермии в  
составе отдела физико-  
металлургических процессов  
сварки и электротермии  
высокопрочных сталей,  
Институт электросварки  
им. Е.О. Патона НАН  
Украины, г. Киев,  
Украина*



**Губатюк Р.С.**  
**Gubatyuk R.S.**

*младший научный  
сотрудник лаборатории  
электротермии в составе  
отдела физико-металлурги-  
ческих процессов сварки и  
электротермии  
высокопрочных сталей,  
Институт электросварки  
им. Е.О. Патона НАН  
Украины, г. Киев,  
Украина*

УДК 536.12:621.78.01

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-2-5-14

## **ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО МЕТОДА ТЕПЛОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ФУРЬЕ В СЛУЧАЕ ПОПЕРЕЧНОГО ПОЛОСОВОГО ПОВЕРХНОСТНОГО НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ТРУБЫ**

**Цель.** Описание разработанной методики быстрого определения распределения тепловых полей в стенке трубы большого диаметра под поперечными полосовыми участками поверхностного нагрева и охлаждения с заданными вкладываемыми положительными или отрицательными удельными мощностями и применением модернизированного метода тепловых источников.

**Методология.** Методика основывается на научных положениях теоретической теплофизики – теории распространения тепла в сплошных средах для определения распределения тепловых полей в полупространстве и методе наложения тепловых полей.

**Результаты.** Методика позволяет гибко моделировать и быстро решать практические задачи по оценке распределения тепловых полей в стенке трубы большого диаметра под поперечными полосовыми участками поверхностного нагрева и охлаждения.

**Оригинальность.** Методика оперирует как с положительными источниками тепловой вкладываемой мощности для учета нагрева, так и с фиктивными отрицательными источниками тепловой мощности, имитирующими охлаждение.

**Практическая ценность.** Методика может применяться для быстрого расчета значений температур, а ее алгоритм – использоваться в автоматизированных технологических процессах для обеспечения необходимых режимов нагрева труб.

**Ключевые слова:** термообработка труб, тепловые расчеты, повышение скорости расчетов, распространение тепла, модернизированный метод тепловых источников, положитель-

ные источники тепловой мощности, отрицательные источники тепловой мощности.

## APPLICATION OF THE MODERNIZED METHOD OF FOURIER HEAT SOURCES IN THE CASE OF TRANSVERSE STRIP SURFACE HEATING AND PIPE COOLING

**Purpose.** Description of the developed method for rapid determining the distribution of thermal fields in the wall of a large-diameter pipe under transverse strip sections of surface heating and cooling with specified positive or negative specific power inputs and using the modernized method of heat sources.

**Methodology.** The method is based on the scientific concepts of theoretical thermal physics – the theory of distributed heat in continuous media to determine the allocation of thermal fields in a half-space and the method of applying thermal fields.

**Results.** The technique allows to flexibly model and quickly solve practical problems of estimating the distribution of thermal fields in the wall of a large-diameter pipe under the transverse strip sections of surface heating and cooling.

**Originality.** The technique operates with both positive sources of heat input to account for heating, and with fictitious negative sources of thermal power simulating cooling.

**Practical value.** The technique can be used to quickly calculate temperature values, and its algorithm is used in automated technological processes to provide the necessary modes of heating pipes.

**Key words:** heat treatment of pipes, heat calculations, increase in speed of calculations, heat distribution, modernized method of heat sources, positive sources of heat output, negative sources of heat output.

### Введение

Статья объясняет принцип практического применения модернизированного [1] метода тепловых источников Фурье [2, 3] при определении распределения температур в стенке трубы большого диаметра при поперечном полосовом поверхностном нагреве и охлаждении для нормализации металла сварного соединения и снятия остаточных напряжений в металле после сварки. Статья является продолжением работ [4, 6, 8], в которых области с источниками тепла приближенно заменены прямоугольниками, а пространственные интегралы заменены функциями интеграла вероятности «erf», через которые выражаются внутренние интегралы. Это позволяет перейти от операции интегрирования по поверхности к операции суммирования, а интегрирование осуществляется только по времени. При этом скорость расчета температур при поверхностном нагреве многократно увеличивается, по сравнению с традиционными методами расчетов, при

сохранении приемлемой для практических задач точности расчета.

*Целью и задачей* статьи является описание разработанной в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины методики быстрого определения распределения тепловых полей в стенке трубы большого диаметра под поперечными полосовыми участками поверхностных нагревов и охлаждений с заданными вкладываемыми положительными или отрицательными удельными мощностями и применением модернизированного метода тепловых источников.

Задача *актуальна* в электротермии при определении распространения тепла в стенке трубы большого диаметра при узком полосовом поверхностном нагреве поперечных сварных соединений труб большого диаметра кольцевым индуктором [9] с током весьма высокой частоты или резистивными контактными нагревательными элементами, когда имеется только поверхностное вложение тепла. Нагрев сварных соединений необходим для нормализации металла шва и около-

шовной зоны для снятия остаточных напряжений в металле и восстановления в нем пластических свойств. Особенно это важно для сталей, применяемых в магистральных трубопроводах высокого давления.

Подобный процесс поверхностного нагрева труб большого диаметра, но широким индуктором, осуществляется также при гибке труб [9-11] при прохождении трубопроводом рельефной поверхности.

Методика расчета оперирует постоянным значением вкладываемой удельной мощности на интервале нагрева до заданной температуры, что на практике обеспечивается системой регулирования источника питания.

Обычно при достижении заданного уровня температуры на поверхности трубы мощность снижается таким образом, чтобы поддерживать данную температуру постоянной на протяжении некоторого времени, пока температура на внутренней стенке трубы также не достигнет необходимого значения. С этого момента начинается отсчет времени выдержки нагрева для обеспечения необходимых структурных превращений металла. Далее происходит отключение источника нагрева и, в зависимости от технологии, труба остывает естественным образом после ее гибки в горячем состоянии, или поверхность трубы интенсивно охлаждают сжатым воздухом при выполнении процесса нормализации металла. Нагрев, выдержка и охлаждение сварного соединения может осуществляться и повторяющимися циклами.

При выполнении процесса нормализации металла поперечных сварных соединений поверхность металла трубы вблизи антикоррозионного защитного синтетического покрытия, отстоящего от сварных швов на некотором расстоянии, необходимо интенсивно охлаждать для предотвращения его перегрева. Методика позволяет учесть охлаждение поперечных участков трубы введением в расчетную модель фиктивных отрицательных источников тепла.

Разработанная методика может применяться для быстрого расчета значений температур, а ее алгоритм – использоваться в автоматизированных технологических процессах для обеспечения необходимых режимов нагрева труб.

Созданные методы и методики применяются в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины при разработке электротехнических систем вторичного нагрева сварных изделий.

#### Методика расчета

В работе [1] выведены формулы для определения распространения тепла в неограниченных и ограниченных пространствах и полупространствах при различных геометриях источников нагрева. Преобразуем данные формулы для рассматриваемого случая поперечного нагрева стальной трубы большого диаметра.

Пусть труба имеет внешний диаметр  $d$  и толщину стенки  $\Delta$ . Поверхностный нагрев трубы осуществляется с внешней стороны трубы по ее периметру, с шириной источника поверхностного нагрева по длине отрезка  $[X1, X2] = [-50 \text{ мм}, 50 \text{ мм}]$  и вкладываемой поверхностной удельной мощностью  $p_s$ , Вт/м<sup>2</sup>, изменяемой во времени.

Введем ряд допущений. Используем средние значения теплофизических параметров за время нагрева. Средние значения коэффициентов теплопроводности  $\lambda$  и температуропроводности  $a$  на интервале нагрева от начальной температуры  $T_0$  до наибольшей температуры  $T_1$  определяются из выражений:

$$\lambda = \frac{1}{T_1 - T_0} \cdot \int_{T_0}^{T_1} \lambda_{st}(T) dT,$$

$$a = \frac{1}{T_1 - T_0} \cdot \int_{T_0}^{T_1} a_{st}(T) dT. \quad (1)$$

Здесь

$$a_{st}(T) = \lambda_{st}(T) / [c_{st}(T) \cdot \gamma]; \lambda_{st}, a_{st} \text{ и } c_{st}$$

– зависимые от температуры  $T$  опытные значения теплопроводности, Вт/(м·К), температуропроводности, м<sup>2</sup>/с, и удельной теплоемкости стали, Дж/(кг·К);  $\gamma$  – плотность стали, кг/м<sup>3</sup>.

Пренебрежем потерями на конвекцию и излучение с поверхности трубы. Мысленно разрежем трубу по образующей (вдоль оси  $x$ ) и распрямим ее. Устремим  $Z$  к бесконечности, что эквивалентно введению бесконечного количества зеркальных отражений по

оси  $z$  для запираания поперечных тепловых потоков, что допустимо при  $d \gg \Delta$ . В этом случае задача может быть сведена к нагреву неограниченной по оси  $z$  пластины с бесконечно длинным участком  $Z$  вкладываемой поверхностной мощности и для расчета температуры может быть использована формула (36) работы [1], в которой учтено, что  $Z \rightarrow \infty$ .

После преобразований запишем эту формулу (36) по определению распределения приращения температур по координатам  $x$  и  $y$  в виде:

$$\Theta(x, y, X_1, X_2, t) = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda} \cdot \int_0^t \frac{p_s(\tau)}{t - \tau} \cdot \sum_{\varepsilon=-L}^L e^{-\frac{(y-2\Delta \cdot \varepsilon)^2}{4a \cdot (t-\tau)}} \cdot \int_{X_1}^{X_2} e^{-\frac{(x_0-x)^2}{4a \cdot (t-\tau)}} dx_0 d\tau, \quad (2)$$

где  $t$  – текущее время, отсчитываемое от начала процесса нагрева;  $\tau$  – время возникновения момента текущего импульса энергии, отсчитываемое от начала процесса нагрева;  $(t - \tau)$  – время распространения тепла от текущего импульса энергии;  $L$  – количество зеркальных отражений вверх и вниз по оси  $y$ , отстоящих друг от друга на расстоянии  $2\Delta$  [12] для выполнения по методу Сирла непроводящих тепло граничных условий. На практике достаточно учесть 5...8 отражений  $L$ ;  $x_0$  – координата по оси  $x$  элементарного точечного источника тепла.

Преобразуем второй интеграл в выражении (2):

$$\int_{X_1}^{X_2} e^{-\frac{(x_0-x)^2}{4a \cdot (t-\tau)}} dx_0 = \sqrt{\pi \cdot a \cdot (t-\tau)} \times \left\{ \operatorname{erf} \left[ \frac{x - X_1}{2\sqrt{a \cdot (t-\tau)}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{x - X_2}{2\sqrt{a \cdot (t-\tau)}} \right] \right\}. \quad (3)$$

Выражение (2) в этом случае примет вид:

$$\Theta(x, y, X_1, X_2, t) = \frac{1}{2\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi}} \cdot \int_0^t \frac{p_s(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} \cdot \sum_{\varepsilon=-L}^L e^{-\frac{(y-2\Delta \cdot \varepsilon)^2}{4a \cdot (t-\tau)}} \times \operatorname{Erf}(x, X_1, X_2, a, t, \tau) d\tau. \quad (4)$$

Здесь функция (см. формулу (21) работы [1])

$$\operatorname{Erf}(x, X_1, X_2, a, t, \tau) = \operatorname{erf} \left[ \frac{x - X_1}{2\sqrt{a \cdot (t-\tau)}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{x - X_2}{2\sqrt{a \cdot (t-\tau)}} \right]. \quad (5)$$

Истинная температура будет равна:

$$T(x, y, X_1, X_2, t) = \Theta(x, y, X_1, X_2, t) + T_0. \quad (6)$$

При этом функция (6), с учетом выражения (4), тождественна формуле (36) работы [1].

В случае *постоянной* (не изменяемой во времени  $t$ ) вкладываемой мощности  $p_s = p'_s$  выражения (4) и (6) примут вид:

$$\Theta'(x, y, X_1, X_2, p'_s, t) = \frac{p'_s}{2\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi}} \cdot \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \cdot \sum_{\varepsilon=-L}^L e^{-\frac{(y-2\Delta \cdot \varepsilon)^2}{4a \cdot (t-\tau)}} \times \operatorname{Erf}(x, X_1, X_2, a, t, \tau) d\tau; \quad (7)$$

$$T(x, y, X_1, X_2, p'_s, t) = \Theta'(x, y, X_1, X_2, p'_s, t) + T_0. \quad (8)$$

Формула (8) дает возможность решить и обратную задачу – определить значение постоянной вкладываемой мощности  $p'_s$  для нагрева изделия от температуры  $T_0$  до температуры  $T_1$  в точке с координатами  $x$  и  $y$  за время  $t$  при ширине поверхностного нагрева по длине отрезка  $[X_1, X_2]$ . Для этого из выражения (7) выразим  $p'_s$  для случая, когда  $\Theta' = T_1 - T_0$ :

$$p'_s(x, y, X_1, X_2, t) = (T_1 - T_0) / F(x, y, X_1, X_2, t), \quad (9)$$

где функция  $F$  определяется с учетом выражения (7) по формуле:

$$F(x, y, X_1, X_2, t) = \frac{1}{2\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi}} \cdot \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \cdot \sum_{\varepsilon=-L}^L e^{-\frac{(y-2\Delta \cdot \varepsilon)^2}{4a \cdot (t-\tau)}} \times \operatorname{Erf}(x, X_1, X_2, a, t, \tau) d\tau, \quad (10)$$

Нахождение  $p'_s$  сокращает время на поиск значения постоянной вкладываемой мощности в формуле (8) при нагреве изделия от температуры  $T_0$  до заданной температуры  $T_1$  в точке с координатами  $x$  и  $y$  за время  $t$ .

При термической обработке поперечных сварных швов труб большого диаметра для нормализации металла шва и околошовной зоны необходимо предотвратить перегрев защитного покрытия труб. Обычно покрытие выполняется из полиэтилена, не допускаю-



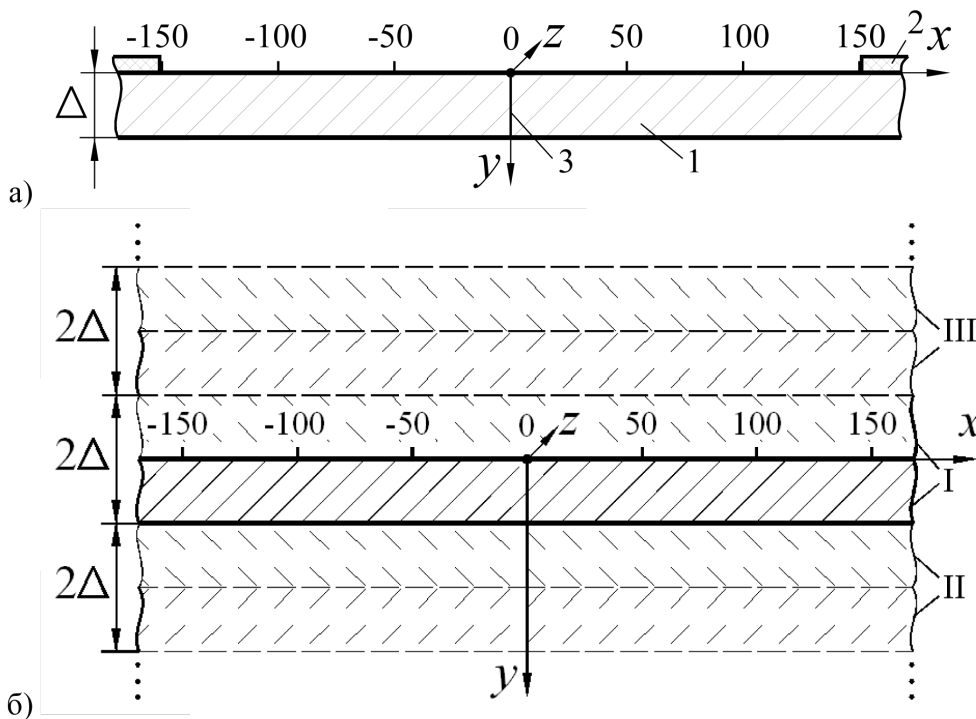
щего его нагрев выше 100 °С. Защитное покрытие отстоит от поперечного сварного шва трубы (торца трубы) на расстояние около 150 мм. Для предотвращения его перегрева поверхность металла трубы вблизи от защитного покрытия необходимо охлаждать, например, потоками воды или сжатого воздуха.

Модернизированный метод тепловых источников Фурье позволяет производить расчет распространения тепловых полей при наличии участков, как нагрева, так и охлаждения. Для учета участков охлаждения в расчетную модель необходимо ввести фиктивные отрицательные источники тепловой мощности. В этом случае поверхностная удельная мощность  $p_s$  в уравнении (2) будет иметь отрицательный знак, то есть обеспечивать сток тепла с поверхности охлаждения. Мощность, обеспечивающая сток тепла,

является расчетной величиной, позволяющей определить распределение температурного поля при наличии участков охлаждения.

**Пример расчета**

Стальная труба имеет внешний диаметр  $d = 1420$  мм, толщину стенки  $\Delta = 27$  мм, что соответствует условию  $d \gg \Delta$ . Поверхностный нагрев осуществляется с внешней стороны трубы по ее периметру с шириной нагрева 100 мм:  $X_1 = -50$  мм,  $X_2 = 50$  мм. На рисунке 1, а показан участок стенки трубы 1, распрямленной по образующей – вдоль оси  $z$ , направленной перпендикулярно вглубь рисунка, с защитным покрытием 2 и поперечным сварным швом 3. На рисунке 1, б показаны три зеркальных отражения I, II и III этого участка вверх и вниз по оси  $y$ , отстоящие друг от друга на расстояние  $2\Delta$ .



**Рисунок 1.** Участок стенки трубы 1 распрямленной по образующей (вдоль оси  $z$ ) с защитным антикоррозионным синтетическим покрытием 2 и сварным швом 3 (а), и три его зеркальных отображения I, II и III (б)

Необходимо нагреть сварное соединение трубы для нормализации металла шва и околошовной зоны с начальной температуры 20 °С до температуры не выше 1050 °С на внешней поверхности (верхняя поверхность на рисунке 1) нагреваемого участка за 5 мин и произвести выдержку при температуре не ниже 950 °С на внутренней поверхности

(нижняя поверхность на рисунке 1) нагреваемого участка (по центру шва) в течение 7,0...7,5 мин. Далее необходимо интенсивно охладить нагретый участок трубы до температуры 500 °С на ее внешней поверхности со скоростью не менее 5 °С/с и не более 15 °С/с, после чего скорость охлаждения можно снизить менее чем 5 °С/с.



Для предотвращения повреждения защитного покрытия трубы нужно, чтобы температура на внешней поверхности трубы на расстоянии 150 мм влево и вправо от сварного шва не превышала 100 °С в течение всего процесса термообработки.

Применяя выражение (9), определим значение постоянной вкладываемой удельной мощности  $p'_s$  для нагрева внешней поверхности трубы от температуры  $T_0 = 20$  °С до температуры  $T_1 = 1050$  °С в точке с координатами  $x = 0$  мм и  $y = 0$  мм за время  $t = 5$  мин:  $p'_s(0$  мм, 0 мм, -50 мм, 50 мм, 5 мин). Удельная мощность оказывается равной  $p'_s = 537$  кВт/м<sup>2</sup>, или, умножив ее на площадь поверхностного нагрева  $100$  мм  $\cdot$   $\pi$   $\cdot$   $1420$  мм =  $0,446$  м<sup>2</sup>, получаем вкладываемую мощность 240 кВт.

В расчете количество зеркальных отражений  $L$  ограничим пятью.

Используя формулы (4) и (7), запишем выражение для определения распределения тепловых полей за время  $t$  при наличии участка нагрева и охлаждения [-50 мм, 50 мм] и двух пар участков охлаждения [-150 мм, -100 мм], [100 мм, 150 мм] и [-100 мм, -50 мм], [50 мм, 100 мм]:

$$T(x, y, t) = \Theta(x, y, -50 \text{ мм}, 50 \text{ мм}, t) + \Theta(x, y, -150 \text{ мм}, -100 \text{ мм}, t) + \Theta(x, y, 100 \text{ мм}, 150 \text{ мм}, t) + \Theta(x, y, -100 \text{ мм}, -50 \text{ мм}, t) + \Theta(x, y, 50 \text{ мм}, 100 \text{ мм}, t) + T_0. \quad (11)$$

В первом члене выражения (11) (по сути, в формуле (4)) для обеспечения заданного нагрева, выдержки и охлаждения вкладываемая и отводимая удельная мощность, изменяемая с течением времени  $t$ , равна:

$$p_s(t) = p'_s \cdot \begin{cases} 1,000 \text{ if } t \leq t_1; \\ 0,742 \text{ if } t_1 < t \leq t_2; \\ 0,576 \text{ if } t_2 < t \leq t_3; \\ 0,486 \text{ if } t_3 < t \leq t_4; \\ 0,440 \text{ if } t_4 < t \leq t_5; \\ 0,412 \text{ if } t_5 < t \leq t_6; \\ 0,398 \text{ if } t_6 < t \leq t_7; \\ 0,388 \text{ if } t_7 < t \leq t_8; \\ 0,383 \text{ if } t_8 < t \leq t_9; \\ 0,378 \text{ if } t_9 < t \leq t_{10}; \\ -0,950 \text{ if } t_{10} < t \leq t_{11}; \\ -0,285 \text{ if } t_{11} < t \leq t_{13}; \\ 0,000 \text{ if } t > t_{13}, \end{cases} \quad (12)$$

в первой паре охлаждаемых участков, то есть во втором и третьем членах, отводимая мощность:

$$p_{s,1}(t) = p'_s \cdot \begin{cases} 0,000 \text{ if } t \leq t_3; \\ -0,285 \text{ if } t_3 < t \leq t_{12}; \\ 0,000 \text{ if } t > t_{12}, \end{cases} \quad (13)$$

отводимая мощность во второй паре участков – в четвертом и пятом членах:

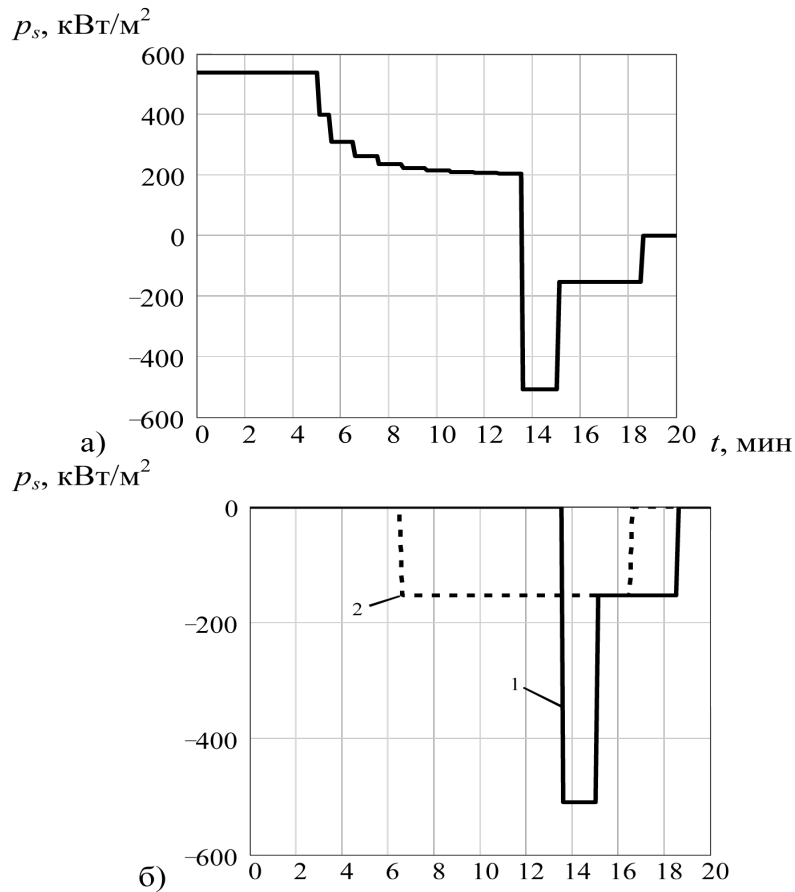
$$p_{s,2}(t) = p'_s \cdot \begin{cases} 0,000 \text{ if } t \leq t_{10}; \\ -0,950 \text{ if } t_{10} < t \leq t_{11}; \\ -0,285 \text{ if } t_{11} < t \leq t_{13}; \\ 0,000 \text{ if } t > t_{13}. \end{cases} \quad (14)$$

Здесь время  $t_1 = 5,0$  мин;  $t_2 = 5,5$  мин;  $t_3 = 6,5$  мин;  $t_4 = 7,5$  мин;  $t_5 = 8,5$  мин;  $t_6 = 9,5$  мин;  $t_7 = 10,5$  мин;  $t_8 = 11,5$  мин;  $t_9 = 12,5$  мин;  $t_{10} = 13,5$  мин;  $t_{11} = 15,0$  мин;  $t_{12} = 16,5$  мин;  $t_{13} = 18,5$  мин.

Эпюра изменения мощности  $p_s(t)$  на участке [-50 мм, 50 мм] показана на рисунке 2, а, мощностей  $p_{s,1}(t)$  на участках [-150 мм, -100 мм], [100 мм, 150 мм] и  $p_{s,2}(t)$  на участках [-100 мм, -50 мм], [50 мм, 100 мм] – на рисунке 2, б, соответственно ломаные линии 1 и 2.

Значения времен  $t_1 \dots t_{13}$  и коэффициентов в выражениях (12) – (14) найдены численным подбором для обеспечения необходимых условий нагрева и охлаждения участков трубы на рисунке 3. На рисунке 3 приведены зависимости изменения температур  $T$  от времени  $t$  при нагреве и охлаждении поперечного сварного соединения трубы, полученные по формуле (11), с учетом выражений (12) – (14). Кривая 1 – температура на внешней поверхности трубы по центру нагрева в точке с координатами  $x = 0$  мм,  $y = 0$  мм. Кривая 2 – температура на внутренней поверхности трубы по центру нагрева в точке с координатами  $x = 0$  мм,  $y = \Delta$ . Кривая 3 – температура на внешней поверхности трубы на расстоянии 150 мм от центра нагрева в точке с координатами  $x = 150$  мм,  $y = 0$  мм. Горизонтальными штрихпунктирными прямыми на рисунке обозначены значения температур, равные 1050 °С, 950 °С, 500 °С и 100 °С.

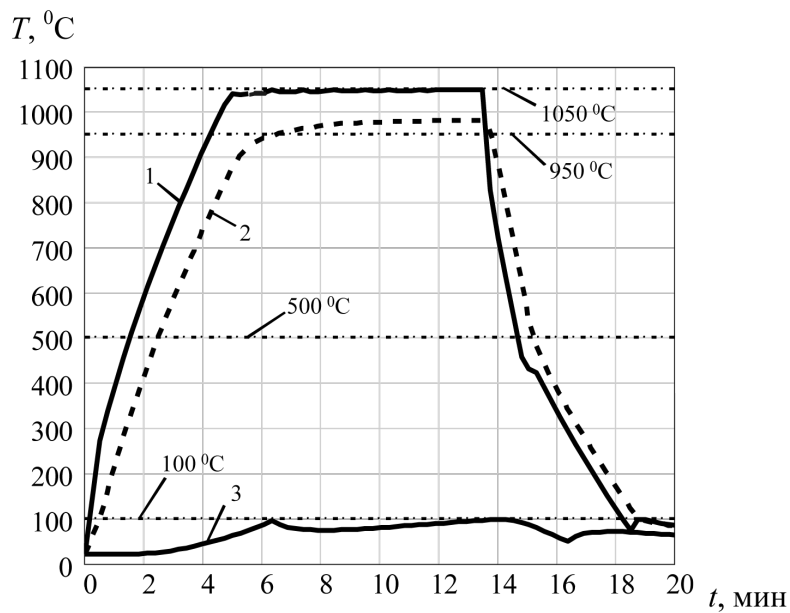
Из рисунка 2, а видно, что до 5 мин нагрева вкладываемая мощность наибольшая и постоянна до достижения температуры на поверхности трубы предельно допустимого значения 1050 °С (см. кривую 1 на рисунке



**Рисунок 2.** Эпюры изменения вкладываемых  $p_s(t)$  (а) и отводимых  $p_{s,1}(t)$  и  $p_{s,2}(t)$  – ломаные линии 1 и 2 (б) мощностей

3). От 5 до 13,5 мин нагрева вкладываемая мощность плавно уменьшается для поддержания постоянного значения температуры на поверхности трубы 1050 °С. Через 6,3 мин нагрева температура на внутренней поверх-

ности трубы достигает необходимого уровня 950 °С, после чего в течение заданных 7,5 мин, то есть до 13,8 мин, производится выдержка нагрева на нижней поверхности трубы от 950 до 982 °С (см. кривую 2 на рисунке 3).



**Рисунок 3.** Зависимости температур  $T(t)$

Через 6,3 мин от начала процесса нагрева температура на внешней стороне трубы на расстоянии 150 мм от центра нагрева достигает 100 °С (см. кривую 3 на рисунке 3). Начиная с этого времени и до 16,5 мин от начала процесса термообработки трубы участки  $[-150 \text{ мм}, -100 \text{ мм}]$  и  $[100 \text{ мм}, 150 \text{ мм}]$  перед полиэтиленовым защитным покрытием трубы должны охлаждаться водой, обычно через кольцевые спрейеры для отвода мощности. Отвод тепловой мощности учитывается отрицательными источниками нагрева  $p_{s,1}$ . В результате температура на расстоянии 150 мм от центра нагрева во всем промежутке времени термообработки трубы не превосходит 100 °С.

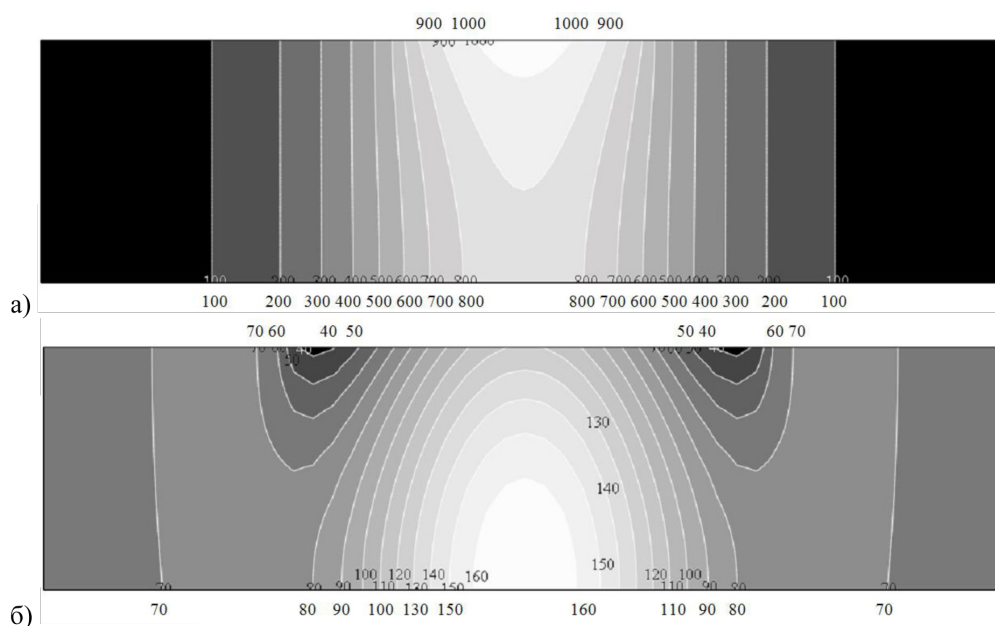
После того как произведена выдержка нагрева на внутренней поверхности трубы, подводимая мощность отключается и происходит интенсивный отвод тепла с поверхности трубы. В методике расчета это моделируется вводом отрицательных источников тепла с удельной мощностью  $p_{s,2}$  на участках  $[-50 \text{ мм}, 50 \text{ мм}]$ ,  $[-100 \text{ мм}, -50 \text{ мм}]$  и  $[50 \text{ мм}, 100 \text{ мм}]$ . Здесь отрицательные источники моделируют процесс обдува сжатым воздухом из кольцевых спрейеров, установленных по периметру данных участков охлаждения. Отводимая тепловая мощность обеспечивает снижение температуры с 1050 °С до 500 °С со скоростью  $(1050 \text{ °С} - 500 \text{ °С}) / [60 \cdot (14,5 \text{ мин} - 13,5 \text{ мин})] = 9,17 \text{ °С/с}$ .

Здесь 14,5 мин – время от начала процесса термообработки до достижения температуры 500 °С на внешней поверхности трубы под центром индуктора.

Отметим, что температура на внешней поверхности трубы после ее интенсивного охлаждения становится меньше температуры на внутренней поверхности трубы.

Через 15 мин от начала процесса термообработки интенсивность отбора тепла снижается за счет уменьшения отрицательной мощности (уменьшения интенсивности обдува воздухом). Мощность отводится до достижения температуры на внутренней поверхности трубы 100 °С – через 18,7 мин от начала процесса термообработки. Далее принудительный отвод тепловой мощности прекращается, и труба охлаждается до температуры окружающей среды естественным образом.

На рисунке 4, *а* изображена картина распределения температур по толщине трубы в момент времени 5 мин от начала процесса нагрева, когда температура на поверхности достигает заданного уровня 1050 °С. На рисунке 4, *б* показано распределение температуры в момент времени 18 мин от начала процесса термообработки трубы, на котором видно влияние зон отвода тепла на участках  $[-150 \text{ мм}, -100 \text{ мм}]$ ,  $[100 \text{ мм}, 150 \text{ мм}]$  и  $[-50 \text{ мм}, 50 \text{ мм}]$ .



**Рисунок 4.** Картины распределения температур по толщине трубы в моменты времени от начала процесса термообработки 5 мин (а) и 18 мин (б)

Регулирование вложением положительной и отрицательной мощности для обеспечения необходимых температур на участках трубы может осуществляться с помощью температурных датчиков, фиксирующих температуры на поверхностях трубы и связанных с системами управления подаваемой мощности на участки нагрева и системами управления количеством и скоростью подаваемой воды и сжатого воздуха на участки охлаждения.

Таким образом, методика определения распределения тепла на основе модернизированного метода тепловых источников Фурье позволяет гибко моделировать и быстро решать практические задачи по оценке распределения тепловых полей в стенке трубы большого диаметра под поперечными полосовыми участками поверхностного нагрева и охлаждения с заданными вкладываемыми положительными и отрицательными удельными мощностями.

Результаты, получаемые при использовании данной методики определения тепла, хорошо коррелируют с результатами, получаемыми при применении различных пакетов программ, использующих численные методы

расчета, и экспериментальными данными [13, 14].

Дальнейшие работы целесообразно направить на совершенствование разработанной методики определения распределения тепла с учетом внутренних источников нагрева для моделирования проникновения индуцированного тока частотой меньше нескольких килогерц вглубь трубы.

### Выводы

1. Разработанная методика определения распределения тепла на основе модернизированного метода тепловых источников Фурье позволяет гибко моделировать и быстро решать практические задачи по оценке распределения тепловых полей в стенке трубы большого диаметра под поперечными полосовыми участками поверхностного нагрева и охлаждения с заданными вкладываемыми положительными и отрицательными удельными мощностями.

2. Методика позволяет определять режимы нагрева и охлаждения для выполнения нормализации металла поперечных сварных соединений труб большого диаметра в магистральных трубопроводах.

### 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. Пентегов И.В., Рымар С.В. *Применение метода тепловых источников при учете рас-*

*пределения источников тепла при индукционном нагреве* // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016. – Т. 12. - № 4. – С. 5–12.

7. Тихомиров П.М. *Расчет трансформаторов*. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

8. Пентегов И.В., Рымар С.В., Петриенко О.И. *Сокращение времени счета в методе тепловых источников Фурье* // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – Т. 13. - № 4. – С. 24–36.

9. *Индукционный нагрев для сварки и родственных технологий* / А.С. Письменный / Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Ин-т электро-сварки им. Е.О. Патона, 2005. – 140 с.

10. Письменный А.С. *Расчет индукционных систем электротермической гибки сварных трубопроводов* // Автоматическая сварка. – 1991. - № 10. – С. 39–42.

11. *Электротермическая гибка труб в полевых условиях* / О.М. Иванцов, В.К. Лебедев, А.С. Письменный, М.Е. Шинлов //

Строительство трубопроводов. – 1992. - № 8. – С. 18–19.

12. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники: В 3 ч. – Ч. 3: Теория электромагнитного поля. – М.: Энергия, 1969. – 352 с.

13. Пантелеймонов Е.А., Письменный А.С. Особенности локального индукционного нагрева труб с толщиной стенки 30 мм // Сварщик. – 2011. - № 3. – С. 26–28.

14. Письменный А.А., Письменный К.А. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в системах индукционной термической обработки сварных соединений высокопрочных труб // Сварщик. – 2018. - № 1. – С. 22–27.

### References

1. Pentegov I.V. K teorii metoda teplovykh istochnikov, ispol'zuemogo pri analize teplovykh protsessov v elektrotekhnicheskikh sistemah // Elektrotekhnicheskije i informatsionnyje kompleksy i sistemy. – 2014. – Т. 10. - № 3. – P. 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. – М.: Mashgiz, 1951. – 297 p.

4. Pentegov I.V., Rymar S.V. Prakticheskije primeneniye metoda teplovykh istochnikov pri analize teplovykh protsessov v elektrotekhnicheskikh sistemah // Elektrotekhnicheskije i informatsionnyje kompleksy i sistemy. – 2016. – Т. 12. - № 3. – P. 11–17.

5. Kir'janov D.V. MathCAD 14. – SPb.: BKhV-Peterburg, 2007. – 704 p.

6. Pentegov I.V., Rymar S.V. Primeniye metoda teplovykh istochnikov pri uchete raspredelenija istochnikov tepla pri

induktsionnom nagreve // Elektrotekhnicheskije i informatsionnyje kompleksy i sistemy. – 2016. – Т. 12. - № 4. – P. 5–12.

7. Tihomirov P.M. Raschet transformatorov. – М.: Energoatomizdat, 1986. – 528 p.

8. Pentegov I.V., Rymar S.V., Petrijenko O.I. Sokrashchenije vremeni scheta v metode teplovykh istochnikov Fur'je // Elektrotekhnicheskije i informatsionnyje kompleksy i sistemy. – 2017. – Т. 13. - № 4. – P. 24–36.

9. Induktsionnyj nagrev dlja svarki i rodstvennyh tehnologij / A.S. Pis'mennyj / Pod redaktsijej B.E. Patona. – Kiev: Institut elektrosvarki imeni E.O. Patona, 2005. – 140 p.

10. Pis'mennyj A.S. Raschet induktsionnykh sistem elektrotermicheskoy gibki svarnykh truboprovodov // Avtomaticheskaja svarka. – 1991. - № 10. – P. 39–42.

11. Elektrotermicheskaja gibka trub v polevykh uslovijak / O.M. Ivantsov, V.K. Lebedev, A.S. Pis'mennyj, M.E. Shinlov // Stroitel'stvo truboprovodov. – 1992. - № 8. – P. 18–19.

12. Polivanov K.M. Teoreticheskije osnovy elektrotehniki: V 3 ch. – Ch. 3: Teorija elektromagnitnogo polja. – М.: Energija, 1969. – 352 p.

13. Pantelejmonov E.A., Pis'mennyj A.S. Osobennosti lokal'nogo induktsionnogo nagreva trub s tolshchinoj stenki 30 mm // Svarshchik. – 2011. - № 3. – P. 26–28.

14. Pis'mennyj A.A., Pis'mennyj K.A. Modelirovanje elektromagnitnyh i teplovykh protsessov v sistemah induktsionnoj termicheskoy obrabotki svarnykh sojedinenij vysokoprochnykh trub // Svarshchik. – 2018. - № 1. – P. 22–27.





***Tatevosyan A.A.***

***Tatevosyan A.A.***

*кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Электрическая техника», Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск, Российская Федерация*

УДК 621.313.17

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-2-15-25

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТИХОХОДНЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Статья посвящена исследованию магнитной системы синхронного генератора с постоянными магнитами (СГПМ). Разработанная магнитная система включает в свой состав неподвижный якорь из восьми отдельных П-образных магнитопроводов электромагнитов, на каждом из которых расположено по две катушки и вращающийся индуктор с размещенными с чередующейся полярностью в два ряда шестью постоянными магнитами. Исследование магнитной системы проводилось на разработанной трехмерной модели в программном комплексе Ansys Maxwell 16.0. Для проверки соответствия имитационной модели реальным физическим процессам выполнена техническая реализация макетного образца СГПМ, а также разработан лабораторный стенд для испытания генератора. Известно, что уменьшение высоты постоянных магнитов, а также увеличение воздушного зазора между якорем и индуктором ухудшают энергетические показатели магнитоэлектрических машин. Однако также известно, что при увеличении воздушного зазора уменьшается размагничивающий поток (реакция якоря), а уменьшение высоты постоянного магнита приводит к уменьшению массогабаритных показателей магнитной системы. С целью определения количественных пределов допустимости изменения величины воздушного зазора и высоты постоянных магнитов, проведено исследование внешней характеристики, а также выходной мощности СГПМ.

Научная новизна работы заключается:

- 1) в разработке магнитной системы СГПМ, обладающей низким пусковым моментом (моментом страгивания);
- 2) разработке имитационной модели СГПМ, которая может быть использована для исследования энергетических характеристик при варьировании параметров магнитной системы;
- 3) технической реализации СГПМ, а также лабораторного стенда для его испытания.

Практическая значимость работы заключается:

- 1) в выводах-рекомендациях, полученных в результате исследования;
- 2) возможности использовать разработанную конструкцию СГПМ в составе ветроэнергетической установки мощностью до 10 кВА.

**Ключевые слова:** магнитоэлектрический генератор, магнитная система, электромагнитное поле, оптимизация, постоянные магниты.

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CONSTRUCTIVE PARAMETERS OF SYNCHRONOUS GENERATORS WITH PERMANENT MAGNETS AS A PART OF ELECTRICAL COMPLEXES ON THEIR ENERGY CHARACTERISTICS

The study conducted in the article is devoted to the study of the magnetic system of a synchronous generator with permanent magnets (SGPM). The developed magnetic system includes a fixed anchor consisting of eight separate U-shaped magnetic circuits of electromagnets, each of which has two coils, and a rotating inductor with two alternating polarities placed in two rows of six permanent magnets. The study of the magnetic system was carried out on the developed three-dimensional model in the Ansys Maxwell 16.0 software package. To verify the compliance of the simulation model with real physical processes, the technical implementation of the SGPM prototype was made, and a laboratory test bench was developed for testing the generator. It is known, that a decrease in the height of the permanent magnets, as well as an increase in the air gap between the anchor and the inductor, worsen the energy performance of magnetoelectric machines. However, with an increase in the air gap, the demagnetizing flow decreases (anchor reaction), and a decrease in the height of the permanent magnet leads to a decrease in the mass and geometrics parameters of the magnetic system. In order to determine the quantitative limits of the permissibility of changes in the size of the air gap and the height of the permanent magnets, an external characteristic was studied, as well as the output power of the SGPM.

The scientific novelty of the work lies in:

- 1) the development of a magnetic system SGPM with a low starting torque (the moment of moving);
- 2) the development of a simulation model of SGPM, which can be used to study the energy characteristics when varying the parameters of the magnetic system;
- 3) technical implementation of SGPM, and also a laboratory stand for its testing.

The practical significance of the work lies in:

- 1) conclusions-recommendations from the study;
- 2) the ability to use the developed SGPM design as part of a wind power installation with a capacity of up to 10 kVA.

**Key words:** magnetoelectric generator, magnetic system, electromagnetic field, optimization, permanent magnets.

Разработка и практическое использование высокотехнологичных электротехнических комплексов в различных сферах производственной деятельности является отличительной особенностью современного уровня развития техники и технологии, они связаны с повышением качества продукции, увеличением спектра услуг при общем уменьшении стоимости и временных затрат. Это одно из направлений в развитии общества, определяющих законы спроса и предложения, основой которых является востребованность и конкурентоспособность на рынке товаров и услуг.

Современные высокотехнологичные электротехнические комплексы (ВЭТК) характеризуются качеством, надежностью и эконо-

мичностью. Их структуру можно графически представить в виде рисунка 1.

Среди различных ВТЭЖ особое место по актуальности решения проблем в жизни общества занимают вопросы генерации электрической мощности, являющиеся предметом исследований в России и за рубежом.

Использование тихоходных синхронных генераторов с постоянными магнитами (СГПМ) в составе ВЭТК, предназначенных для автономного электроснабжения потребителей, является воплощением идеи развития малой энергетики. Ветроэнергетические комплексы с тихоходными СГПМ не требуют сложных монтажных и пусковых работ, экономичны в обслуживании, обладают

высокой надежностью работы. При этом их область применения накладывает серьезные требования по напряжению источника питания, которое должно удовлетворять нормируемым показателям качества электрической

энергии при непостоянстве скорости ветра и отсутствии передаточных и преобразовательных механизмов ветродвигателя [1-5].



Рисунок 1. Характеристики и составляющие ВЭТК

С точки зрения процесса энергопреобразования, тихоходный ВЭТК, использующий электромеханический преобразователь в генераторном режиме, представляет собой сложную электромеханическую систему. Отсутствие общего решения, касающегося параметров электромеханического преобразователя, определяет большое многообразие форм конструктивного исполнения генератора и остро ставит задачу разработки общих принципов построения ВЭТК.

Структурная схема энергетической установки вращательного движения (рис. 2) содержит движитель (Д), обеспечивающий вращающий момент, электромеханический преобразователь (ЭМП), присоединенный к движителю напрямую или посредством передаточного механизма, электрический преобразователь (Пр), управляющее устройство (УУ) и электрическую нагрузку (ЭН).

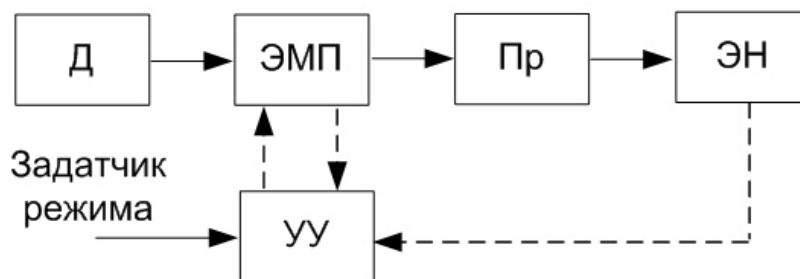
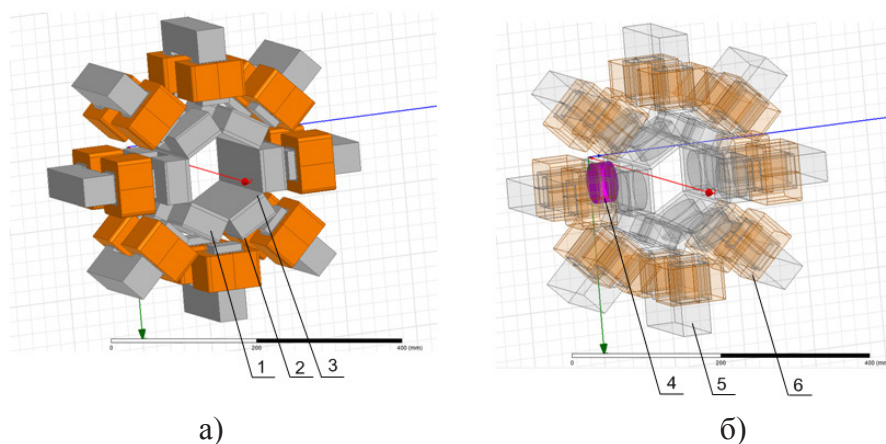


Рисунок 2. Структурная схема ВЭТК с ЭМП

В настоящем исследовании в качестве электротехнического комплекса рассматривается маломощная ветроэнергетическая установка со следующими выходными параметрами:  $S_{\text{НОМ}}=250$  ВА,  $U_{\text{НОМ}}=220$  В,  $n=400$  об/мин. Для рассматриваемого ВЭТК разработана магнитная система СГПМ, включающая

в свой состав изолированные магнитопроводы.

На рисунке 3 представлена трехмерная модель магнитной системы СГПМ, выполненная в программном комплексе Ansoft Maxwell 16.0 [6].



**Рисунок 3.** Имитационная модель СГПМ в программном обеспечении Ansoft Maxwell: а – внешний вид модели; б) размещение постоянных магнитов

Магнитная система СГПМ включает в свой состав индуктор (вращающаяся часть СГПМ с постоянными магнитами) и якорь (неподвижная часть СГПМ с катушками) [7]. Исследуемая СГПМ имеет три пары полюсов и представлена шестью постоянными магнитами, размещенными с чередующейся полярностью в два ряда на индукторе и шестнадцатью катушками, размещенными на якоре. На индукторе в специальных алюминиевых стаканах 1, закрытых алюминиевыми крышками 2, расположены постоянные магниты 4. Для создания замкнутой магнитной цепи постоянные магниты 4 шунтированы стальной пластиной 3. Якорь представляет собой восемь шихтованных П-образных магнитопроводов 5, расположенных по окружности и сдвинутых друг относительно друга на угол  $45^\circ$ .

В конструкции СГПМ используются высококоэрцитивные постоянные магниты NdFeB марки N50 ( $B_r = 1.05$ Тл,  $H_c = 750$  кА/м) с осевым направлением намагниченности.

Геометрические параметры магнитной системы приведены в таблице 1.

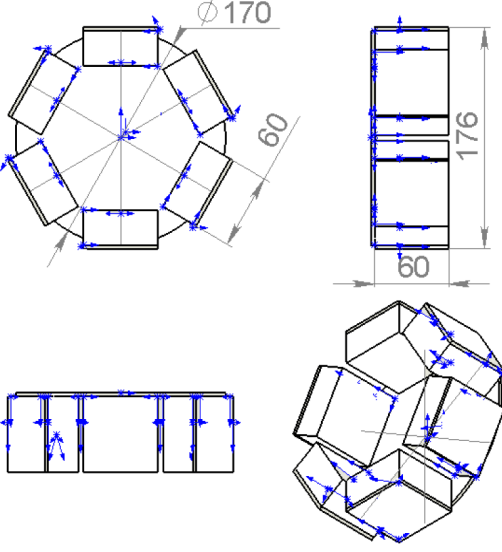
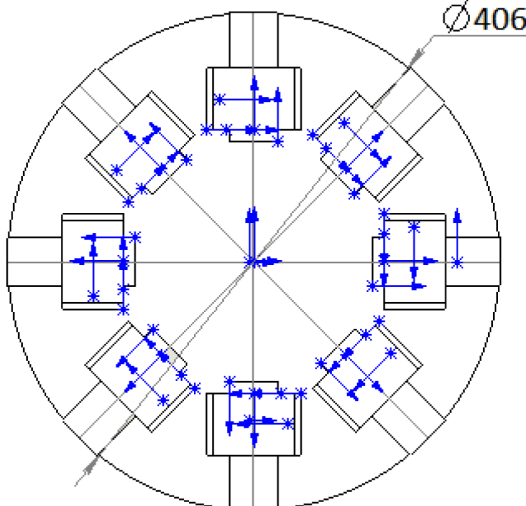
Катушки СГПМ соединены последовательно и таким образом образуют общую обмотку СГПМ. Соединение двух катушек

каждого электромагнита выполнено встречно для того, чтобы на выходе получить максимальное индуктированное напряжение.

Имитационная модель в Ansoft Maxwell 16.0 обладает следующими допущениями и особенностями:

- типом решения (Solution Type) в Ansoft Maxwell 16.0 выбран переходный процесс (Transient). Этот тип решения используется при расчете динамических характеристик модели;
- расчетная область ограничена объемом, значение векторного магнитного потенциала на границе которого принято равным нулю;
- электромагнитное поле нестационарное и не обладает симметрией;
- в виду отсутствия симметрии в расчетной области представлена полная трехмерная твердотельная модель СГПМ (инкапсулирована из программного продукта SolidWorks 2017);
- обмотки с током представлены в виде параллелепипедов со скругленными боковыми ребрами и имеющими вырез для закрепления на П-образном магнитопроводе;
- относительная магнитная проницаемость шихтованных из электротехнической стали П-образных магнитопроводов опреде-

Таблица 1. Геометрические параметры магнитной системы

Элемент магнитной системы	Геометрические параметры, мм	Магнитные свойства материалов
Индуктор		<p>Постоянный магниты  <math>\varnothing 55 \times 25</math> мм                      Нм30Ди6Р</p>
Якорь		<p>Магнитопровод П-образный                      140x105x40 мм.                      Обмотка выполнена медным проводом марки ПЭТВ, диаметр жилы 1,8 мм, активное сопротивление каждой катушки <math>R = 1</math> Ом</p>

ляется в соответствии с кривой намагничивания (программно для материала Steel\_1008);

- рассматривается установившийся режим вращения индуктора с постоянной угловой скоростью;
- объемная намагниченность постоянных магнитов одинаковая;
- для задания граничных условий трехмерная модель СГПМ помещена в параллелепипед (Region), размер которого по осям  $x, y, z$  превышает размер модели в 2 раза;
- на внешней поверхности моделируемой области модели Region принято граничное условие – тангенциальная составляющая функции магнитного потока  $\Phi_\tau$  равна нулю.

В основе выбранного типа решения Transient в общем виде используется система уравнений

$$\begin{cases} \nabla \vec{H} = \sigma(E) \\ \nabla E = \frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla B = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля, кА/м;  $E$  – напряженность электрического поля В/м;  $B$  – индукция магнитного поля, Тл;  $\sigma$  – относительная магнитная проницаемость материала.

Уравнение механической системы используется в виде



$$J\beta + \lambda\omega = M_{\text{эм}} - M_{\text{нагр}}, \quad (2)$$

где  $J$  – момент инерции, кг м<sup>2</sup>;  $M_{\text{эм}}$  – электромагнитный момент, Н м;  $M_{\text{нагр}}$  – внешний момент нагрузки;  $\omega$  – угловая скорость вра-

щения, рад/с;  $\beta$  – угловое ускорение, рад/с<sup>2</sup>;  $\lambda$  – коэффициент демпфирования, Н м с.

Основные параметры СГПМ приведены в таблице 2.

Таблица 2. Общие параметры СГПМ

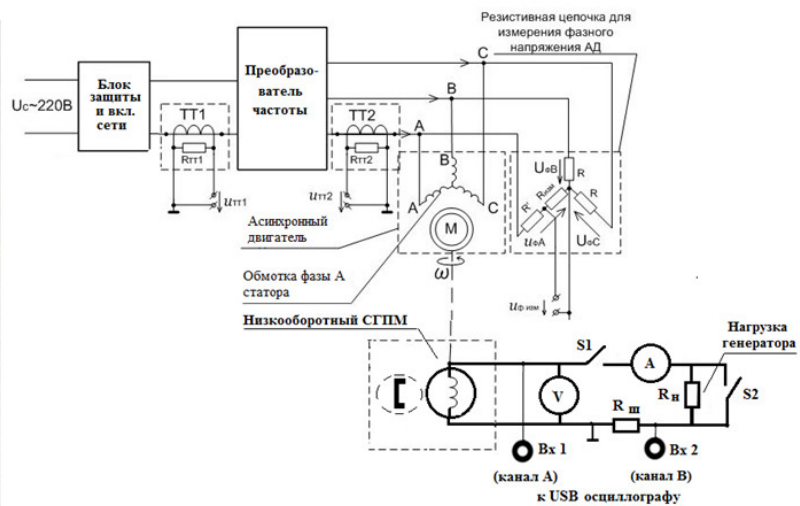
Наименование, параметры/эскиз модели	Значение
Полная мощность, ВА	300
Выходное напряжение, В	220
Частота вращения индуктора, Гц	20
Число пар полюсов машины	3
Число электромагнитов	8
Число катушек на электромагнитах	2
Линейная токовая нагрузка, А/м	20 000
Среднее значение магнитной индукции в зазоре, Тл	0.4
Рабочий зазор, мм	10
Плотность тока в проводнике, А/м <sup>2</sup>	2 · 10 <sup>6</sup>

Для сопоставления результатов моделирования выполнена техническая реализация СГПМ (рис. 4, а), а также разработан лабора-

торный стенд для исследования режимов работы СГПМ (рис. 4, б).



а)



б)

Рисунок 4. Низкооборотный синхронный генератор с постоянными магнитами (а), функциональная схема лабораторного стенда (б)

Обеспечение заданной скорости вращения индуктора СГПМ осуществляется ведущим асинхронным двигателем при помощи преобразователя частоты. Скорость вращения во всех режимах испытаний СГПМ поддерживалась 400 об/мин.

Эксперимент и моделирование проводились при различных режимах работы СГПМ: холостого хода при подключенной к выходу СГПМ нагрузочного реостата ( $R_{\text{нагр}}=300$  Ом,  $R_{\text{нагр}}=200$  Ом,  $R_{\text{нагр}}=100$  Ом) и короткого замыкания.

В программном обеспечении Ansoft Maxwell 16.0 моделирование выполнялось в тех же режимах. Схема соединения катушек и присоединение электрической нагрузки СГПМ производилось в программном обеспечении Ansoft Maxwell Circuit Editor.

Осциллограммы, полученные в ходе экспериментального исследования и имитационного моделирования, приведены на рисунке 5.

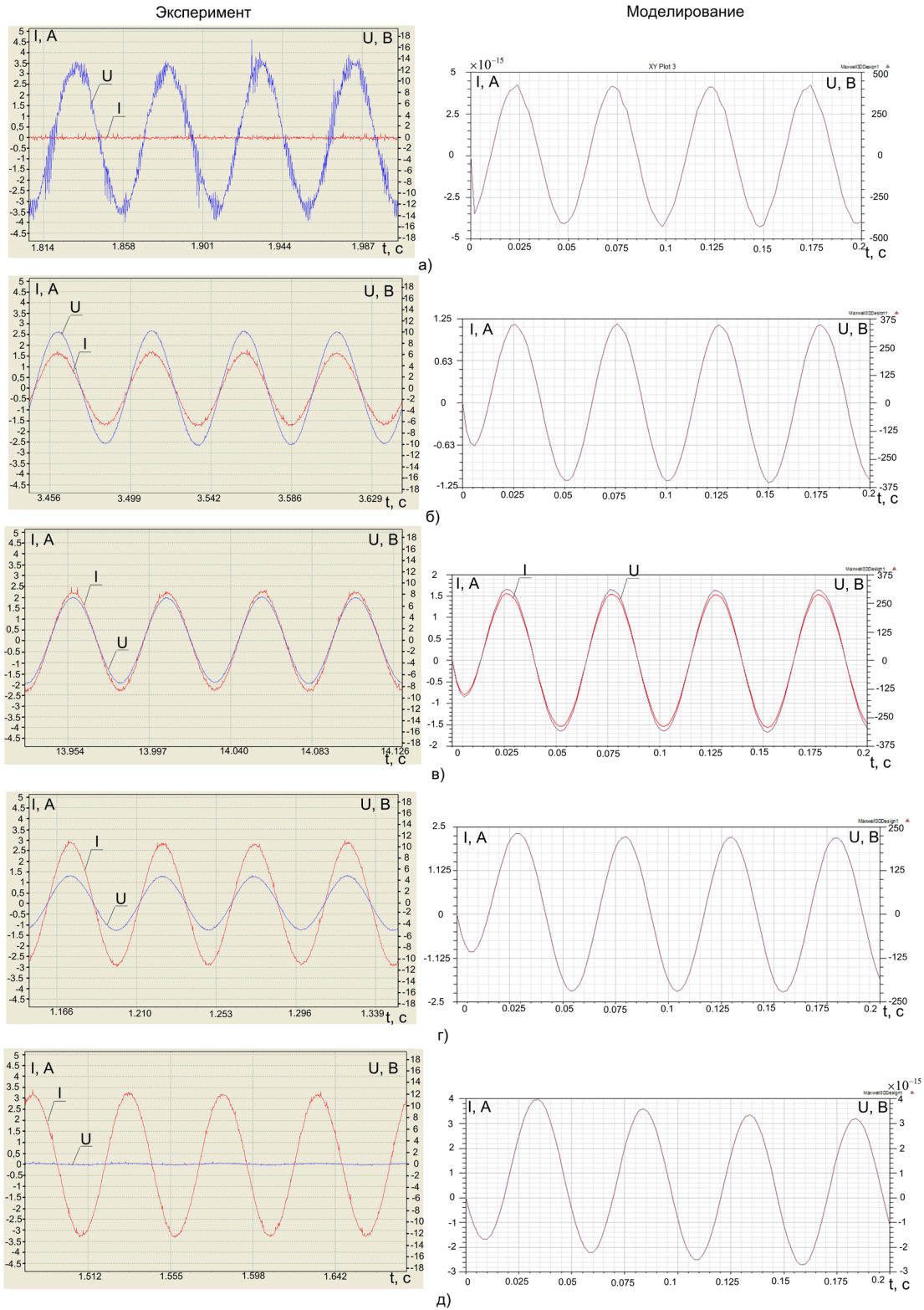
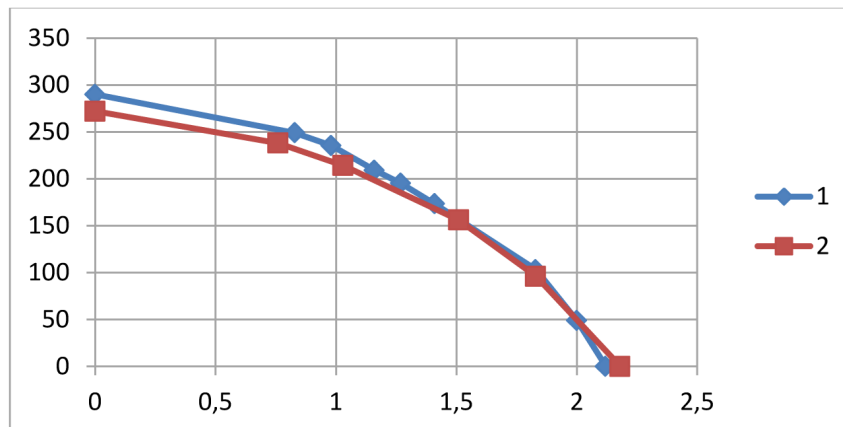


Рисунок 5. Осциллограммы, полученные в результате экспериментальных испытаний и имитационного моделирования СГПМ: а – холостой ход, б –  $R_{нагр} = 300 \text{ Ом}$ ; в –  $R_{нагр} = 200 \text{ Ом}$ ; г –  $R_{нагр} = 100 \text{ Ом}$ ; д – короткое замыкание

Коэффициент делителя напряжения в эксперименте для сигнала напряжения  $U$  равен 40.23.

Графики нагрузочной характеристики, полученные в результате имитационного моделирования и экспериментального исследования, приведены на рисунке 6.

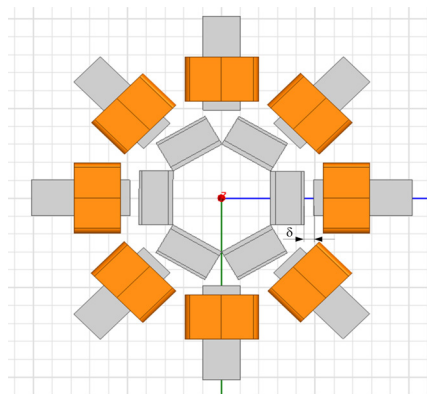


**Рисунок 6.** Исследование СГПМ: 1 – результаты моделирования; 2 – результаты эксперимента

Расхождение результатов моделирования и эксперимента находится в пределах допустимой погрешности (среднеквадратичное отклонение в относительных единицах составляет менее пяти процентов). Указанное обстоятельство делает возможным проведение дальнейших исследований по влиянию конструктивных особенностей СГПМ на энергетические характеристики электротехнического комплекса в программном обеспе-

чении Anspft Maxwell 16.0 на имитационной модели.

Выполним расчет энергетических параметров СГПМ при изменении величины зазора  $\delta$  между индуктором и якорем. Величина зазора изменяется в диапазоне от 10 до 20 мм с шагом 5 мм. На рисунке 7 представлена имитационная модель СГПМ с указанием изменяющегося параметра магнитной системы.



**Рисунок 7.** Воздушный зазор между якорем и индуктором

На рисунке 8 представлена нагрузочная характеристика СГПМ при различных значениях воздушного зазора.

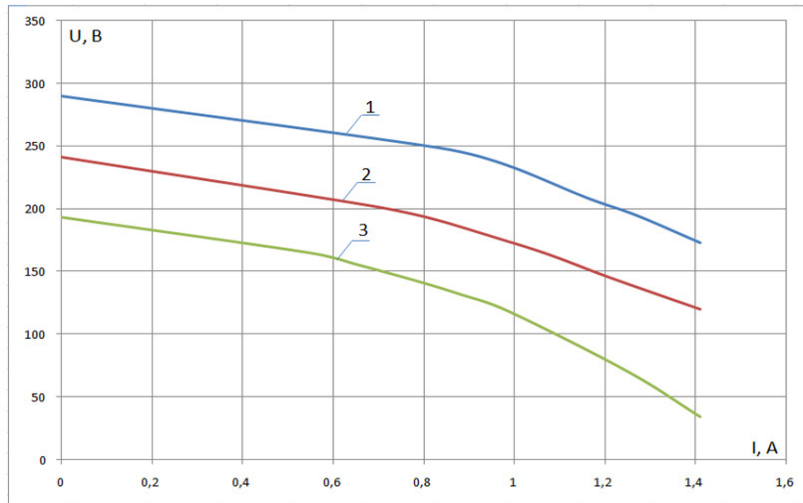
Выходная мощность электротехнического комплекса приведена на рисунке 9.

Анализ полученных результатов моделирования указывает, что величина воздушного зазора существенно влияет на энергетические характеристики комплекса в целом. Так, увеличение воздушного зазора более чем в

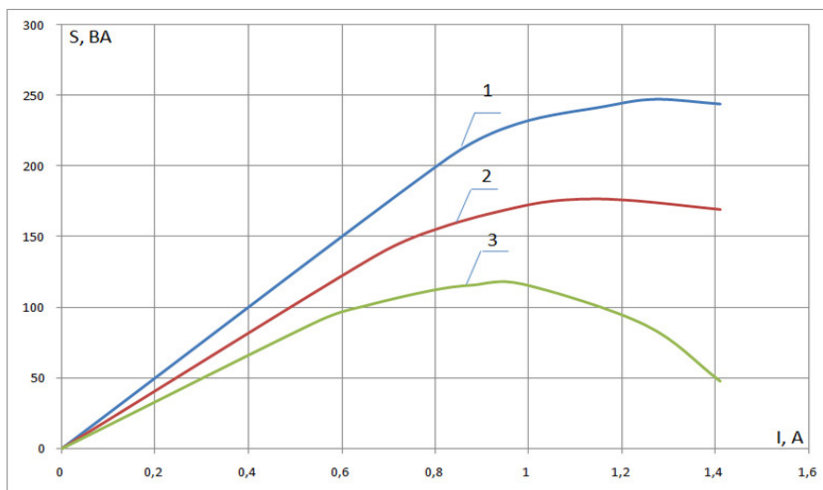
два раза приводит к уменьшению жесткости нагрузочной характеристики генератора, снижению напряжения на выходе СГПМ и мощности более чем на 60 %. Необходимо отметить, что уменьшение воздушного зазора приведет к увеличению индукции в зазоре, однако вместе с тем возрастет реакция якоря, а также начнут более остро проявляться вибрации, связанные с различной объемной намагниченностью постоянных магнитов.

Таким образом, уменьшение воздушного зазора не является очевидным решением оптимизации магнитной системы СГПМ, что делает задачу поиска соотношения величины

воздушного к высоте постоянного магнита во многом исследовательской, связанной с определением максимальной энергии, отдаваемой постоянным магнитом.



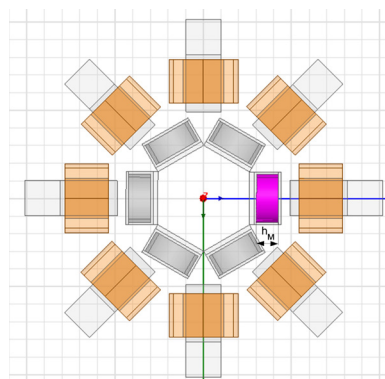
**Рисунок 8.** Внешняя характеристика СГПМ при различной величине воздушного зазора: 1-10 мм; 2-15 мм; 3-20 мм



**Рисунок 9.** Выходная мощность в зависимости от величины воздушного зазора: 1-10 мм; 2-15 мм; 3-20 мм

Выполним исследование высоты постоянного магнита на энергетические характеристики электротехнического комплекса. На

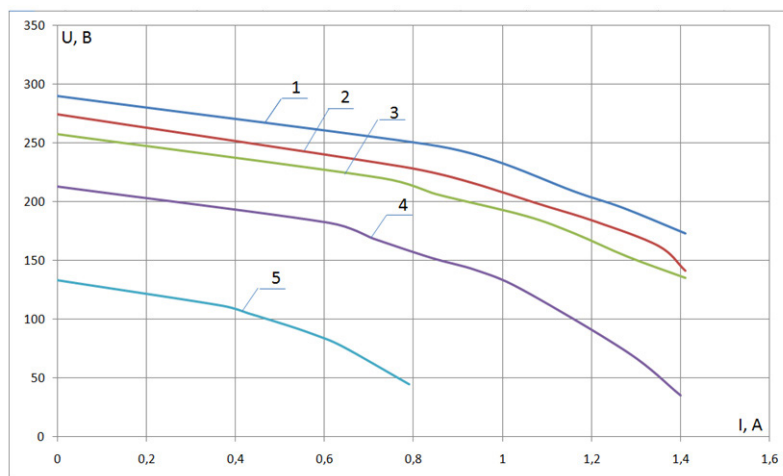
рисунке 10 представлен изменяемый параметр магнитной системы СГПМ.



**Рисунок 10.** Высота постоянного магнита

Изменение высоты постоянного магнита проведем в имитационной модели для следующих значений высоты постоянного магнита  $h_M$ : 25 мм, 20 мм, 15 мм, 10 мм, 5 мм.

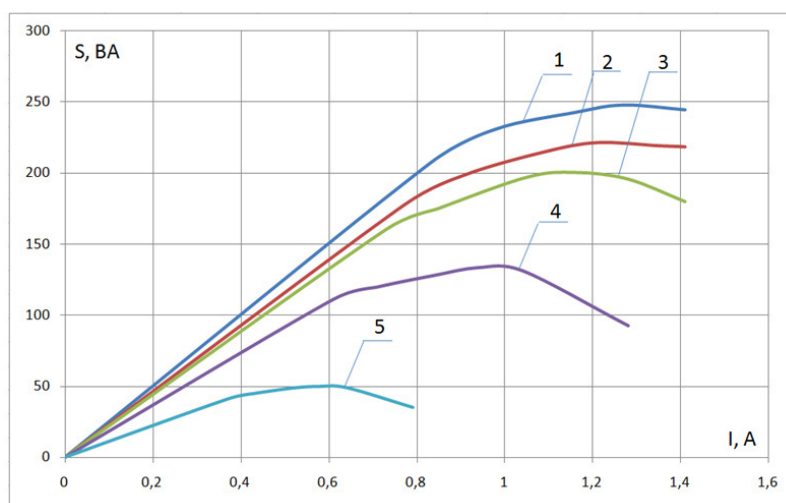
Исследование влияния высоты постоянного магнита на нагрузочную характеристику СГПМ приведено на рисунке 11.



**Рисунок 11.** Нагрузочная характеристика СГПМ при различной высоте постоянного магнита: 1-25 мм; 2-20 мм; 3-15 мм; 4-10 мм; 5-5 мм

Выходная мощность электротехнического комплекса при различной высоте постоян-

ного магнита приведена на рисунке 12.



**Рисунок 12.** Выходная мощность СГПМ в зависимости от высоты постоянного магнита: 1-25 мм; 2-20 мм; 3-15 мм; 4-10 мм; 5-5 мм

Результаты моделирования магнитной системы СГПМ с различной высотой магнита указывают на значительные ухудшения энергетических параметров при уменьшении высоты постоянного магнита более чем на 10 мм, при этом уменьшение высоты магнита до указанного значения приводит к незначительному снижению выходных характеристик СГПМ и может быть скомпенсировано за счет других факторов, например, увеличения ампер-витков катушек или уменьшения воздушного зазора.

В статье проведен параметрический анализ влияния конструктивных параметров СГПМ на энергетические характеристики ветроэнергетической установки. По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

1. Разработанная имитационная модель в программном обеспечении Ansoft Maxwell 16.0 может использоваться для анализа энергетических характеристик ВЭТК.

2. Оптимизация конструкции магнитной системы СГПМ, связанная с уменьшением



массы активных материалов при сохранении выходных параметров, возможна на пути определения оптимального соотношения величины воздушного зазора и высоты постоянных магнитов.

3. Для рассмотренной конструкции магнитной системы уменьшение высоты постоянных магнитов до 30 % не приводит к значительному ухудшению выходных параметров СГПМ.

### Список литературы

1. Евдокимов А.А., Чарыков В.И., Саттаров Р.Р., Игнастьев С.Г., Городских А.А. Расчет магнитной системы магнитоэлектрических генераторов мощностью до 10 кВА для ветроэнергетических установок // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – Вып. № 1. – Т. 14. – 2018. – С. 27-34.
2. Кушнир В.Г., Кошкин И.В., Кошкина А.И., Кушнир А.С. Имитационное моделирование системы «ветронасос – гидротурбина» // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – Вып. № 4. – Т. 12. – 2016. – С. 28-33.
3. Roberto Lacal-Arantequi Globalization in the wind energy industry: contribution and economic impact of European companies. *Renewable Energy*, Volume 134, April 2019, p. 612-628.
4. Gugliani G.K., Sarkar A., Ley C., Mandal S. New methods to assess wind resources in terms of wind speed, load, power and direction. *Renewable Energy*, Volume 129, Part A, December 2018, p. 168-182.
5. Battisti L., Benini E., Brighenti A., Dell'Anna S., Raciti Castelli M. Small wind turbine effectiveness in the urban environment // *Renewable Energy*, Volume 129, Part A, December 2018, pp. 102-113.
6. Ansoft Maxwell 3D. User's Guide // Ansoft Corporation 225 West Station Square Drive Suite 2000, Pittsburg, PA 15219 USA.
7. Бесколлекторный синхронный генератор с постоянными магнитами / Татевосян А.А., Татевосян А.С. Пат. 2565775 Российская Федерация, МПК Н 02 К 21/14. 2014140005/07; заявитель и патентообладатель Омский государственный технический университет; заявл. 02.10.14; опубл. 20.10.2015, Бюл. № 29.

### References

1. Evdokimov A.A., Charykov V.I., Sattarov R.R., Ignast'ev S.G., Gorodskih A.A. Raschet magnitnoj sistemy magnitoelektricheskikh generatorov moshhnost'ju do 10 kVA dlja vetroenergeticheskikh ustanovok // *Elektrotehnicheskije i informacionnyje komplekсы i sistemy*. – 2018. – Vyp. № 1. – Vol. 14. – 2018. – P. 27-34.
2. Kushnir V.G., Koshkin I.V., Koshkina A.I., Kushnir A.S. Imitacionnoje modelirovanije sistemy «vetronasos – gidroturbina» // *Elektrotehnicheskije i informacionnyje komplekсы i sistemy*. – 2018. – Vyp. - № 4. – Vol. 12. – 2016/ - P. 28-33.
3. Roberto Lacal-Arantequi Globalization in the wind energy industry: contribution and economic impact of European companies. *Renewable Energy*. – Vol. 134, April 2019. – p. 612-628.
4. Gugliani G.K., Sarkar A., Ley C., Mandal S. New methods to assess wind resources in terms of wind speed, load, power and direction. *Renewable Energy*, Volume 129, Part A, December 2018, p. 168-182.
5. Battisti L., Benini E., Brighenti A., Dell'Anna S., Raciti Castelli M. Small wind turbine effectiveness in the urban environment // *Renewable Energy*, Volume 129. – Part A. – December 2018. – p. 102-113
6. Ansoft Maxwell 3D. User's Guide // Ansoft Corporation 225 West Station Square Drive Suite 2000, Pittsburg, PA 15219 USA/
7. Beskollektornyj sinhronnyj generator s postojannymi magnitami / Tatevosjan A.A., Tatevosjan A.S. Pat. 2565775 Rossijskaja Federacija, MPK H 02 K 21/14. 2014140005/07; zajavitel' i patentoobladatel' Omskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet; zajavl. 02.10.14; opubl. 20.10.2015, Bjul. № 29.



**Васильев Б.Ю.**  
**Vasiliev B. Yu.**

*кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Электроэнергетики и  
Электромеханики», Санкт-Петербургский  
горный университет,  
г. Санкт-Петербург,  
Российская Федерация*



**Ле Ван Тунг**  
**Le Van Tung**

*аспирант, кафедры «Электроэнергетики и  
Электромеханики», Санкт-Петербургский  
горный университет,  
г. Санкт-Петербург,  
Российская Федерация*

УДК 621.314.57

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-2-26-33

## **КОСВЕННЫЕ СИСТЕМЫ МОДУЛЯЦИИ МАТРИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ**

В настоящее время в электроприводах переменного тока широко используются двухзвенные преобразователи частоты. Однако технология управления преобразователями частоты развивается. Поэтому изучение создания новых переключателей, улучшение структуры динамической цепи, схемы управления являются важными задачами при изготовлении преобразователя, и альтернативные им матричные преобразователи частоты обладают улучшенными энергетическими и динамическими характеристиками. В данной статье представлена методика косвенной пространственно-векторной модуляции матричного преобразователя частоты. Ее преимущества заключаются в простоте реализации вычислительного алгоритма относительно других систем управления, например, методов управления Venturini – Alesina или 3М (max, medium, min). Система модуляции Venturini – Alesina имеет недостатки, так как алгоритм требует сложных вычислений, нескольких тригонометрических преобразований и непрерывного измерения входного напряжения с высокой точностью. Система модуляции 3М более простая, но она обладает главным недостатком, который заключается в высокой зависимости качества управления от точности вычислительных и измерительных операций. Для исследования характеристик матричного преобразователя частоты с системой косвенной модуляции на основе пространственно-векторного алгоритма был разработан новый тип вычислительного алгоритма системы управления и построена имитационная модель с возможностью исследования различных режимов работы преобразователя. Работа матричного преобразователя частоты заключается в возможности двухстороннего обмена энергией, регулировании формы входного тока, обеспечении синусоидальной формы входного тока и напряжения, а также использовании коэффициента преобразователя на уровне 0,866 и работе с коэффициентом мощности, равным единице. Имитационное моделирование выполнялось в Matlab & Simulink. Результаты моделирования и их анализ представлены в статье.

**Ключевые слова:** матричный преобразователь частоты, косвенная модуляция, пространственно-векторная модуляция, имитационное моделирование.

## INDIRECT MODULATION SYSTEMS OF MATRIX FREQUENCY CONVERTERS

Currently, two-stage frequency converters are widely used in AC electric drives. However, the frequency converter control technology is evolving. Therefore, the study of creating new switches, improving the structure of a dynamic circuit, control circuits are important tasks in the manufacture of the converter and their alternative matrix frequency converters have improved energy and dynamic characteristics. This article presents the technique of indirect space vector modulation of a matrix frequency converter. Its advantages lie in the simplicity of the implementation of the computational algorithm relative to other control systems, for example, Venturini–Alesina control methods or 3M (max, medium, min). The Venturini–Alesina modulation system has drawbacks since the algorithm requires complex calculations, several trigonometric transformations, and continuous measurement of the input voltage with high accuracy. The 3M modulation system is simpler, but it has a major drawback, which will consist of the high dependence of control quality on the accuracy of computational and measurement operations. To study the characteristics of a matrix frequency converter with an indirect modulation system based on a space-vector algorithm, a new type of computational algorithm of the control system was developed and a simulation model was built with the possibility of studying various modes of converter operation. The operation of the matrix frequency converter consists in the possibility of two-way energy exchange, regulating the input current form, providing a sinusoidal input current and voltage, as well as using the converter coefficient at 0.866 and working with a power factor equal to one. The simulation was performed in Matlab&Simulink. The simulation results and their analysis are presented in the article.

**Key words:** matrix frequency converter, indirect modulation, space vector modulation, simulation modeling.

### Введение

Матричный преобразователь – это непосредственный преобразователь, построенный на основе полупроводниковых модулей с двухсторонней проводимостью [1, 2]. Структурная схема электропривода с матричным преобразователем частоты представлена на рисунке 1. Преобразователь состоит из девяти модулей и сетевого фильтра. Схема модулей матричного преобразователя может быть различной. Основные типы модулей представлены на рисунке 2.

Основные преимущества матричного преобразователя заключаются в возможности двухстороннего обмена энергией, регулирования формы входного тока является, обеспечения синусоидальной формы входного тока и напряжения, регулирования коэффициента мощности вплоть до единицы [3]. Главная проблема использования МПЧ заключается в более сложной, чем в двухзвенном преобразователе, системе модуляционного управле-

ния, а также более сложных способах модификации системы модуляции [4, 5].

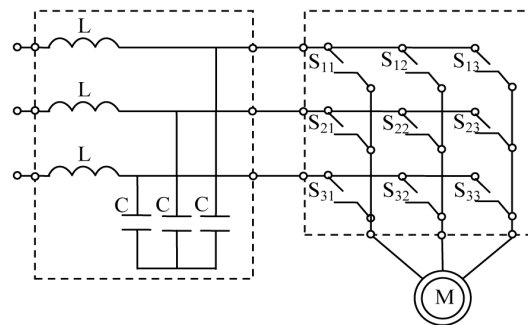


Рисунок 1. Схема матричного преобразователя

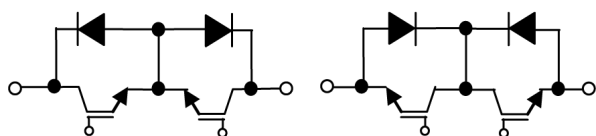


Рисунок 2. Схема модулей матричного преобразователя

### Схема замещения матричного преобразователя

Для синтеза системы модуляционного управления на основе методов пространственно-векторной модуляции необходимо

преобразовать матричный преобразователь к виду двухзвенного преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока.



Рисунок 3. Схема замещения матричного преобразователя

Схема замещения матричного преобразователя частоты представлена на рисунке 3, где приняты следующие обозначения:  $U_{dc+}$  – положительное напряжение постоянного тока;  $U_{dc-}$  – отрицательное напряжение постоянного тока;  $I_{dc+}$  – положительный постоянный ток;  $I_{dc-}$  – отрицательный постоянный ток;  $S_{a,b,c}$  – управляющие импульсы в цепи выпрямителя;  $S_{A,B,C}$  – управляющие импульсы в цепи инвертора.

Разделение МПЧ на выпрямитель и инвертор дает возможность выполнить синтез системы модуляционной системы с возможностью формирования выходного напряжения и управлением входным током.

#### Модуляция пространственного вектора входного тока

Векторная диаграмма входного тока МПЧ представлена на рисунке 4 [6, 7]. Постоянное напряжение шины и входные токи можно представить следующим образом:

$$\begin{bmatrix} U_{dc+} \\ U_{dc-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & S_3 & S_5 \\ S_2 & S_4 & S_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 \\ S_3 & S_4 \\ S_5 & S_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dc+} \\ I_{dc-} \end{bmatrix}$$

Заданный вектор входного тока выпрямителя (тока сети) может быть представлен комбинацией базовых векторов: двухактивным вектором, между которым находится заданный вектор входного тока, и нулевым вектором следующим образом:

$$I_i = d_\gamma I_\gamma + d_\delta I_\delta + d_{0i} I_0$$

где  $d_\gamma$ ,  $d_\delta$ ,  $d_{0i}$  – интервальные коэффициенты модуляции, которые определяют время действия базовых векторов тока в цикле модуляции.

Коэффициент модуляции тока вычисляется следующим образом:

$$m_i = \frac{|I_i|}{I_{dc}}$$

Интервальные коэффициенты модуляции тока вычисляются следующим образом:

$$d_\gamma = m_i \sin\left(\frac{\pi}{3} - \Delta_i\right)$$

$$d_\delta = m_i \sin(\Delta_i)$$

$$d_{0i} = 1 - d_\gamma - d_\delta$$

#### Модуляция пространственного вектора выходного напряжения

Векторная диаграмма выходного напряжения МПЧ представлена на рисунке 5.

Постоянный ток и выходное напряжение можно представить следующим образом:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_7 & S_8 \\ S_9 & S_{10} \\ S_{11} & S_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{dc+} \\ U_{dc-} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{dc+} \\ I_{dc-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_7 & S_9 & S_{11} \\ S_8 & S_{10} & S_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}.$$

Заданный вектор выходного напряжения инвертор (напряжения нагрузки) может быть представлен комбинацией базовых векторов следующим образом:

$$U_0^* = d_\alpha U_\alpha + d_\beta U_\beta + d_{0u} U_0,$$

где  $d_\alpha, d_\beta, d_{0u}$  – интервальные коэффициенты модуляции, которые определяют время действия базовых векторов напряжения в цикле модуляции.

Коэффициент модуляции напряжения вычисляется следующим образом:

$$m_u = \frac{|U_0|}{U_{DC}}$$

Интервальные коэффициенты модуляции напряжения вычисляется следующим образом:

$$d_\alpha = m_u \sin\left(\frac{\pi}{3} - \Delta_v\right)$$

$$d_\beta = m_u \sin(\Delta_v)$$

$$d_{0u} = 1 - d_\alpha - d_\beta.$$

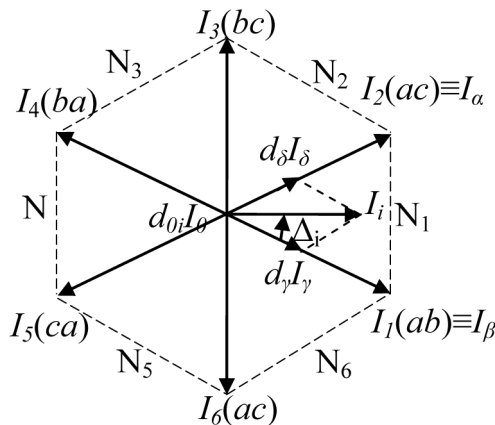


Рисунок 4. Векторная диаграмма входного тока

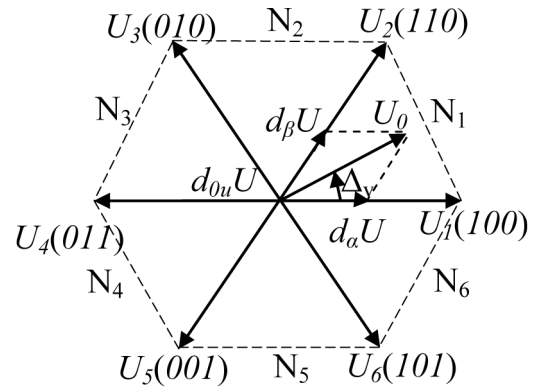


Рисунок 5. Векторная диаграмма выходного напряжения

### Формирование коммутационных функций косвенным методом

Для обеспечения симметрии входного тока и выходного напряжения на периоде модуляции необходимо обеспечивать определенную последовательность коммутации выпрямления ( $\gamma$ - $\delta$ -0) с коммутацией инвертора ( $\alpha$ - $\beta$ -0). Поэтому модуляция должна обеспечивать следующую последовательность коммутации:

$$\alpha\gamma \rightarrow \beta\gamma \rightarrow \beta\delta \rightarrow \alpha\delta.$$

Каждый элемент последовательности для каждого этапа коммутации в этой последовательности представляет собой умножение соответствующих компонентов следующим образом:

$$d_{\alpha\gamma} = d_\alpha d_\gamma$$

$$d_{\alpha\delta} = d_\alpha d_\delta$$

$$d_{\beta\gamma} = d_\beta d_\gamma$$

$$d_{\beta\delta} = d_\beta d_\delta$$

$$d_0 = 1 - (d_{\alpha\gamma} + d_{\alpha\delta} + d_{\beta\gamma} + d_{\beta\delta})$$

Схема замещения фаз МПЧ представлена на рисунке 6. Для формирования напряжения на выходной фазе требуется комбинация из шести коммутационных функций силовых ключей, например, для фазы А два ключа  $S_7$  и  $S_8$  инвертора и шесть ключей  $S_1 - S_6$  выпрямителя.

Таким образом, управлением ключами выпрямителя и инвертора должно осуществляться согласовано следующим образом:



$$\begin{aligned}
 A &= a(S_7S_1 + S_8S_2) + b(S_7S_3 + S_8S_4) + c(S_7S_5 + S_8S_6) \\
 S_{aA} &= S_7S_1 + S_8S_2 \\
 S_{bA} &= S_7S_3 + S_8S_4 \\
 S_{cA} &= S_7S_5 + S_8S_6
 \end{aligned} \quad , \quad (1)$$

$$A = aS_{aA} + bS_{bA} + cS_{cA} , \quad (2)$$

$$[S_{aA} \quad S_{bA} \quad S_{cA}] = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 \\ S_3 & S_4 \\ S_5 & S_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_7 \\ S_8 \end{bmatrix} = (S_7S_1 + S_8S_2)(S_7S_3 + S_8S_4)(S_7S_5 + S_8S_6) , \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_7S_1 + S_8S_2 & S_7S_3 + S_8S_4 & S_7S_5 + S_8S_6 \\ S_9S_1 + S_{10}S_2 & S_9S_3 + S_{10}S_4 & S_9S_5 + S_{10}S_6 \\ S_{11}S_1 + S_{12}S_2 & S_{11}S_3 + S_{12}S_4 & S_{11}S_5 + S_{12}S_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} . \quad (4)$$

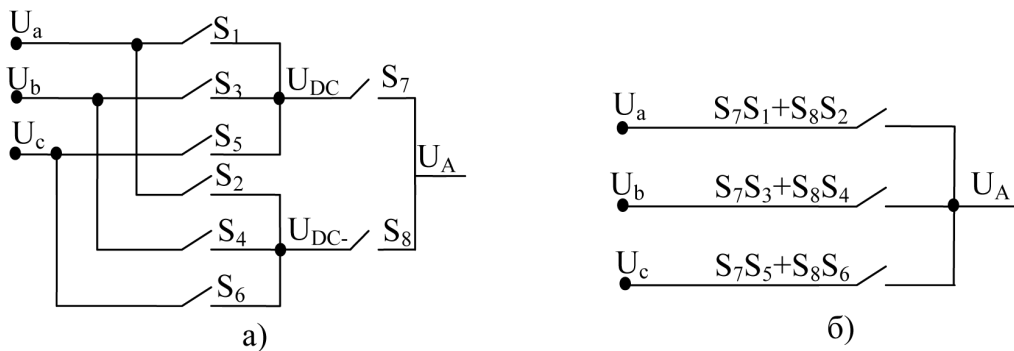


Рисунок 6. Схема замещения фазы А МПЧ

Коэффициенты модуляции могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{aligned}
 d_\gamma d_\alpha &= \frac{2|U_0|}{\sqrt{3}|U_i|} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \Delta_v\right) \sin\left(\frac{\pi}{3} - \Delta_i\right) \\
 d_\delta d_\alpha &= \frac{2|U_0|}{\sqrt{3}|U_i|} \sin(\Delta_i) \sin\left(\frac{\pi}{3} - \Delta_i\right) , \quad (5) \\
 d_\gamma d_\beta &= \frac{2|U_0|}{\sqrt{3}|U_i|} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \Delta_v\right) \sin(\Delta_v) \\
 d_\delta d_\beta &= \frac{2|U_0|}{\sqrt{3}|U_i|} \sin(\Delta_v) \sin(\Delta_i)
 \end{aligned}$$

Эти коэффициенты могут быть рассчитаны для всех фаз МПЧ. Из представленных уравнений можно сделать вывод, что максимальное передаточное отношение для МИ равно  $\frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866$ .

Последовательность формирования базовых векторов тока МПЧ должна строиться следующим образом:

– выпрямителя:

$$I_\gamma \rightarrow I_\delta \rightarrow I_0 \rightarrow I_\delta \rightarrow I_\gamma$$

– инвертора:

$$U_a \rightarrow U_\beta \rightarrow U_0 \rightarrow U_\beta \rightarrow U_a$$

В МПЧ выходные напряжения должны формироваться в девять шагов:

– если сумма  $NV + Ni$  имеет нечетное значение, то

$$\alpha\gamma - \beta\gamma - \beta\delta - \alpha\delta - 0 - \alpha\delta - \beta\delta - \beta\gamma - \alpha\gamma$$

– если сумма  $NV + Ni$  имеет четное значение

$$\beta\gamma - \alpha\gamma - \alpha\delta - \beta\delta - 0 - \beta\delta - \alpha\delta - \alpha\gamma - \beta\gamma .$$

Порядок формирования векторов выходного напряжения для всех секторов фазовой плоскости (рис. 4 и 5) представлен в таблице 1.

### Результаты моделирования

Для исследования эффективности использования косвенного метода модуляции матричного преобразователя частоты выполнялось имитационное моделирование в MatLab.

Схема имитационной модели представлена на рисунке 7. Имитационная модель имеет следующие параметры: входное напряжение 220 В, 50 Гц, сопротивление нагрузки  $R = 2$  Ом, индуктивность  $L = 10$  мкН.

Таблица 1. Порядок формирования векторов выходного напряжения МПЧ

Сектор напряжения и тока $N_V-N_i$	Комбинация переключателя и переключатель					Порядок переключения
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_0$	
U1-I6	abb	aab	aac	acc	ccc	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$
U2-I6	bab	aab	aac	cac	ccc	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U3-I6	bab	baa	caa	cac	ccc	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta\delta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$
U4-I6	bba	baa	caa	cca	ccc	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U5-I6	bba	aba	aca	cca	ccc	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta\delta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$
U6-I6	abb	aba	aca	acc	ccc	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U1-I1	aac	acc	bcc	bbc	bbb	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U2-I1	aac	cac	cbc	bbc	bbb	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta\delta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$
U3-I1	caa	cac	cbc	cbb	bbb	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U4-I1	caa	cca	ccb	cbb	bbb	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta\delta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$
U5-I1	aca	cca	ccb	beb	bbb	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U6-I1	aca	acc	bcc	beb	bbb	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta\delta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$
U1-I2	bcc	bbc	bba	baa	aaa	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta\delta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$
U2-I2	cbc	bbc	bba	aba	aaa	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U3-I2	cbc	cbb	abb	aba	aaa	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta\delta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$
U4-I2	ccb	cbb	abb	aab	aaa	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U5-I2	ccb	beb	bab	aab	aaa	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta\delta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$
U6-I2	bcc	beb	bab	baa	aaa	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U1-I3	bba	baa	caa	cca	ccc	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U2-I3	bba	aba	aca	cca	ccc	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta\delta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$
U3-I3	abb	aba	aca	acc	ccc	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U4-I3	abb	aab	aac	acc	ccc	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta\delta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$
U5-I3	bab	aab	aac	cac	ccc	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U6-I3	bab	baa	caa	cac	ccc	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta\delta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$
U1-I4	caa	cca	ccb	cbb	bbb	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta\delta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$
U2-I4	aca	cca	ccb	beb	bbb	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U3-I4	aca	acc	bcc	beb	bbb	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta\delta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$
U4-I4	aac	acc	bcc	bbc	bbb	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U5-I4	aac	cac	cbc	bbc	bbb	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta\delta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$
U6-I4	caa	cac	cbc	cbb	bbb	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U1-I5	ccb	cbb	abb	aab	aaa	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U2-I5	ccb	beb	bab	aab	aaa	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta\delta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$
U3-I5	bcc	beb	bab	baa	aaa	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U4-I5	bcc	bbc	bba	baa	aaa	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta\delta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$
U5-I5	cbc	bbc	bba	aba	aaa	$\beta\gamma-\alpha\gamma-\alpha\delta-\beta\delta-0-0-\beta\delta-\alpha\delta-\alpha\gamma-\beta\gamma$
U6-I5	cbc	cbb	abb	aba	aaa	$\alpha\gamma-\beta\gamma-\beta\delta-\alpha\delta-0-0-\alpha\delta-\beta\delta-\beta\gamma-\alpha\gamma$

Результаты имитационного моделирования представлены на:

– рис. 8: входные протяжение и ток одной фазы матричного преобразователя;

– рис. 9: выходные протяжение и ток одной фазы нагрузки матричного преобразователя;

– рис. 10: входные протяжение и ток одной фазы сети при установке на входе матрич-

ного преобразователя сетевого фильтро-компенсирующего устройства;

– рис. 11: спектрограмма выходного напряжения матричного преобразователя.

Анализ результатов моделирования показывает, что входной ток инвертора имеет импульсную форму, почти идентичную входному напряжению. Входной ток и напряжения синфазны, а использование сетевого

фильтра позволят добиться единичного коэффициента мощности сети.

### Выводы

Метод косвенной модуляции обеспечивает полное управление переменными МПЧ.

Однако требует деления преобразователя частоты на два отдельных выпрямителя и инвертора для обеспечения контроля входного тока и выходного напряжения.

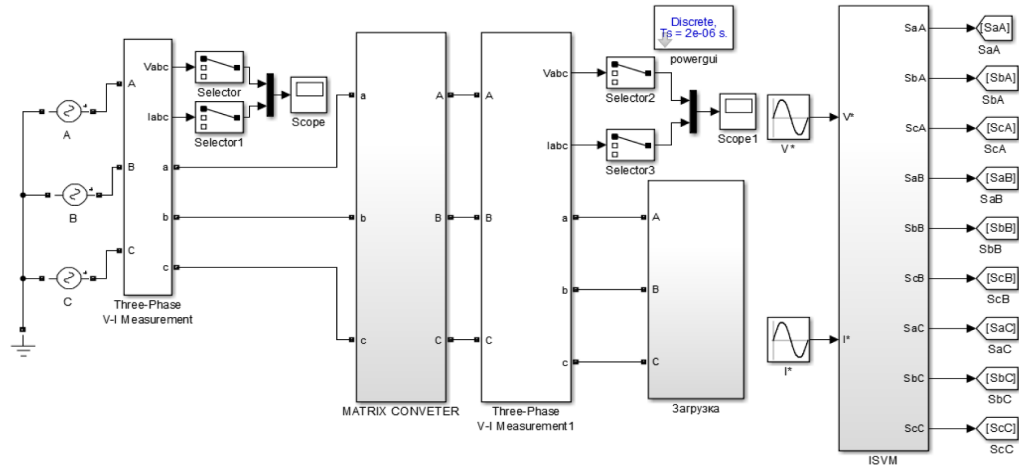


Рисунок 7. Схема моделирования для ISVM

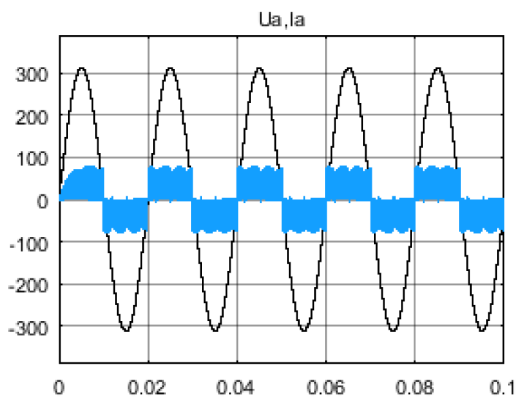


Рисунок 8. Напряжение и ток на входной МПЧ

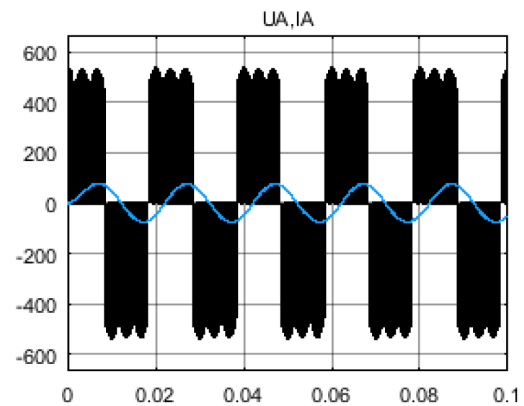


Рисунок 9. Напряжение и ток при нагрузке

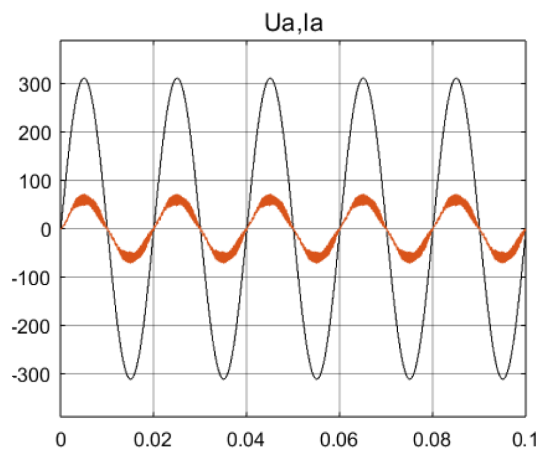


Рисунок 10. Напряжение и ток сети

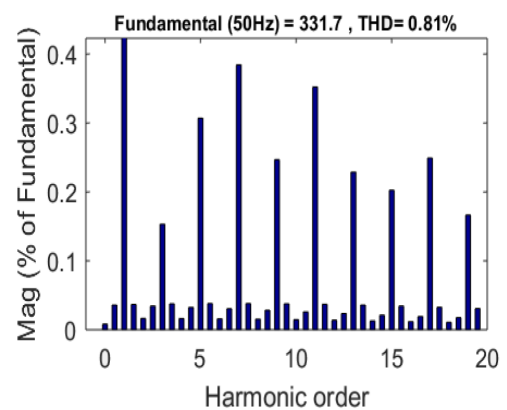


Рисунок 11. Коэффициент искажения напряжения на выходе

**Список литературы**

1. Аракелян А.К., Кокорин Н.В., Моделирование матричного преобразователя // Труды академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2009. - № 1. - С. 47-52.
2. Сидоров С.Н. Матричный преобразователь частоты объект скалярного управления // Силовая электроника. – 2009. - № 3.
3. Аракелян А.К., Кокорин Н.В. Анализ устойчивости системы с матричным преобразователем частоты и входным фильтром // Электричество. – 2010. - № 1. – С. 43-47.
4. Larsen K.B., Jorgensen A.H., Helle L., Blaabjerg F. Analysis of symmetrical pulse width modulation strategies for matrix converters. IEEE 33rd Annual, 2002. – vol. 2. – P. 899-904.
5. Satheesh G., Chamdranth Naidu, Priyanka P. Modelling of matrix converter based on venturini modulation scheme. IJAICT, 2017. – vol. 3, Issue: 11. – P. 1197–1205.
6. Аракелян А.К., Кокорин Н.В. Комбинированный алгоритм безопасной коммутации ключей матричного преобразователя // Электричество. – 2009. - № 11. – С. 52-56.
7. Климов В.Н., Климова С.В. Двухнаправленные ключи в матричных структурах преобразователей переменного тока // Силовая электроника. – 2008. - № 4. – С. 20-24.

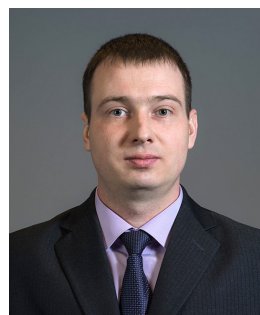
**References**

1. Arakeljan A.K., Kokorin N.V. Modelirovanije matrichnogo preobrazovatelja // Trudy akademii elektrotehnicheskikh nauk Chuvashskoj Respubliki. – 2009. - № 1. – P. 47-52.
2. Sidorov S.N. Matrichnyj preobrazovatel' chastoty objekt skaljarnogo upravlenija // Silovaja elektronika. – 2009. - № 3.
3. Arakeljan A.K., Kokorin N.V. Analiz ustojchivosti sistemy s matrichnym preobrazovatelem chastoty i vhodnym fil'trom // Elektrichestvo. – 2010. - № 1. - P. 43-47.
4. Larsen K.B., Jorgensen A.H., Helle L., Blaabjerg F. Analysis of symmetrical pulse width modulation strategies for matrix converters. IEEE 33rd Annual, 2002. – vol. 2. – P. 899-904.
5. Satheesh G., Chamdranth Naidu, Priyanka P. Modelling of matrix converter based on venturini modulation scheme. IJAICT, 2017. – vol. 3, Issue: 11. – P. 1197–1205.
6. Arakeljan A.K., Kokorin N.V. Kombinirovannyj algoritm bezopasnoj kommutacii kljuchej matrichnogo preobrazovatelja // Elektrichestvo. – 2009. - № 11. – P. 52-56.
7. Klimov V.N., Klimova S.V. Dvunapravlennyje kljuchi v matrichnyh strukturah preobrazovatelej peremennogo toka // Silovaja elektronika. – 2008. - № 4. – P. 20-24.



**Поспелов А.С.**  
**Pospelov A.S.**

*бакалавр, студент кафедры  
«Автомобильного транспорта,  
строительных и дорожных машин»  
(АТСиДМ), строительный институт,  
Тюменский индустриальный университет,  
г. Тюмень,  
Российская Федерация*



**Дмитриев А.А.**  
**Dmitriev A.A.**

*кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Автомобильного  
транспорта, строительных и дорожных  
машин» (АТСиДМ), строительный  
институт, Тюменский индустриальный  
университет,  
г. Тюмень,  
Российская Федерация*

УДК 681.58

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-2-34-40

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЗАГОРОДНОГО ДОМА ИЛИ КОТТЕДЖА**

В статье рассмотрен вопрос снижения финансовых затрат на оплату электроэнергии в типовом частном загородном доме. В публикации приводится анализ затрат электроэнергии по каждой системе жизнеобеспечения частного дома, таких как электроотопление, электроподогрев воды, освещение жилых помещений, кроме того, рассмотрен вопрос утечки электроэнергии при эксплуатации бытовых приборов. В каждой системе жизнеобеспечения выявлены случаи нерационального использования электроэнергии.

В статье приводится краткое описание методов по решению данной проблемы.

Для оптимизации затрат на потребление электроэнергии предлагается концепция модели системы автоматизированного электроснабжения. Для эффективного электроснабжения система реализует в себе методы экономии электроэнергии, которые исследуются в работе. Приводится концептуальное описание её архитектуры, маркетинговая часть проекта и обоснование срока окупаемости проекта.

В конце статьи приводятся выводы о результатах работы с указанием базы, в качестве которой может послужить данная работа, для других исследований схожего класса проблем.

**Ключевые слова:** электроснабжение, электроэнергия, частный дом, умный дом, автоматизированная система управления, открытая архитектура систем.

## **IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE POWER SUPPLY SYSTEM OF A COUNTRY HOUSE OR COTTAGE**

The article deals with the issue of reducing the financial cost of electricity in a typical private country house. The publication provides an analysis of the cost of electricity for each life support system of a private house, such as electric heating, electric water heating, lighting of residential



premises, in addition, the issue of electricity leakage in the operation of household appliances. In each system of life support cases of irrational use of the electric power are revealed.

The article provides a brief description of the methods to solve this problem.

To optimize the cost of electricity consumption, the concept of a model of an automated power supply system is proposed. For efficient power supply, the system implements methods of energy saving, which are studied in the work. The conceptual description of its architecture, marketing part of the project and justification of the payback period of the project are given.

At the end of the article the conclusions about the results of the work with the indication of the base, as which this work can serve, for other studies of a similar class of problems are given.

**Key words:** power supply, electricity, private house, smart house, automated control system, open architecture of systems.

Развитие коттеджной и поселковой застройки в последние годы приобретает все более массовый характер. Законодательная возможность получения прописки в частном доме, построенном в границах любого населенного пункта, льготные тарифы на коммунальные услуги привлекают в этот сегмент все большее количество желающих. Однако не всегда данные районы обеспечены всей необходимой инженерной инфраструктурой: централизованным газо- и теплоснабжением. В случае отсутствия таких ресурсов им на замену приходит электроэнергия. Именно такие дома, не имеющие стационарной газификации, а только лишь электроснабжение, и являются предметом проводимого в данной статье исследования.

Для массовой и централизованной застройки применяются различные расчетные нормативы, определяющие расчетную мощность, потребляемую одним частным домом. В случае, когда речь идет об индивидуальном частном доме, установленная электрическая мощность для него выше, по сути ограничена формально рамками льготного технологического присоединения – 15 кВт [1]. При этом собственник частного дома устанавливает то количество энергопринимающих устройств, которое считает комфортным для своего проживания. В таких домах часто электроэнергия расходуется на электроподогрев воды и электроотопление, на освещение дворовой территории, подсобных построек, автоматический полив газона и т.д. Как результат, потребитель частного дома повышает количество потребляемой электроэнергии, что при ежегодном росте тарифов приводит к увеличению стоимости содержания и эксплуатации такого дома.

Для снижения расходов на оплату потребляемой электроэнергии уже существуют некоторые решения: от использования энергосберегающих бытовых и осветительных приборов до комплексных систем домашней автоматизации (системы «Умный дом») [2]. Использование энергосберегающих приборов отчасти помогает решить проблему, а вот внедрение и эксплуатация комплексных систем «Умный дом», как правило, является весьма дорогостоящим, т.к. предлагается в виде комплексного инженерного решения «под ключ».

Для решения данной проблемы предлагается автоматизированная система электроснабжения, которая сочетает в себе принципы архитектуры «Умный дом», при этом являясь бюджетным решением поставленной проблемы, доступной среднестатистическому потребителю [3].

Низкая стоимость системы обеспечивается за счет открытой архитектуры и использования простых, но функциональных и качественных компонентов.

В качестве основной цели исследования выступает разработка прототипа системы автоматизированного электроснабжения частного дома для снижения расходов на электроэнергию. В ходе данного исследования решается ряд задач, таких как: разработка методов экономии электроэнергии, разработка проекта программно-аппаратной архитектуры прототипа системы, тестирование разработанного прототипа и обоснование его экономической эффективности.

Для проведения исследования был принят типовой частный загородный одноэтажный дом коттеджного типа общей площадью

помещений: 177,4 м<sup>2</sup> (в том числе погреб: 14,6 м<sup>2</sup>; терраса 18,2 м<sup>2</sup>). Высота потолка: 2,7 м, число жилых помещений – 10, система отопления помещений – электрическая, источники освещения – светодиодные светильники, горячее водоснабжение – с помощью электронагревателей.

Изначально был проведен анализ информации о принципах работы, энергопотреблении и архитектуре построения каждой домашней системы жизнеобеспечения, таких как электроотопление, электроподогрев воды, освещение жилых помещений, сбор информации о построении архитектуры систем «Умный дом».

Дальнейший расчет показателей электроснабжения систем жизнеобеспечения позволил сформировать структуру финансовых затрат, на основе которой был сделан вывод, какую из домашних систем целесообразно подвергнуть оптимизации потребления энергоресурсов.

После определения первичного бюджета проекта необходимо запроектировать и реа-

лизировать прототип системы автоматизированного электроснабжения [4].

В ходе дальнейших исследований планируется организация анкетирования потребителей частных домов с целью корректировки бюджета проекта и наполнения его необходимым функционалом.

В ходе исследования были выявлены следующие системы жизнеобеспечения, которые целесообразно подвергать автоматизации с целью сокращения объема потребления электроэнергии. Такими системами являются: 1) система электроотопления; 2) система электроподогрева воды для целей горячего водоснабжения; 3) система освещения; 4) система электроснабжения бытовых приборов.

В результате расчета потребления электроэнергии в типовом расчетном коттедже были выявлены доли объема потребления электроэнергии домашними системами жизнеобеспечения (рис. 1).

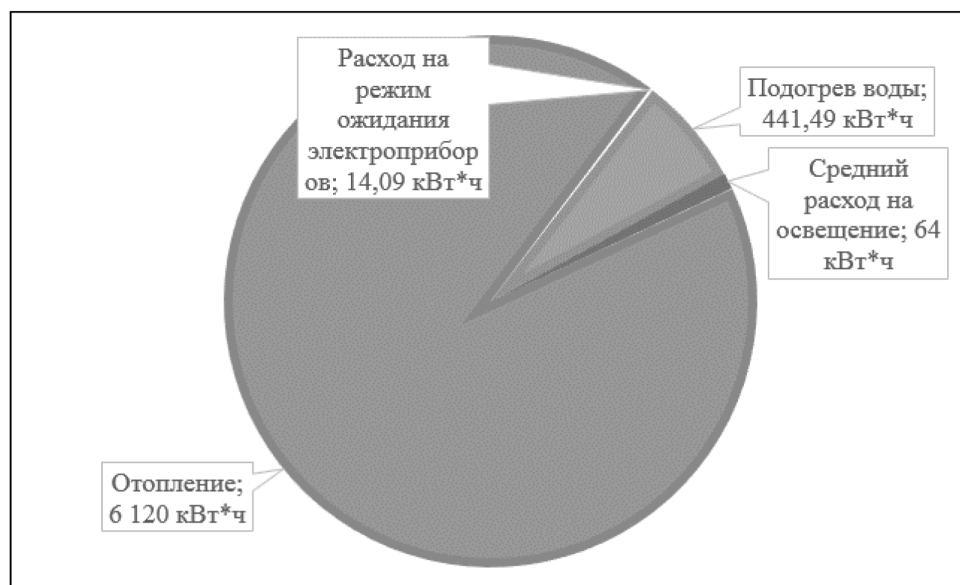


Рисунок 1. Объем потребления электроэнергии различными системами, кВт\*ч

Данные результаты отображают месячный объем потребления электроэнергии (кВт\*ч) в холодное время года. В этот период счета на оплату электроэнергии для потребителя будут самыми высокими [5].

Из представленной диаграммы видно, что самой энергозатратной является система электроотопления.

При анализе статистики работы электрических систем отопления в частных домах

было установлено, что часть энергии в такой системе тратится впустую: 1) системы отопления, как правило, не отключают на период отсутствия людей в доме; 2) в электродкотлах часто отсутствует настройка сценарного режима управления отоплением [6].

При реализации предлагаемых нами методов экономии электроэнергии для системы отопления будет преобладать сценарный алгоритм управления, в основе которого

лежит заранее предписанная совокупность действий, выполняемая при наступлении определённых условий. Так, например, в вечернее время суток система будет повышать температуру отопления, а в дневные часы – снижать.

Аналогичный тип управления подразумевается у системы электроподогрева воды.

Энергоэффективность системы освещения любого дома имеет значительный недостаток – человеческий фактор. Часто потребители

оставляют светильники включенными в помещениях, в которых данный момент не находятся, забывают отключить освещение, уходя из дома.

Для определения необходимого количества устанавливаемых в помещениях светильников была выполнена трехмерная модель коттеджа, впоследствии на которой в программном обеспечении «DIALux Evo» производились расчеты (рис. 2).

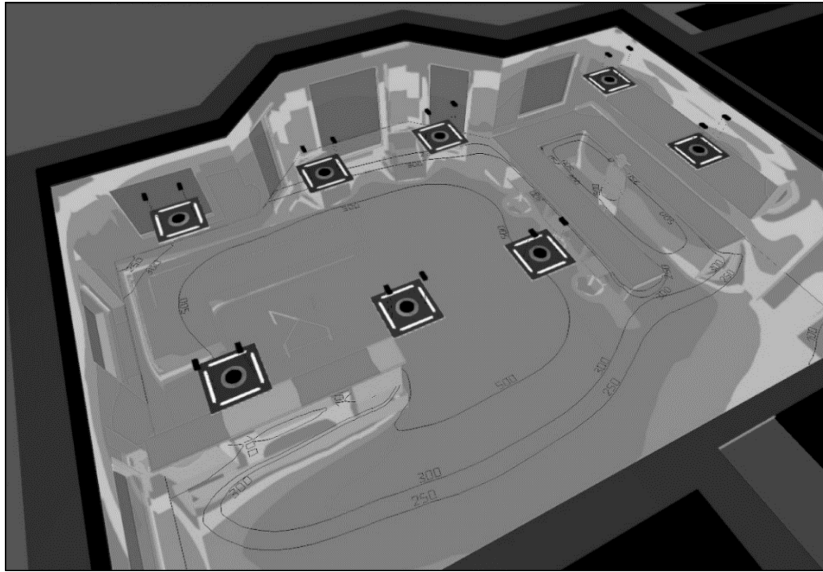


Рисунок 2. Сцена освещения кухонного помещения коттеджа

В результате расчетов были получены следующие параметры светильников, рекомендуемых к эксплуатации в типовом расчетном коттедже: 1) тип светильников: панельные; 2) тип источника света: светодиодный; 3) мощность каждого светильника: 42 Вт.

На основе полученных результатов в программе «DIALux Evo» был произведен расчет и получены данные об оптимальном расходе электроэнергии на освещение жилых помещений типового расчетного коттеджа (рис. 3).

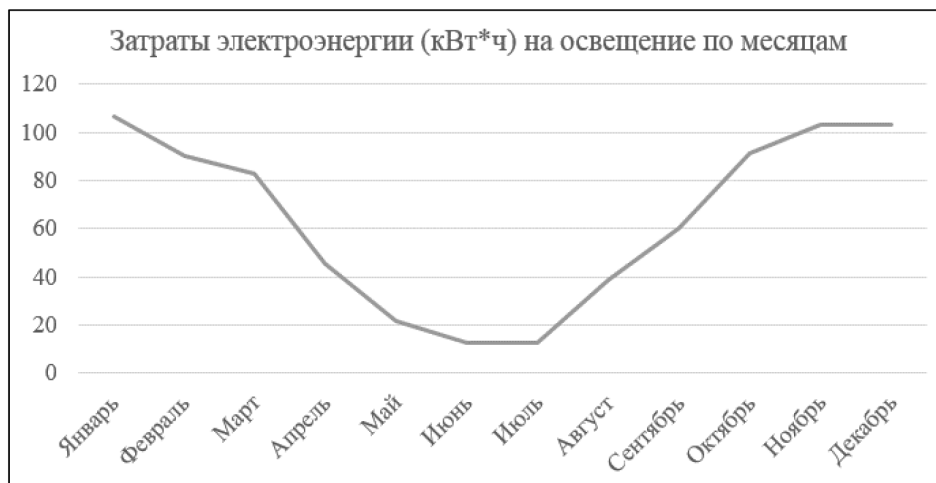


Рисунок 3. График оптимального электропотребления по месяцам года на освещение в типовом расчетном коттедже

Полученные расчеты служат ориентиром в реализации алгоритма управления системой освещения коттеджа. Расчетная экономическая эффективность должна незначительно превышать стоимость освещения по месяцам в условиях, используемых в расчетах.

При анализе системы электроснабжения и эксплуатации бытовых приборов было выявлено, что потребители почти всегда оставляют электроприборы в режиме ожидания. Это означает, что прибор не отключают от

сети питания, при этом электроприбор не выполняет своих функций. Так, например, все электроприборы, в которых имеются трансформаторы, будут потреблять электроэнергию в режиме ожидания.

В ходе анализа потребления электроэнергии приборами в режиме ожидания были получены доли расходов электроэнергии на данный режим (рис. 4).



**Рисунок 4.** Расход электроэнергии бытовыми приборами в режиме ожидания, Вт

Данные расходы составляют приблизительно 5 % от общего объема энергопотребления, но с целью повышения энергоэффективности всей системы электроснабжения такие непроизводительные потери необходимо устранить. Это возможно с помощью сценарного управления электроснабжением.

Архитектура автоматизированной системы управления электроснабжением строится по типу системы «Умный дом». Управляющим элементом такой системы является контрол-

лер управления, в роли которого выступает одноплатный компьютер «Raspberry Pi3». Контроллер собирает информацию с датчиков, которые регистрируют физическое воздействие (например, температуру воздуха в помещении, освещенность от естественного освещения) и на основе полученной информации производит управляющее воздействие на исполнительные механизмы (рис. 5).



**Рисунок 5.** Архитектура управляющего компонента системы



Интерфейсом управления и сбора информации в такой системе выступает персональный компьютер (веб-сервер). Контроллер управления передает данные, характеризующие текущее состояние системы электрообеспечения, на веб-сервер. Клиентское приложение, получив данные, интерпретирует их в мнемосхему, по которой потребитель сможет увидеть текущее состояние работы той или иной системы жизнеобеспечения. Потребитель также может производить настройки системы, после чего данные о настройках передаются на контроллер.

Возможно отслеживание состояния системы как напрямую через веб-сервер, так и удаленно – через любое устройство, имеющее доступ в сеть Интернет.

Прототип системы автоматизированного электрообеспечения должен позволять позиционировать реальную систему на рынке как комплект для самостоятельной сборки с воз-

можностью привлечения квалифицированных специалистов.

Стоимость готового решения должна позволить окупить финансовые расходы не больше, чем за 5 лет. Выбор такого срока окупаемости был произведен с учетом окупаемости европейских аналогов, что обеспечивает конкурентоспособность предлагаемой системы «Умный дом».

Исследовательская часть данной работы позволяет получить методы экономии электроэнергии, которые пригодны в реализации автоматизированных систем управления (АСУ).

Разработанная архитектура системы управления электрообеспечением будет являться базой для примеров работ по проектированию бюджетных АСУ с открытым типом архитектуры.

### Список литературы

1. Постановление Правительства РФ от 27.12.2004 N 861 (ред. от 21.12.2018). «Об утверждении Правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам по оперативно-диспетчерскому управлению в электроэнергетике и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам администратора торговой системы оптового рынка и оказания этих услуг и Правил технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству электрической энергии, а также объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих сетевым организациям и иным лицам, к электрическим сетям» // СПС Консультант Плюс. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_51030/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51030/) (дата обращения: 21.01.19).

2. Бадьин Г.М. Строительство и реконструкция малоэтажного энергоэффективного дома. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.: ил. + CD-ROM – (Строительство и архитектура).

3. Тесля Е.В. «Умный дом» своими руками. Строим интеллектуальную цифровую систему в своей квартире (+CD). – СПб.: Питер, 2010. – 219 с.: ил.

4. Грачева М.В., Бабаскин С.Я. Управление проектами: учеб. пособие. – М.: Экономический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2017. – 148 с.

5. Мусин А.Х., Мозоль В.И. Сбыт электроэнергии: учебное пособие для бакалавров. – Электрон., дан. и прогр. – Барнаул: МЦ ЭОР, 2016.

6. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2010. – 456 с.: ил.

### References

1. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 27.12.2004 N 861 (red. ot 21.12.2018). "Ob utverzhdenii Pravil nediskriminacionnogo dostupa k uslugam po peredache elektricheskoy energii i okazaniya etih uslug, Pravil nediskriminacionnogo dostupa k uslugam po operativno-dispetcherskomu upravleniju v elektroenergetike i okazaniya etih uslug, Pravil nediskriminacionnogo dostupa k uslugam administratora torgovoj sistemy optovogo rynka i okazaniya etih uslug i Pravil tehnologicheskogo prisoedinenija energoprinimajushhijh ustrojstv potrebitelej elektricheskoy energii, obojktov po proizvodstvu elektricheskoy energii, a takzhe objektiv elektrosetevogo hozjajstva, prinallezhashhijh setevym organizacijam i inym



licam, k elektricheskim setjam" // SPS Konsul'tant Pljus. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_51030/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51030/) (data obrashhenija: 21.01.19).

2. Bad'in G.M. Stroitel'stvo i rekonstrukcija maloetazhnogo energoeffektivnogo doma. – SPb.: BHV-Peterburg, 2012. – 432 s.: il. + CD-ROM – (Stroitel'stvo i arhitektura).

3. Teslja E.V. «Umnyj dom» svoimi rukami. Stroim intellektual'nuju cifrovuju sistemu v svojej kvartire (+CD). – SPb.: Piter, 2010. – 219 p.: il.

4. Gracheva M.V., Babaskin S.Ja. Upravljenje proektami: ucheb. posobije. – M.:

Ekonomicheskij fakul'tet MGU im. M.V. Lomonosova, 2017. – 148 p.

5. Musin A.H. Sbyt elektroenergii: uchebnoje posobije dlja bakalavrov / A.H. Musin, V.I. Mozol'. – Elektron., dan. i progr. – Barnaul: MC JeOR, 2016.

6. Zhelezko Ju.S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaja moshhnost'. Kachestvo elektroenergii: Rukovodstvo dlja prakticheskikh raschetov. – M.: JeNAS, 2010. – 456 p.: il.



**Шабанов В.А.**  
**Shabanov V.A.**

*профессор, канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация*



**Путинцева А.А.**  
**Putintseva A.A.**

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



**Резник Е.С.**  
**Reznik E.S.**

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



**Васильев П.И.**  
**Vasilyev P.I.**

*студент, Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 621.316

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-2-41-49

## **СОГЛАСОВАНИЕ ТОКОВОЙ ОТСЕЧКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ЗАЩИТОЙ МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ И МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТОЙ ВВОДНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ**

На объектах нефтегазовой отрасли широко применяются высоковольтные асинхронные электродвигатели мощностью до 8 МВт и синхронные электродвигатели мощностью до 12,5 МВт. Такие двигатели используются для привода магистральных насосов на нефтеперекачивающих насосных станциях трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов и для привода компрессорных агрегатов на электроприводных компрессорных станциях. Насосные и компрессорные станции магистральных трубопроводов предъявляют повышенные требования к бесперебойности технологического процесса. Для сохранения устойчиво-

сти и непрерывности технологического процесса релейная защита электродвигателей должна не только обладать достаточной чувствительностью и быстродействием при внутренних повреждениях, но и согласованно действовать с устройствами релейной защиты и автоматики распределительного устройства нефтеперекачивающей станции.

В статье исследуются проблемы согласования зон действия токовой отсечки асинхронного электродвигателя с защитой минимального напряжения и максимальной токовой защитой, устанавливаемой на выключателях ввода распределительных устройств 6 (10) кВ.

На основе анализа условий согласования установлено, что для обеспечения селективности токовой отсечки электродвигателя максимальной токовой защиты ввода и защиты минимального напряжения должны выполняться следующие условия: зона действия максимальной токовой защиты ввода должна быть больше зоны действия токовой отсечки, и зона действия токовой отсечки должна превышать зону действия защиты минимального напряжения, или зона действия максимальной токовой защиты ввода должна быть больше зоны действия защиты минимального напряжения, если второе условие не выполняется.

Получены условия согласования зон действия защит, и предложены мероприятия для выполнения условий согласования зон действия защит.

**Ключевые слова:** релейная защита, электродвигатель, токовая отсечка, максимальная токовая защита, защита минимального напряжения, зона действия защиты, согласование зон действия, математическое моделирование.

## COORDINATION OF ELECTRIC MOTOR CUTOFF WITH UNDER-VOLTAGE PROTECTION AND MAIN CIRCUIT BREAKER'S OVER CURRENT PROTECTION

High-voltage asynchronous motors with power up to 8 MW and synchronous motors with power up to 12,5 MW find wide application on objects of oil and gas industry. Such motors are used for the main line pump drive of oil pumping stations of pipeline transport of oil and oil products and for drive of compressor units at electrically driven compressor stations. Pumping and compressor stations of the main pipelines impose increased requirements to continuity of technological process. For retention of stability and the continuity of technological process electric motor relay protection has to not only have sufficient sensitivity and fast release at internal faults, but also to work in coordination with devices of relay protection and automatic equipment of the distributing gear of the oil pumping station.

Problems of coordination of operating zone of a asynchronous electric motor cutoff with under-voltage protection and main circuit breaker's overcurrent protection of distributing gears of 6 (10) kV are investigated in article.

On the basis of the analysis of coordination conditions it is established that for ensuring selectivity of a electric motor current cutoff, main circuit breaker's overcurrent protection and under-voltage protection the following conditions have to be satisfied: the operating zone of main circuit breaker's overcurrent protection has to be more operating zone of a current cutoff, and the operating zone of a current cutoff has to exceed an operating zone of under-voltage protection or the operating zone of main circuit breaker's overcurrent protection has to be more operating zone of under-voltage protection if the second condition is not satisfied.

Coordination conditions of protection's operating zone have been received and actions for performance of coordination conditions of protection's operating zone have been offered.

**Key words:** relay protection, electric motor, cutoff, overcurrent protection, under-voltage protection, protection's operating zone, coordination of operating zones, mathematic simulation.

## Введение

На объектах бурения, добычи и транспорта нефти и газа широко применяются высоковольтные асинхронные и синхронные электродвигатели (ЭД) [1, 2]. Мощность, потребляемая высоковольтными двигателями на предприятиях нефтегазовой отрасли, составляет до 95 % от всей потребляемой предприятием мощности. На нефтеперекачивающих насосных станциях трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов высоковольтные двигатели используются для привода магистральных и подпорных насосов. Для сохранения непрерывности технологического процесса перекачки релейная защита ЭД должна не только обладать достаточной чувствительностью и быстродействием при внутренних повреждениях, но и согласованно действовать с устройствами релейной защиты и автоматики распределительного устройства [3-5]. В статье исследуются проблемы согласования токовой отсечки (ТО) ЭД с защитой минимального напряжения (ЗМН) и максимальной токовой защитой (МТЗ), устанавливаемой на выключателях ввода распределительных устройств 6 (10) кВ.

### Актуальность согласования ТО с другими защитами

Для защиты ЭД при внутренних межфазных коротких замыканиях (КЗ) используются дифференциальные защиты и ТО, действующие на отключение ЭД без выдержки времени. При этом для ЭД мощностью до 2 МВт ТО является основной защитой, а для ЭД мощностью от 2 до 5 МВт используется в качестве основной защиты, если она обладает достаточной чувствительностью. К недостаткам ТО относится большой ток срабатывания, обусловленный необходимостью отстройки от пускового тока ЭД [6, 7]. Из-за большого тока срабатывания, который может быть соизмерим с токами КЗ, отсечка защищает только часть обмотки статора.

При КЗ в обмотке статора может срабатывать не только ТО, но и МТЗ, устанавливаемая на вводном выключателе ЗРУ-6 (10) кВ (далее «МТЗ ввода»). Основным назначением МТЗ ввода является защита шин 6 (10) кВ. Кроме того, МТЗ ввода выполняет функции дальнего резервирования защит ЭД и отходящих линий и используется для блокирования

ЗМН при КЗ в сети предприятия, когда ток КЗ по вводу протекает от питающей сети к шинам. Чувствительность МТЗ ввода проверяется по току КЗ на шинах, а ток срабатывания отстраивается от тока самозапуска.

Для эффективного выполнения функции блокирования зона действия МТЗ ввода должна быть больше зоны действия ЗМН при КЗ на любом из отходящих присоединений, в том числе и в двигателе. Однако в ряде режимов это требование не выполняется, и ЗМН может ложно срабатывать [8, 9]. При этом после отключения вводного выключателя от ЗМН происходит пуск схемы автоматического включения резерва (АВР) с последующим включением секционного выключателя на неустранённое КЗ. Особенно опасно включение АВР на неустранённое КЗ внутри двигателя, т.к. такое включение может привести к развитию аварии и выходу двигателя из строя на длительный срок. Таким образом, согласование зоны действия ТО электродвигателя с МТЗ ввода и ЗМН при КЗ в обмотке статора ЭД является актуальной задачей.

### Метод исследования

Для исследования устройств релейной защиты и автоматики широко используется математическое моделирование [10-12]. Структурная схема математической модели электрической сети и исследуемых защит приведена на рисунке 1.

Математическая модель содержит блок моделей электрической сети, блок моделей релейной защиты и блок определения зон действия защит. Рассмотрим работу математической модели и анализ согласования ТО, МТЗ ввода и ЗМН на примере схемы электрооборудования нефтеперекачивающей станции при двухсекционном распределительном устройстве (рис. 2).

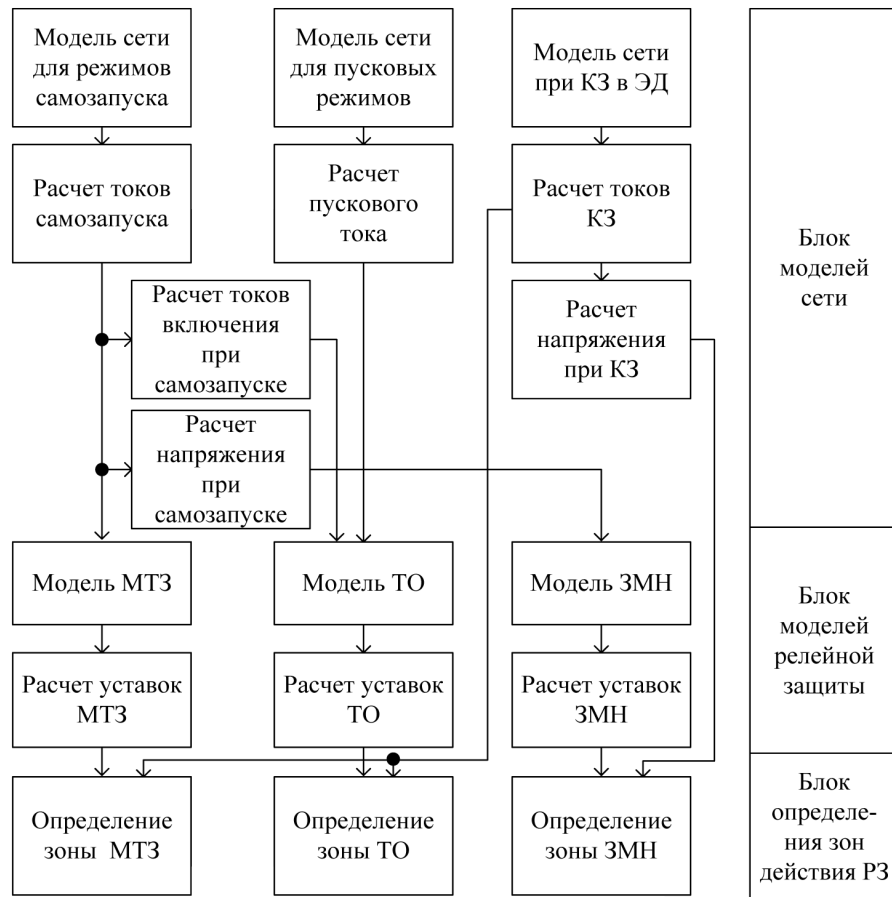


Рисунок 1. Структурная схема математической модели

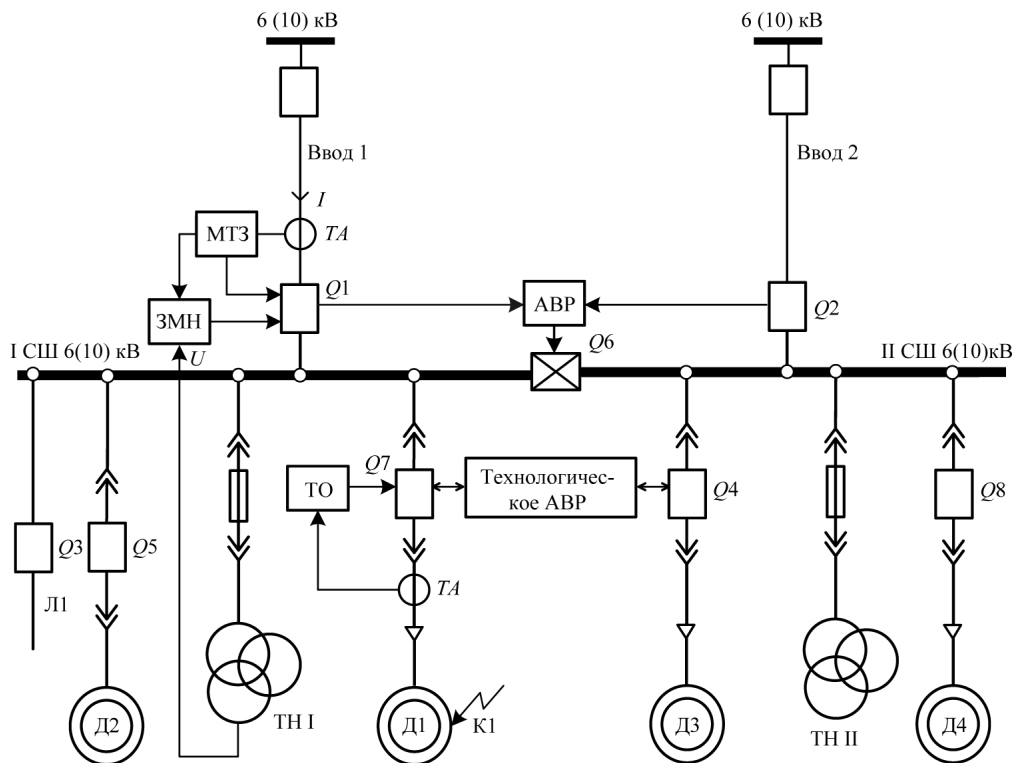


Рисунок 2. Схема распределительного устройства 6 (10) кВ



В блоке моделей электрической сети определяются пусковой ток ЭД  $I_{\text{пуск}}$ , напряжение на шинах 6 (10) кВ при самозапуске  $U_{\text{сзп}}$ , ток ввода в режиме самозапуска  $I_{\text{сзп}}$ , ток включения, протекающий по обмотке статора в начальный момент самозапуска, ток  $I_{\text{кз}}$  при КЗ в обмотке статора (в точке К1), напряжение на шинах при КЗ в обмотке статора  $U_{\text{ш}}$ . При распределительном устройстве по рисунку 2 в модели электрической сети используются следующие выражения:

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{с}}}{X_{\text{с}} + X_{\text{п.ЭД}}}, \quad (1)$$

$$U_{\text{сзп}} = U_{\text{с}} \cdot \frac{X_{\text{э}}}{X_{\text{с}} + X_{\text{э}}}, \quad (2)$$

$$I_{\text{сзп}} = \frac{U_{\text{с}}}{X_{\text{с}} + X_{\text{э}}}, \quad (3)$$

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{с}}}{X_{\text{с}} + X_{\text{э.кз}}}, \quad (4)$$

$$U_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{с}} \cdot X_{\text{э.кз}}}{X_{\text{с}} + X_{\text{э.кз}}}, \quad (5)$$

где  $U_{\text{с}}$  – напряжение питающей сети;  $X_{\text{с}}$  – эквивалентное реактивное сопротивление питающей сети;  $X_{\text{п.ЭД}}$  – пусковое сопротивление электродвигателя;  $X_{\text{э}}$  – эквивалентное сопротивление электродвигателей, подключенных к сети после восстановления питания;  $X_{\text{э.кз}}$  – эквивалентное сопротивление обмотки статора электродвигателя от линейных выводов до точки внутреннего КЗ.

Сопротивление  $X_{\text{э.кз}}$  определяется с учетом взаимоиндукции обмотки статора до точки повреждения с короткозамкнутой частью обмотки статора и с обмоткой ротора. Методика расчета тока трехфазного КЗ в обмотке статора рассмотрена в [6, 13, 14]. В соответствии с [13], для приведенного ЭД без учета активных сопротивлений обмоток статора и ротора справедлива система уравнений:

$$\begin{cases} U_{\text{с}} = j(X_1 + X_{\text{с}})I_1 + jX_M(I_1 + I_2 + I_3) \\ 0 = jX_2I_2 + jX_M \cdot (I_1 + I_2 + I_3) \\ 0 = jX_3I_3 + jX_M \cdot (I_1 + I_2 + I_3) \end{cases}, \quad (6)$$

где  $X_1$  – индуктивное сопротивление обмотки статора до точки КЗ с числом витков  $W_1$ ;  $X_2$  и

$X_3$  – индуктивные сопротивления рассеяния обмотки ротора с числом витков  $W_2$  и обмотки статора после точки КЗ с числом витков  $W_3$  соответственно;  $X_M$  – сопротивления взаимоиндукции между обмотками и главные индуктивные сопротивления обмоток  $W_1$ ,  $W_2$  и  $W_3$ .

Решением системы уравнений (6) относительно индуктивного сопротивления обмотки статора до точки КЗ является ток КЗ по выражению (4), в котором эквивалентное сопротивление до точки КЗ равно

$$X_{\text{э.кз}} = X_1 + \frac{X_2X_3X_M}{X_2X_3 + X_2X_M + X_3X_M}. \quad (7)$$

**В блоке моделей релейных защит** определяются токи срабатывания ТО, МТЗ ввода и напряжение срабатывания ЗМН.

Ток срабатывания отсечки  $I_{\text{ТО}}$  принимается по выражению:

$$I_{\text{ТО}} = K_{\text{отс.ТО}} \cdot I_{\text{пуск}}, \quad (8)$$

где  $K_{\text{отс.ТО}}$  – коэффициент отстройки;  $I_{\text{пуск}}$  – пусковой ток по (1).

Коэффициент отстройки учитывает бросок пускового тока и бросок тока включения при самозапуске [15]. Расчетным режимом для определения тока срабатывания ТО является максимальный режим питающей сети, при котором сопротивление сети  $X_{\text{с}}$  в (1) будет наименьшим ( $X_{\text{с.мин}}$ ).

Напряжение срабатывания первой ступени ЗМН  $U_{\text{ЗМН}}$  отстраивается от напряжения на шинах при самозапуске при срабатывании АВР секционного выключателя по выражению

$$U_{\text{ЗМН}} = \frac{U_{\text{сзп}}}{K_{\text{отс.U}}}, \quad (9)$$

где  $U_{\text{сзп}}$  – напряжение самозапуска по (2);  $K_{\text{отс.U}}$  – коэффициент отстройки ЗМН, принимаемый равным 1,1 – 1,2.

Расчетными режимами для определения напряжения срабатывания ЗМН являются минимальный режим питающей сети, при котором сопротивление сети  $X_{\text{с}}$  в (2) будет наибольшим ( $X_{\text{с.макс}}$ ), и максимальный режим потребителя, при котором в самозапуске участвует наибольшее число электродвигателей. При этом эквивалентное сопротивление электродвигателей  $X_{\text{э}}$  будет наименьшим ( $X_{\text{э.мин}}$ ).

Ток срабатывания МТЗ ввода ИМТЗ принимается из условия возврата реле тока при

самозапуске после включения секционного выключателя при АВР по выражению:

$$I_{\text{МТЗ}} = K_{\text{отс.МТЗ}} \cdot I_{\text{СЗП}}. \quad (10)$$

Расчетным режимом для определения тока срабатывания МТЗ является максимальный режим питающей сети и потребителя, при котором сопротивления  $X_c$  и  $X_{\Sigma}$  в (3) будут наименьшими ( $X_{c,\text{min}}$  и  $X_{\Sigma,\text{min}}$ ).

**В блоке определения зон действия защит** определяются зоны действия ТО, МТЗ ввода и ЗМН. На границе зон действия ТО, МТЗ ввода и ЗМН выполняются, соответственно, равенства:

$$I_{\text{ТО}} = I_{\text{КЗ}}, U_{\text{ш.}} = U_{\text{ЗМН}}, I_{\text{МТЗ}} = I_{\text{КЗ}}. \quad (11)$$

Длину зоны действия защит будем определять по величине эквивалентного сопротивления обмотки статора двигателя  $X_{\Sigma}$  КЗ до точки КЗ. Для определения зоны действия ТО подставим в (11) значения токов  $I_{\text{ТО}}$  и  $I_{\text{КЗ}}$  из выражений (8) и (4). С учетом (1) получим:

$$\frac{K_{\text{отс.ТО}}}{X_{c,\text{min}} + X_{\text{п.ЭД}}} = \frac{1}{X_c + X_{\Sigma,\text{КЗ}}}.$$

Решим полученное уравнение относительно сопротивления  $X_{\Sigma,\text{КЗ}}$  до места КЗ. Обозначив его  $X_{\text{ТО}}$ , получим для зоны действия ТО:

$$X_{\text{ТО}} = \frac{X_{c,\text{min}} + X_{\text{п.ЭД}}}{K_{\text{отс.ТО}}} - X_c. \quad (12)$$

Аналогично для зон действия МТЗ ввода  $X_{\text{МТЗ}}$  и ЗМН  $X_{\text{ЗМН}}$  при подстановке (4), (5), (9) и (10) в (11) можно получить:

$$X_{\text{МТЗ}} = \frac{X_{c,\text{min}} + X_{\Sigma,\text{min}}}{K_{\text{отс.МТЗ}}} - X_c, \quad (13)$$

$$X_{\text{ЗМН}} = \frac{X_{\Sigma,\text{min}} \cdot X_c}{K_{\text{отс.У}} \cdot (X_{c,\text{max}} + X_{\Sigma,\text{min}}) - X_{\Sigma,\text{min}}}. \quad (14)$$

**Анализ условий согласования.** Выражения (12) – (14) определяют длину зон действия ТО, МТЗ и ЗМН. Токовая отсечка двигателя Д1 (рис. 2) при КЗ в обмотке статора действует на отключение выключателя Q7. В случае КЗ в обмотке статора за пределами зоны действия ТО, но в пределах зоны действия ЗМН возможно отключение выключателя Q1 ввода 1 от ЗМН. При этом происходит пуск АВР, включение секционного выключателя Q6 и подача напряжения питания на ЭД при внутреннем КЗ, что является недопустимым. Для исключения пуска АВР в случае КЗ в обмотке статора за пределами зоны действия ТО зоны действия ТО, МТЗ ввода и ЗМН должны быть согласованы. Защита минимального напряжения работает только при трехфазных КЗ. Поэтому условия согласования защит необходимо рассматривать при трехфазных КЗ.

Условие 1: при КЗ в обмотке статора зона действия МТЗ ввода по (13) должна превышать зону действия отсечки по (12). Из (12) и (13) следует, что зона действия МТЗ может быть больше, чем зона действия ТО, если

$$\frac{X_{c,\text{min}} + X_{\Sigma,\text{min}}}{K_{\text{отс.МТЗ}}} \geq \frac{X_{c,\text{min}} + X_{\text{п.ЭД}}}{K_{\text{отс.ТО}}}. \quad (15)$$

При выполнении этого условия МТЗ ввода будет резервировать ТО в пределах всей зоны действия отсечки. Если в самозапуске принимает участие один двигатель, то условие (15) принимает вид:

$$K_{\text{отс.ТО}} \geq K_{\text{отс.МТЗ}}. \quad (16)$$

Это неравенство, и, следовательно, условие 1 всегда выполняются.

Если в самозапуске участвует несколько двигателей, тогда  $X_{\Sigma,\text{min}} = X_{\text{п.ЭД}}/n$ , где  $n$  – число двигателей, и условие 1 может не выполняться.

Условие 2: зона действия отсечки по (12) должна превышать зону действия ЗМН по (14). Если это условие не выполняется, то при КЗ в ЭД за пределами зоны действия отсечки может срабатывать ЗМН с действием на отключение вводного выключателя, пуском АВР и включением секционного выключателя. Из (12) и (14) следует, что зона действия ТО больше зоны действия ЗМН, если

$$\frac{X_{c,\text{min}} + X_{\text{п.ЭД}}}{K_{\text{отс.ТО}}} - X_c \geq \frac{X_{\Sigma,\text{min}} \cdot X_c}{K_{\text{отс.У}} \cdot (X_{c,\text{max}} + X_{\Sigma,\text{min}}) - X_{\Sigma,\text{min}}} \quad (17)$$

Условие 3: если условие 2 не выполняется, то для того, чтобы при КЗ за пределами зоны действия отсечки не произошло ложного срабатывания ЗМН, зона действия МТЗ ввода по

(13) должна перекрывать зону действия ЗМН по (14). Для этого должно выполняться следующее условие согласования ЗМН и МТЗ ввода:

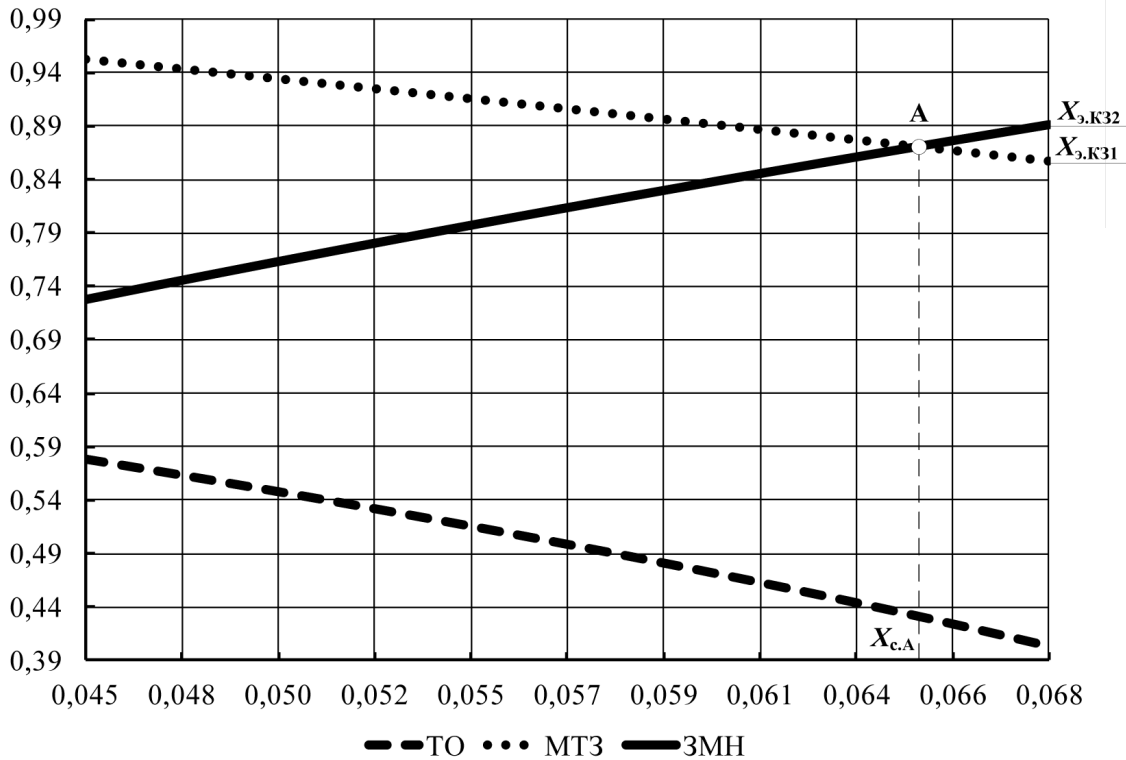
$$\frac{X_{c,\min} + X_{\varepsilon,\min}}{K_{\text{отс.МТЗ}}} - X_c \geq \frac{X_{\varepsilon,\min} \cdot X_c}{K_{\text{отс.У}} \cdot (X_{c,\max} + X_{\varepsilon,\min}) - X_{\varepsilon,\min}} \quad (18)$$

Таким образом, для обеспечения селективности ТО, МТЗ ввода и ЗМН должно выполняться условие 1 и одно из условий, 2 или 3. Проверку условий согласования и их графическую интерпретацию рассмотрим на примере.

**Пример.** К каждой секции шин 6 кВ подключены по одному электродвигателю типа

АТД-5000 номинальной мощностью 5 МВт. В относительных единицах (о.е.) номинальное сопротивление двигателя 0,577 о.е.; пусковое сопротивление  $X_{п.ЭД} = 0,178$  о.е.; сопротивление питающей сети: изменяется от 0,068 о.е. (в минимальном режиме) до 0,045 о.е. (в максимальном режиме). В самозапуске участвует двигатель одной секции шин при рабочем режиме двигателя на другой секции шин.

Результаты расчета зон действия защит по (12) – (14) представлены графически на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Графики зависимости зон действия ТО, ЗМН и МТЗ от эквивалентного сопротивления питающей сети

Графики изменения защищаемых зон построены в зависимости от сопротивления системы  $X_c$  при изменении его от наименьшего до наибольшего.

Графики зон МТЗ и ТО не пересекаются, причем график МТЗ идет выше графика ТО. Это значит, что зона действия МТЗ при любом сопротивлении питающей сети больше зоны действия отсечки, и условие 1 выполняется.

Графики токовой отсечки и ЗМН также не пересекаются, причем график ТО идет ниже

графика ЗМН. Это значит, что зона действия ЗМН при любом сопротивлении питающей сети больше зоны действия отсечки, и условие 2 не выполняется.

Графики МТЗ и ЗМН пересекаются в точке А. При сопротивлении питающей сети больше, чем  $X_{с,А}$ , длина зоны МТЗ меньше, чем длина зоны ЗМН, и условие 3 не выполняется. Это значит, что если при  $X_c > X_{с,А}$  эквивалентное сопротивление до точки КЗ в обмотке статора находится в интервале от  $X_{с,К31}$  до  $X_{с,К32}$ , максимальная токовая

защита может отказать, а ЗМН может ложно сработать. Это приведет к неселективному отключению выключателя ввода и может привести к потере устойчивой работы нефтеперекачивающей станции.

Поэтому при сопротивлениях системы больше, чем  $X_{с.А}$ , требуется дополнительные мероприятия для согласования защит. Для согласования необходимо либо повышать чувствительность ТО, либо повышать чувствительность МТЗ ввода так, чтобы либо зона действия отсечки, либо зона действия МТЗ перекрывали бы зону действия ЗМН. Если это сделать невозможно, то для защиты ЭД необходимо вместо отсечки установить дифференциальную защиту.

### Список литературы

1. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтяной и газовой промышленности: Учеб. для вузов. – М.: Недра, 2000. – 487 с.
2. Применение электродвигателей в нефтяной промышленности / Л.М. Першина, С.И. Бак, Ю.С. Першин, С.П. Читипаховян. – М.: Недра, 1989. – 167 с.
3. Шабанов, В.А., Алексеев, В.Ю. Согласование выдержек времени релейной защиты НПС // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов: научно-техн. журн. – 2007. – Вып. 4 (70). – С. 84-89.
4. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю. Обеспечение селективности второй ступени защиты минимального напряжения на нефтеперекачивающих станциях // Промышленная энергетика: журн. – 2008. – № 4. – С. 25-27.
5. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю. Выбор уставок защит минимального напряжения на нефтеперекачивающих станциях // Энергетик. – 2008. – № 7. – С. 37-39.
6. Корогодский В.И. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / В.И. Корогодский, С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 49-57.
7. Гимоян Г.Г. Релейная защита горных электроустановок. – М.: Недра, 1978. – 349 с.
8. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Токмаков Д.А., Шепелин А.В. Недостатки блокировки защиты минимального напряжения на нефте-

### Вывод

При КЗ в обмотке статора ЭД зоны действия ТО, МТЗ ввода и ЗМН должны быть согласованы. Если зона действия ЗМН не превышает зону действия отсечки, то согласование отсечки электродвигателя, МТЗ ввода и ЗМН не требуется. Если зона действия ЗМН превышает зону действия ТО, то требуется согласование зон действия ЗМН и МТЗ ввода. Получены условия согласования зон действия защит, и предложены мероприятия для выполнения условий согласования.

перекачивающих станциях // Нефтегазовое дело: электрон. научн. журн. – 2015. – № 6. – С. 234-252.

9. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Юсупов Р.З. Пути повышения эффективности блокировки защиты минимального напряжения от токовой защиты ввода // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016. – № 3. – Т. 12. – С. 18-25.

10. Sykes J., Madani V., Burger J., Adamiak M., Premerlani W. Reliability of Protection Systems (What are the Real Concerns) // 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineer. 29 March-1 April 2010. – College Station. – P. 1-16.

11. Румянцев Ю.В. Комплексная модель для исследования функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2016. – Т. 59. – № 3. – С. 203-224.

12. Проблема верификации средств моделирования электроэнергетических систем и концепция ее решения / А.А. Суворов, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов, М.В. Андреев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2017. – № 1. – С. 11-23.

13. Путинцева А.А., Шабанов В.А. Уравнения для токов при внутренних трехфазных коротких замыканиях в асинхронных электродвигателях // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических



систем и комплексов: IV-й межвуз. сб. науч. тр. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. – С. 148-161.

14. Шабанов В.А., Путинцева А.А. Определение токов в электродвигателе при внутренних трехфазных коротких замыканиях // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: IV-й межвуз. сб. науч. тр. – Уфа, Изд-во УГНТУ, 2016. – С. 205-216.

15. Гондуоров С.А., Михалев С.В., Пирогов М.Г., Соловьев А.Л. Релейная защита электродвигателей напряжением 6-10 кВ терминалами БМРЗ: методика. – СПб.: ПЭИПК, 2013. – С. 5, 12.

### References

1. Men'shov B.G., Ershov M.S., Jarizov A.D. Elektrotehnicheskiye ustanovki i komplekсы v neftjanoj i gazovoj promyshlennosti: Ucheb. dlya vuzov. – M.: Nedra, 2000. – 487 p.

2. Primenenije elektrodvigatелеj v neftjanoj promyshlennosti / L.M. Pershina, S.I. Bak, Ju.S. Pershin, S.P. Chitipahovjan. – M.: Nedra, 1989. – 167 p.

3. Shabanov V.A., Aleksejev V.Ju. Soglasovanie vyderzhkek vremeni relejnoj zashhity` NPS // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov: nauchno-tehn. zhurn. – 2007. – Вып. 4 (70). – P. 84-89.

4. Shabanov V.A., Aleksejev V.Ju. Obespechenije selektivnosti vtoroj stupeni zashhity minimal'nogo naprjazhenija na nefteperekachivajushhih stancijah // Promyshlennaja energetika: zhurn. – 2008. – № 4. – P. 25-27.

5. Shabanov V.A., Aleksejev V.Ju. Vybor ustavok zashhit minimal'nogo naprjazhenija na nefteperekachivajushhih stancijah // Energetik. – 2008. – № 7. – P. 37-39.

6. Korogodskij V.I. Relejnaja zashhita elektrodvigatелеj naprjazhenijem vyshe 1 kV / V.I. Korogodskij, S.L. Kuzhekov, L.B. Paperno. – M.: Energoatomizdat, 1987. – P. 49-57.

7. Gimojan G.G. Relejnaja zashhita gornyh elektroustanovok. – M.: Nedra, 1978. – 349 p.

8. Shabanov V.A., Aleksejev V.Ju., Tokmakov D.A., Shepelin A.V. Nedostatki blokirovki zashhity minimal'nogo naprjazhenija na nefteperekachivajushhih stancijax // Neftegazovoje delo: elektron. nauchn. zhurn. – 2015. – № 6. – P. 234-252.

9. Shabanov V.A., Aleksejev V.Ju., Jusupov R.Z. Puti povyshenija effektivnosti blokirovki zashhity minimal'nogo naprjazhenija ot tokovoj zashhity vvoda // Elektrotehnicheskiye i informacionnyje komplekсы i sistemy. – 2016. – № 3. – Vol. 12. – P. 18-25.

10. Sykes J., Madani V., Burger J., Adamiak M., Premerlani W. Reliabilty of Protection Systems (What are the Real Concerns) // 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineer. 29 March-1 April 2010. – College Station. – P. 1-16.

11. Rumjancev Ju.V. Kompleksnaja model' dlja issledovanija funkcionirovanija cifrovaj differencial'noj zashhity silovogo transformatora // Energetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedenij i energ. ob`jedinenij SNG. – 2016. – Vol. 59. – № 3. – P. 203-224.

12. Problema verifikacii sredstv modelirovanija elektroenergeticheskix sistem i koncepcija ejo reshenija / A.A. Suvorov, A.S. Gusjev, A.O. Sulajmanov, M.V. Andrejev // Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. – 2017. – № 1. – P. 11-23.

13. Putinceva A.A., Shabanov V.A. Uravnenija dlja tokov pri vnutrennih trehfaznyh korotkih замыканиjah v asinhronnyh elektrodvigateljah // Povyszenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotehnicheskix sistem i komplekсов: IV-j mezhvuz. sb. nauch. tr. – Ufa: Izd-vo UGNTU, 2016. – P. 148-161.

14. Shabanov V.A., Putinceva A.A. Opredelenije tokov v elektrodvigatеле pri vnutrennih trehfaznyh korotkih замыканиyah // Povyshenije nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotehnicheskix sistem i komplekсов: IV-j mezhvuz. sb. nauch. tr. – Ufa, Izd-vo UGNTU, 2016. – P. 205-216.

15. Gondurov S.A., Mihalev S.V., Pirogov M.G., Solovjov A.L. Relejnaja zashhita elektrodvigatелеj naprjazhenijem 6-10 kV terminalami BMRZ: metodika. – SPb.: PEIPK, 2013. – P. 5, 12.





**Кубрин С.С.**  
**Kubrin S.S.**

*профессор, доктор технических наук, заведующий лабораторией 2.3 «Геотехнологические риски при освоении газоносных угольных и рудных месторождений» ИПКОН РАН, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», профессор кафедры «Автоматизированные системы управления», г. Москва, Российская Федерация*



**Решетняк С.Н.**  
**Reshetnyak S.N.**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории 2.3 «Геотехнологические риски при освоении газоносных угольных и рудных месторождений» ИПКОН РАН, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», доцент кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности», г. Москва, Российская Федерация*



**Бондаренко А.М.**  
**Bondarenko A.M.**

*заместитель главного энергетика АО «СУЭК-Кузбасс», г. Ленинск-Кузнецкий, Российская Федерация*

УДК 622:621.31

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-2-50-56

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УДЕЛЬНЫХ НОРМ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

В настоящее время угольная промышленность России является одним из локомотивов технологического развития. Модернизация оборудования, разработка новых технологических решений являются основой для уверенного технологического развития страны, в том числе, в минерально-сырьевом кластере России. В представленной публикации рассматриваются вопросы нормирования электропотребления применительно к выемочным участкам высокопроизводительных угольных шахт на основе разработанного факторного пространства. Также рассматривается возможность применения технологии бенчмаркинга в специфических условиях угольных шахт.

Анализ факторного пространства позволил получить математическую модель процесса электропотребления высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты. Также разработана структурная схема выемочного участка на основе кластерного анализа, с учетом факторного пространства для угольных шахт высокой производительности. Данная математическая модель и структурная схема позволят проанализировать процессы и взаимосвязи, возникающие при добыче угля подземным способом. А также определить основные и косвенные элементы факторного пространства, процесса добычи высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты, что в конечном итоге позволит оптимизировать параметры электропотребления и снизить себестоимость добычи продукции.

**Ключевые слова:** нормирование, электрическая энергия, угольная шахта, выемочный участок, факторное пространство, энергетическая эффективность, бенчмаркинг.

## MATHEMATICAL MODELLING OF SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION NORMS OF COAL EXTRACTION SECTIONS OF COAL MINES

Currently, the coal industry in Russia is one of the locomotives of technological development. Modernization of equipment, development of new technological solutions are the basis for the confident technological development of the country, including in the mineral resource cluster of Russia. The article deals with the regulation of power consumption in relation to the excavation sites of high-performance coal mines on the basis of the developed factor space. The possibility of using benchmarking technology in specific conditions of coal mines is also considered.

The analysis of the factor space allowed us to obtain a mathematical model of the process of power consumption of a high-performance excavation site of a coal mine. And also developed a block diagram of the excavation site, based on cluster analysis, taking into account the factor space for coal mines of high performance. This mathematical model and structural scheme will allow to analyze the processes and relationships arising in the underground coal mining. And also to determine the main and indirect elements of the factor space, the production process of a high-performance excavation site of the coal mine, which ultimately will optimize the parameters of power consumption and reduce the cost of production.

**Key words:** rationing, electric energy, coal mine, excavation site, factor space, energy efficiency, benchmarking.

В настоящее время угольная промышленность России является одним из локомотивов технологического развития. Модернизация оборудования, разработка новых технологических решений являются основой для уверенного технологического развития страны, в том числе, в минерально-сырьевом кластере России. Министерство энергетики России в достаточно сложных макроэкономических условиях разработало ряд документов по внедрению инновационных технологий и современных материалов в отраслях топливно-энергетического комплекса [1].

Рядом ученых проводятся научные исследования по повышению уровня эффективности добычи угля подземным способом за счет внедрения ряда современных технологических решений. В частности, в публикации [2, 3] представлен критериальный анализ угледобывающего предприятия на примере угольной шахты с целью повышения ее эффективности. Также имеется ряд научных исследований по построению системы контрольных показателей эффективности при добыче угля на основе технологии бенчмаркинга (от англ. benchmarking) [4]. Данная тех-

нология включает в себя два равнозначных процесса: «оценивание» и «сопоставление», как внешнее, так и внутреннее [5]. Данная технология предусматривает введение в технологический процесс выемки угля этапов определения, понимания и адаптации, имеющих эталонные примеры функционирования угольной шахты, с существующими угледобывающими предприятиями, работающими в схожих геотехнологических и производственных условиях.

В частности, представлен сравнительный анализ на основе технологии бенчмаркинга, восемь китайских угольных шахт, принадлежащих группе Yankuang [6].

Однако в настоящее время большое число предприятий по добыче и переработке угля в Российской Федерации работают в сложных горно-геологических и технологических условиях и внедрение технологии бенчмаркинга весьма затруднительно. Это особенно заметно при отработке высокопроизводительных забоев в метанообильных шахтах [7, 8].

Модернизация оборудования, участвующего в технологической цепочке выемки

угля, вызывает необходимость в корректировке технологических показателей работы, что в значительной степени влияет на нормативные и нормируемые величины, участвующие в расчетах при определении себестоимости продукции и плановых показателей угледобывающего предприятия. Данный аспект также приведет к корректировке технологических параметров угольной шахты, что, в свою очередь, вызовет значительное изменение нормативных показателей работы как отдельных элементов технологической цепочки выемки угля, так и угледобывающего предприятия в целом.

Основной энергетический ресурс, участвующий в технологическом процессе выемки угля, – электрическая энергия. Объемы используемых энергоресурсов на единицу продукции велики, что в значительной степени влияет на себестоимость добытой продукции, снижая её конкурентоспособность [9-11]. Поэтому для снижения энергозатрат необходимо провести исследование по разработке математической модели факторного пространства для определения удельных норм электропотребления выемочных участков угольных шахт. Это научная задача становится всё более значимой и актуальной ввиду нестабильности стоимости угля на мировых торговых площадках.

Под факторным пространством следует понимать совокупность внешних и внутренних параметров высокопроизводительных выемочных участков угольных шахт [12]. Для определения факторного пространства выемочного участка угольной шахты необходимо провести факторный анализ, под которым следует понимать многомерную методику, позволяющую изучить взаимосвязи между параметрами переменных факторов, влияющих на выемку угля.

В настоящее время факторный анализ для определения факторного поля высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты возможно провести с помощью двух основных методов, а именно детерминированного и стохастического. Методы факторного анализа могут использоваться как совместно, так и раздельно. Под детерминированным методом следует понимать воз-

можность выявить ряд основных факторов, влияющих на выемку угля, относительно критерия повышенной эффективности. Под стохастическим методом следует понимать возможность определения ряда косвенных факторов, влияющих на выемку угля, относительно критерия повышенной эффективности. Однако, с точки зрения построения факторного поля высокопроизводительно выемочного участка угольной шахты, учет только лишь основных факторов, влияющих на выемку угля по критерию повышенной эффективности, явно недостаточен ввиду большого количества косвенных связей. Поэтому для получения качественного факторного пространства выемочного участка угольной шахты необходимо совместное использование обоих методов факторного анализа.

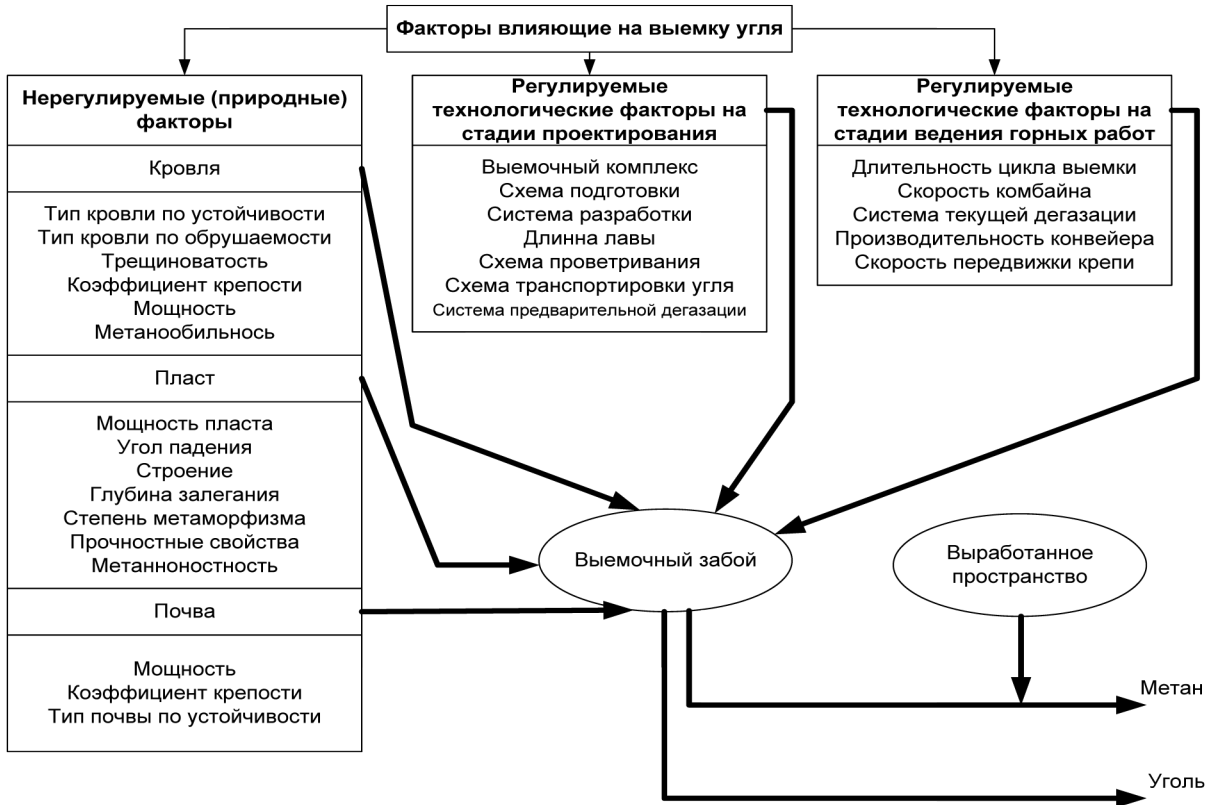
Для применения факторного анализа в условиях высокопроизводительных выемочных участков угольных шахт необходимо решение ряда задач:

- обнаружение существующих значений факторов, влияющих на выемку угля;
- подбор факторов для полноценного анализа значений, влияющих на выемку угля;
- классификация факторов, влияющих на выемку угля для системной работы;
- обнаружение взаимосвязей между результативными и факторными значениями;
- определение степени влияния каждого из факторов, влияющих на выемку угля;
- анализ роли каждого из факторов, влияющих на выемку угля;
- применение факторной модели высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты.

Следует отметить, что все факторы, влияющие на выемку угля, возможно классифицировать по трем основным видам:

- нерегулируемые (природные) факторы;
- регулируемые технологические факторы на стадии проектирования;
- регулируемые технологические факторы на стадии ведения горных работ.

Классификационный анализ факторов, влияющих на выемку угля, представлен на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Классификационный анализ факторов, влияющих на выемку угля

К нерегулируемым (природным) факторам следует отнести: тип кровли по устойчивости; тип кровли по обрушаемости; тип кровли по трещиноватости; тип кровли по коэффициенту крепости; тип кровли по мощности; тип кровли по метанообильности; мощность пласта; угол падения пласта; строение пласта; глубина залегания пласта; степень метаморфизма пласта; прочностные свойства пласта; метанноносность пласта; тип почвы по мощности; тип почвы по коэффициенту крепости; тип почвы по устойчивости.

К регулируемым технологическим факторам на стадии проектирования угледобывающего предприятия следует отнести следующие: схема подготовки выемочного пласта; схема разработки выемочного пласта; схема проветривания угольной шахты; схема транспортировки отбитого угля; длина лавы; система предварительной дегазации; выемочный комплекс.

К регулируемым технологическим факторам на стадии ведения горных работ следует отнести следующие: система текущей дегазации; скорость передвижения крепи; производительность транспортного кластера; ско-

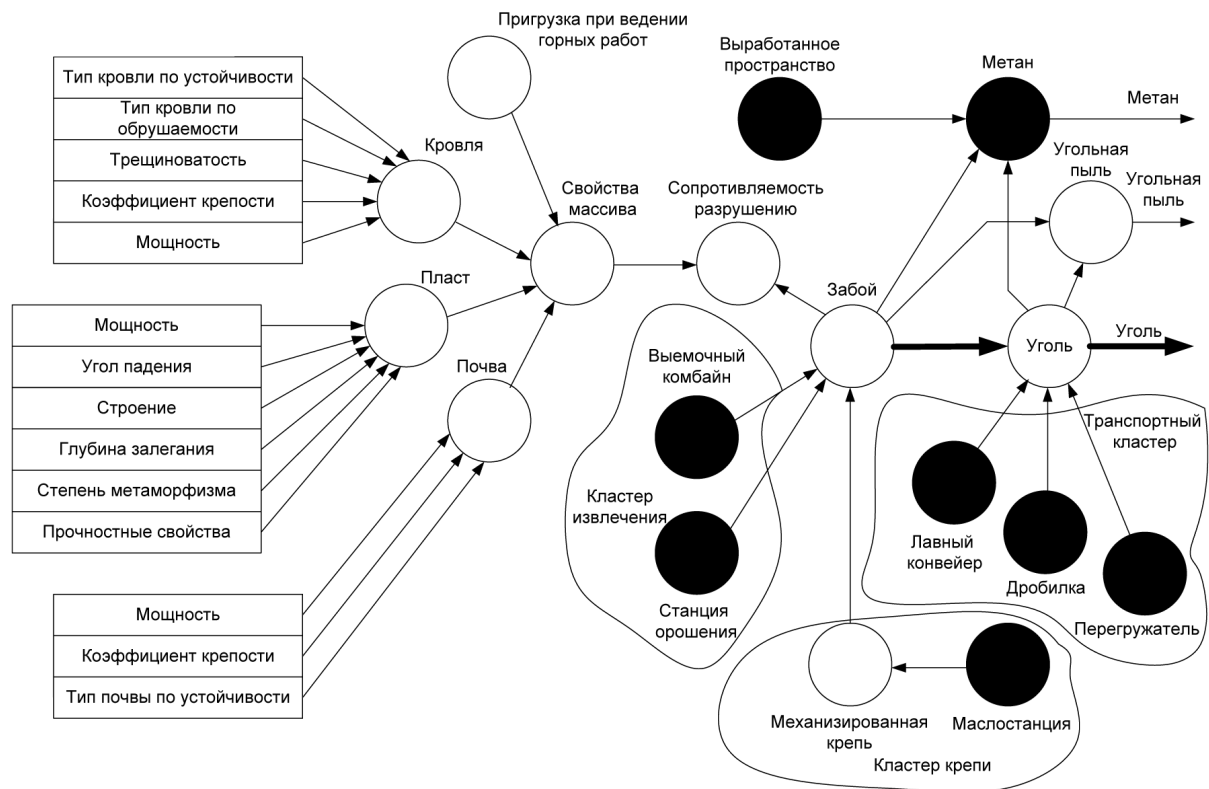
рость выемочного комбайна; длительность цикла выемки.

Классификационный анализ факторов, представленный на рисунке 1, позволил выявить ряд основных элементов факторного пространства высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты, которые поддаются регулированию на стадии ведения выемки угля.

К влияющим факторам следует отнести горно-технологические и горно-геологические факторы, которые действуют на технологию добычи угля в совокупности. Основными технологическими процессами при добыче угля подземным способом являются: скорость подачи комбайна; производительность транспортной цепочки; скорость подвигания забоя; численность персонала; текущая газоносность пласта; объем добытой продукции.

В результате проведенных исследований была построена структурная схема выемочного участка на основе кластерного анализа с учетом факторного пространства для угольных шахт высокой производительности (рис. 2).





**Рисунок 2.** Структурная схема выемочного участка на основе кластерного анализа с учетом факторного пространства для угольных шахт высокой производительности

Согласно представленной структурной схеме, на выемочном участке угольной шахты имеется три основных кластера: кластер извлечения; кластер крепи; транспортный кластер. Кластер извлечения включает в себя выемочный комбайн и станцию орошения. Кластер крепи включает в себя механизированную крепь и маслостанцию.

Транспортный кластер включает в себя лавный конвейер, дробилку и перегружатель.

На основе представленной структурной схемы разработана математическая модель электропотребления высокопроизводительных выемочных участков угольных шахт с учетом факторного пространства. Данная математическая модель представлена в матричной форме:

$$\begin{aligned} \omega_{6,y.} = & A + B_1 \cdot x_1 + B_1 \cdot x_2 + B_1 \cdot x_3 + B_1 \cdot x_4 + B_1 \cdot x_5 + B_1 \cdot x_6 + \\ & + B_2 \cdot x_1 + B_2 \cdot x_2 + B_2 \cdot x_3 + B_2 \cdot x_4 + B_2 \cdot x_5 + B_2 \cdot x_6 + \\ & + B_3 \cdot x_1 + B_3 \cdot x_2 + B_3 \cdot x_3 + B_3 \cdot x_4 + B_3 \cdot x_5 + B_3 \cdot x_6 + \\ & + B_4 \cdot x_1 + B_4 \cdot x_2 + B_4 \cdot x_3 + B_4 \cdot x_4 + B_4 \cdot x_5 + B_4 \cdot x_6 + \delta \end{aligned}$$

где  $\omega_{6,y.}$  - удельное электропотребление выемочного участка;

$A$  - объем потребленной электроэнергии не зависящий от объемов добычи;

$B_1$  - электропотребление выемочного комбайна;

$B_2$  - электропотребление лавного конвейера;

$B_3$  - электропотребление дробилки;

$B_4$  - электропотребление перегружателя;

$x_1$  - скорость подачи комбайна;

$x_2$  - производительность транспортной цепочки;

$x_3$  - скорость подвигания забоя;

$x_4$  - численность персонала;

$x_5$  - текущая газоносность пласта;

$x_6$  - объем добытой продукции;

$\delta$  - погрешность.

Анализ факторного пространства угольной шахты позволил сделать следующие



заклучения: к основному элементу факторного пространства относятся скорость подачи выемочного комбайна и производительность транспортного кластера угольной шахты. К элементам транспортного кластера относятся как оборудование выемочного участка – скребковый (лавный) конвейер, дробилки и перегружатель, а также элементы магистрального транспорта угольной шахты (магистральный конвейерный транспорт, электровозная откатка, подъемные установки и т.д.). Такие элементы факторного пространства, как длительность цикла выемки, система текущей дегазации, скорость пере-

движки крепи, относятся к косвенным элементам факторного пространства высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты.

В заключение следует отметить, что представленная математическая модель электропотребления выемочного участка на основе кластерного анализа с учетом факторного пространства позволит проанализировать процессы и взаимосвязи, возникающие при добыче угля подземным способом, и оптимизировать параметры электропотребления.

### Список литературы

1. <http://economicdata.ru> (дата обращения 13.01.2019)
2. Bogacka M. Multicriteria analysis of coal mine. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2015. – P. 493-500.
3. Jonek-Kowalska I., Turek M. Dependence of total production costs on production and infrastructure parameters in the polish hard coal mining industry. *Energies*. – 2017. - № 10. <https://doi.org/10.3390/en10101480> (дата обращения 13.01.2019)
4. Topno S.A., Sahoo L.K., Junghare A.S., Umre B.S. Energy efficiency benchmarking of power consumption for an opencast coal mine. *30th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS*, 2017. [http://www.mdpi.com/journal/energies/special\\_issues/ECOS\\_2017](http://www.mdpi.com/journal/energies/special_issues/ECOS_2017) (дата обращения 13.01.2019)
5. Ning Wang, Zongguo Wena, Mingqi Liu, Jie Guo Constructing an energy efficiency benchmarking system for coal production. *Applied Energy* 169, 2016. – P. 301–308.
6. Овакимян Г.С., Шибина М.А. Современные методы повышения конкурентоспособности предприятия: бенчмаркинг и аутсорсинг // *Экономика и управление: проблемы, решения*. – 2015. - № 7. – С. 119-123.
7. Рубан А.Д., Артемьев В.Б., Забурдяев В.С., Забурдяев Г.С., Руденко Ю.Ф. Проблемы обеспечения высокой производительности очистных забоев в метанообильных шахтах. – М.: Московский издательский дом, 2009. – 396 с.
8. Кубрин С.С., Решетняк С.Н., Бондаренко А.М. Актуальные аспекты повышения уровня нормирования электропотребления угольных шахт // *Вестник кузбасского государственного технического университета*. – 2017. - № 5. – С. 97-101. DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-97-100
9. Kubrin S.S., Reshetnyak S.N., Bondarenko A.M. Analysis of methods of rationing of electricity consumption in coal mines // *Горный информационный аналитический бюллетень*. – 2017. - № 12. Отдельный сборник № 29 г. М.: Горная книга Горный информационный аналитический бюллетень. – 2017. - № 12. Отдельный сборник № 29. – М.: Горная книга. – С. 3-8. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-29-3-8
10. Захарова А.Г. Закономерности электропотребления на угольных шахтах Кузбасса: монография. – Кемерово. – Кузбас. гос. техн. ун-т, 2002. – 198 с.
11. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Загоршменный И.М., Решетняк С.Н. Экспериментальные исследования параметров работы очистного комбайна угольной шахты при различных скоростях подачи // *Горный информационный аналитический бюллетень*. – 2017. - № 12. Отдельный сборник. № 29. – М.: Горная книга. – С. 48-56.
12. Агафонов В.В., Воропаева Е.В. Выявление диспропорций в технологических системах угольных шахт на основе факторного анализа. *Горный информационно-аналитический бюллетень: научно-технический журнал*. – 2018. - № S9. – С. 8-13.

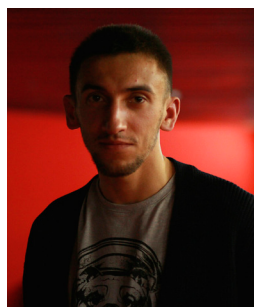
## References

1. <http://economicdata.ru> (дата обращения 13.01.2019)
2. Bogacka M. Multicriteria analysis of coal mine. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2015. – P. 493-500.
3. Jonek-Kowalska I., Turek M. Dependence of total production costs on production and infrastructure parameters in the polish hard coal mining industry. Energies. – 2017. - № 10. <https://doi.org/10.3390/en10101480> (дата обращения 13.01.2019)
4. Topno S.A., Sahoo L.K., Junghare A.S., Umre B.S. Energy efficiency benchmarking of power consumption for an opencast coal mine. 30th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS, 2017. [http://www.mdpi.com/journal/energies/special\\_issues/ECOS\\_2017](http://www.mdpi.com/journal/energies/special_issues/ECOS_2017) (дата обращения 13.01.2019)
5. Ning Wang, Zongguo Wena, Mingqi Liu, Jie Guo Constructing an energy efficiency benchmarking system for coal production. Applied Energy 169, 2016. – P. 301–308.
6. Ovakimjan G.S., Shibina M.A. Sovremennye metody povyshenija konkurentosposobnosti predpriyatija: benchmarking i outsorsing // Ekonomika i upravlenije: problemy, reshenija. – 2015. - № 7. – P. 119-123.
7. Ruban A.D., Artem'jev V.B., Zaburdjajev V.S., Zaburdjajev G.S., Rudenko Ju.F. Problemy obespechenija vysokoj proizvoditel'nosti ochistnyh zabojev v metanoobil'nyh shahtah. – M.: Moskovskij izdatel'skij dom, 2009. – 396 p.
8. Kubrin S.S., Reshetnjak S.N., Bondarenko A.M. Aktual'nyje aspekty povyshenija urovnja normirovanija elektropotreblenija ugol'nyh shaht // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2017. - № 5. – P. 97-101. DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-97-100
9. Kubrin S.S., Reshetnyak S.N., Bondarenko A.M. Analysis of methods of rationing of electricity consumption in coal mines. Gornyj informacionnyj analiticheskij bjulleten'. – 2017. - № 12. Otdel'nyj sbornik № 29. – M.: Gornaja kniga. Gornyj informacionnyj analiticheskij bjulleten'. – 2017. - № 12. Otdel'nyj sbornik. № 29. – M.: Gornaja kniga. – P. 3-8. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-29-3-8
10. Zaharova A.G. Zakonomernosti elektropotreblenija na ugol'nyh shahtah Kuzbassa: monografija. – Kemerovo: Kuzbas. gos. tehn. un-t. – 2002. – 198 z.
11. Kopylov K.N., Kubrin S.S., Zakorshmenyj I.M., Reshetnjak S.N. Eksperimental'nyje issledovanija parametrov raboty ochistnogo kombajna ugol'noj shahty pri razlichnyh skorostjah podachi // Gornyj informacionnyj analiticheskij bjulleten'. – 2017. - № 12. Otdel'nyj sbornik. № 29. – M.: Gornaja kniga. – P. 48-56.
12. Agafonov V.V., Voropajeva E.V. Vyjavlenije disproporcij v tehnologičeskikh sistemah ugol'nyh shaht na osnove faktornogo analiza // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehničeskij zhurnal). – 2018. - № S9. – P. 8-13.



**Попов А.А.**  
**Popov A.A.**

кандидат технических наук,  
Сибирский  
государственный  
университет науки и  
технологий имени  
академика М.Ф. Решетнева,  
г. Красноярск,  
Российская Федерация



**Овсянкин А.К.**  
**Ovsyankin A.K.**

студент, Сибирский  
государственный  
университет науки и  
технологий имени  
академика М.Ф. Решетнева,  
г. Красноярск,  
Российская Федерация



**Юринский Ю.А.**  
**Yurinski Yu.A.**

студент, Сибирский  
государственный  
университет науки и  
технологий имени  
академика М.Ф. Решетнева,  
г. Красноярск,  
Российская Федерация

УДК 004

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-2-57-62

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ В ВИДЕ МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В РАБОТЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Экспертная система – это комплекс программ, аккумулирующий знания специалистов в конкретной предметной области и тиражирующий этот эмпирический опыт для консультаций менее квалифицированных специалистов.

Экспертные системы могут выступать в роли ассистента эксперта-человека в процессах анализа вариантов решений, а также могут быть консультантами для неопытных специалистов в какой-либо предметной области.

Мобильное приложение – современное программное обеспечение, предназначенное для работы на планшетах, смартфонах и других мобильных устройствах.

С каждым днем разрабатываются новые приложения для мобильных устройств, которые помогают обычным пользователям и приносят определенную выгоду разработчикам или заказчикам.

В данной статье представлены результаты проектного решения мобильного приложения для диагностирования неисправностей в работе вычислительной техники. Данное приложение планируется реализовать в виде экспертной системы, которая будет иметь свою базу знаний и правила вывода.

В работе приведено подробное описание работы экспертной системы, сформированы правила и факты работы. Разработан вывод решений диагностирующей экспертной системы.

Использован предыдущий опыт в разработке мобильных приложений, представлены методы и средства программной реализации, разработан прототип приложения.

**Ключевые слова:** экспертная система, база знаний, мобильное приложение, база данных, факты, диагностика, информационная система, мобильное устройство, диагностика, android-платформа.

## DESIGNING THE EXPERTS SYSTEM AS A MOBILE APPLICATION FOR DIAGNOSTIC TROUBLESHOOTING IN COMPUTING TECHNOLOGY

An expert system is a set of programs that accumulates the knowledge of specialists in a specific subject area and replicates this empirical experience for consultations of less qualified specialists.

Expert systems can act as an assistant to a human expert in the process of analyzing decision options, and can also be consultants for inexperienced specialists in any subject area.

Mobile application – modern software designed to work on tablets, smartphones and other mobile devices.

Every day, new applications for mobile devices are being developed that help ordinary users and bring some benefit to developers or customers.

This article presents the results of the design solution of a mobile application for diagnosing malfunctions in the operation of computing equipment. This application is planned to be implemented as an expert system, which will have its own knowledge base and inference rules.

The paper provides a detailed description of the work of the expert system, the rules and facts of work are formed. The derivation of solutions of the diagnosing expert system is developed.

Previous experience in developing mobile applications was used, methods and tools for software implementation were presented, and a prototype of the application was developed.

**Key words:** expert system, knowledge base, mobile application, mobile device, database, facts, diagnostics, information system, diagnostics, Android platform.

### Введение

В современном обществе трудно представить любую деятельность без использования средств вычислительной техники и сети Интернет. Ежедневно приходится обмениваться информацией по электронной почте, пользоваться поисковыми системами и другими развитыми сервисами, которые сейчас предоставляются конечным пользователям.

К сожалению, не все пользователи современной техники обладают необходимыми навыками, если случается сбой в работе оборудования или программного обеспечения. Обычные пользователи вынуждены обращаться за помощью в сервисные центры, к провайдерам или знакомым, обладающим соответствующими знаниями. На это все требуется время, которое может быть ограничено. А зачастую проблема решается перезагрузкой устройства или проверкой соединения, только пользователь должен знать, в каком «узле» искать неисправность.

В настоящее время практически у каждого человека есть современный смартфон. С помощью смартфонов люди узнают новости, информацию о пробках, погоду и другие вещи, которые сейчас можно перечислять бесконечно. Каждый день разрабатываются новые приложения для мобильных устройств,

которые помогают обычным пользователям и приносят определенную выгоду разработчикам или заказчикам.

Процесс диагностирования неисправности и её устранение можно решить без обращения к кому-либо, что позволит сэкономить время. В этом случае разрабатываемое программное средство способствует существенному упрощению данного процесса. Конечно, мобильное приложение не сможет заменить квалифицированную техническую помощь или произвести сложный ремонт оборудования, но в большинстве случаев поможет решить проблему или установить причину неисправности.

Главная цель проектируемого мобильного приложения – упростить процесс диагностирования для конечного пользователя, за счет автоматизации и систематизации накопленного специалистами опыта в виде базы знаний экспертной системы.

### Применение экспертных систем

Экспертная система (ЭС) – это комплекс программ, накапливающий знания специалистов в конкретной предметной области и копирующий этот эмпирический опыт для консультаций менее квалифицированных специалистов [5].



ЭС могут быть представлены в виде прикладных информационных систем или быть независимыми отдельными оболочками с универсальными функциями в роли человека-эксперта или консультанта, который предложит варианты решения проблемной ситуации в конкретной предметной области.

В ходе проектирования любой информационной системы (ИС) важным моментом является продумать организацию интерфейсной части, а именно организовать диалог ИС с пользователем. Особенно это важно при проектировании ЭС, потому что задаваемые вопросы пользователю должны быть понят-

ными и поступать в нужное время при определенной сложившейся ситуации. Поэтому техника ведения диалога должна быть тщательно продумана на стадии проектирования ЭС.

Типичная ЭС состоит из следующих основных компонентов: решателя (интерпретатора), рабочей памяти (РП), называемой также базой данных (БД), базы знаний (БЗ), компонентов приобретения знаний, объяснительного и диалогового компонентов (рис. 1) [5].

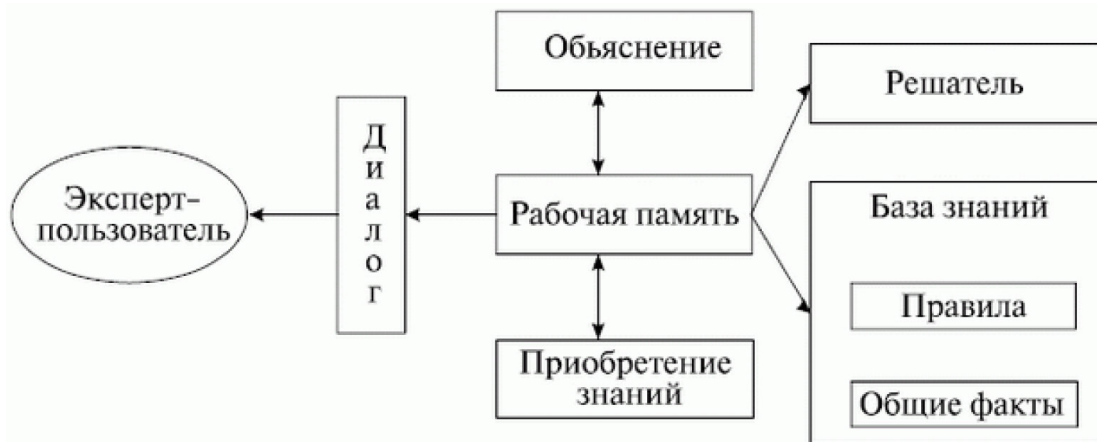


Рисунок 1. Типовая структура ЭС

Экспертная система работает в двух режимах: приобретения знаний и решения задач (называемым также режимом консультации, или режимом использования ЭС).

Если рассмотреть режим приобретения знаний, то ведение диалога с ЭС осуществляется с помощью инженера по знаниям. Проблемная ситуация описывается экспертом в виде совокупности правил и фактов. В любой предметной области, представленной для изучения проблемной ситуации, есть свои объекты, которые обладают своими характеристиками и значениями – это есть факты. Манипулирование фактами для разрешения проблемной ситуации в предметной области – есть правила. Для решения проблемной ситуации эксперту необходимо приобрести знания и наполнить ими систему. Количество выявленных экспертом фактов и правил напрямую влияет на правильность решения задачи из проблемной области.

Задано множество фактов

$$F = \{f_{ij}\} \cup \{q_i\} = (f_1, f_2, \dots, f_n), \quad (1)$$

которое состоит из элементов двух типов. Элементы  $a_{ij}$  определяют обычные декларативные знания из конкретной предметной области. Элементы  $q_i$  определяют вид взаимодействия с внешней средой. В проектируемой ЭС в диалоговом окне пользователю предоставляются вопросы, касающиеся конкретной возникшей проблемной ситуации. Пользователь может согласиться с данным фактом или нет, в зависимости от выбора ЭС представит следующий вопрос:

$$q_i = f_{i_1}, \dots, f_{i_s}. \quad (2)$$

Продукции в данной системе имеют вид

$$f_{ij} \rightarrow q_m = \{f_{m_1}, \dots, f_{m_k}\}. \quad (3)$$

Множество фактов и продукций собраны в некоторую систему, представленную в виде диагностирующего графа «ИЛИ» с терминальными вершинами  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5$ . На рисунке 2 приведен фрагмент такого графа.



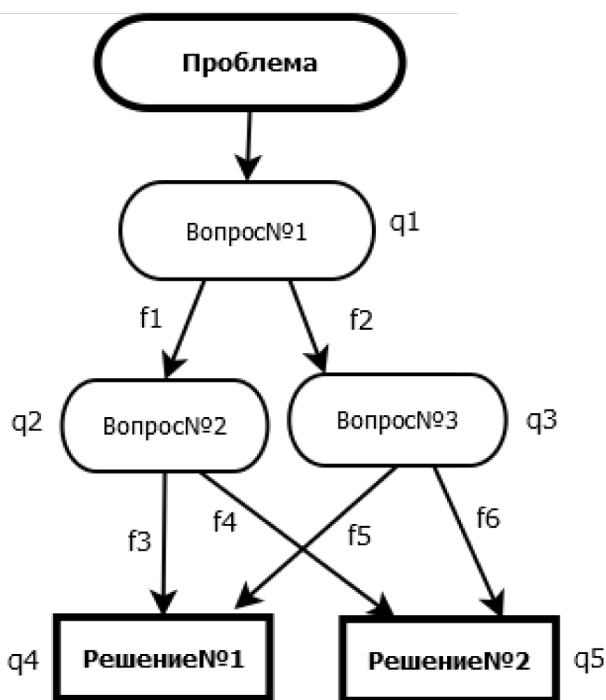


Рисунок 2. Диагностирующий граф

В графе «ИЛИ» ориентация дуг показывает направление вывода. Естественное разбиение вершин графа по ярусам отражает глубину вывода.

Принцип работы проектируемой ЭС заключается в следующем. После обращения пользователя к ЭС мы попадаем в вершину  $q_1$ , инициирующую вопрос пользователю в виде соответствующего диалогового меню:

$$q_1 = \{f_1, f_2\}. \quad (4)$$

Допустим, на вопрос системы: «Какой из фактов  $f_1, f_2$  имеет место?» пользователь ответил:  $f_1$ . В результате мы переходим по ссылке

$f_1$  в рабочее поле и попадаем в новую вершину — вопрос  $q_2$ :

$$q_2 = \{f_3, f_4\}, \quad (5)$$

где данная процедура повторяется.

В конце концов мы оказываемся в одной из терминальных вершин, где пользователь получает сообщение о результате.

Для проектируемой ЭС были выявлены часто встречающиеся проблемы и составлены вопросы  $q_1$ , которые помогут разрешить проблемную ситуацию (рис. 3).



Рисунок 3. Вывод решений диагностирующей экспертной системы

### Средства и методы разработки

На основе проведенных исследований, самыми частыми являлись вопросы, связанные с Интернетом и прочей интернет-периферией, были выявлены основные причины обращения к инженерам, составлены схемы диагностирования. В основу экспертной системы была заложена база знаний, которая содержит наиболее частые вопросы для обращения к инженерам используемого провайдера.

В качестве основной среды для разработки мобильного приложения было решено использовать IDE Android Studio, так как данное IDE создано специально для разработки приложений для устройств под управлением ОС Android [2].

В приложении планируется использовать базу данных (БД) SQLite, так как она включается по умолчанию в состав ОС Android. SQLite поддерживает стандартные возможности реляционных баз данных – синтаксис, транзакции. Кроме того, SQLite требует

очень небольшого количества памяти для работы. Использование SQLite в ОС Android не требует установки БД или администрирования [3]. Вы указываете SQL-запрос для работы с БД, и необходимые операции администрирования выполняются автоматически.

Разработанное с помощью IDE Android Studio мобильное приложение состоит из трех активных окон.

*Главное окно* – строится на основании таблицы из базы данных, состоящей из ключевых вопросов о том или ином симптоме.

*Опросное окно* – строится путем вывода пользователю наводящих вопросов по его симптому, где пользователь взаимодействует с системой путем согласия или несогласия с предоставленным вопросом посредством простых ответов «Да» и «Нет», на основании которых система делает выводы и либо задает дополнительный вопрос, либо информирует пользователя о возможном диагнозе (рис. 4).

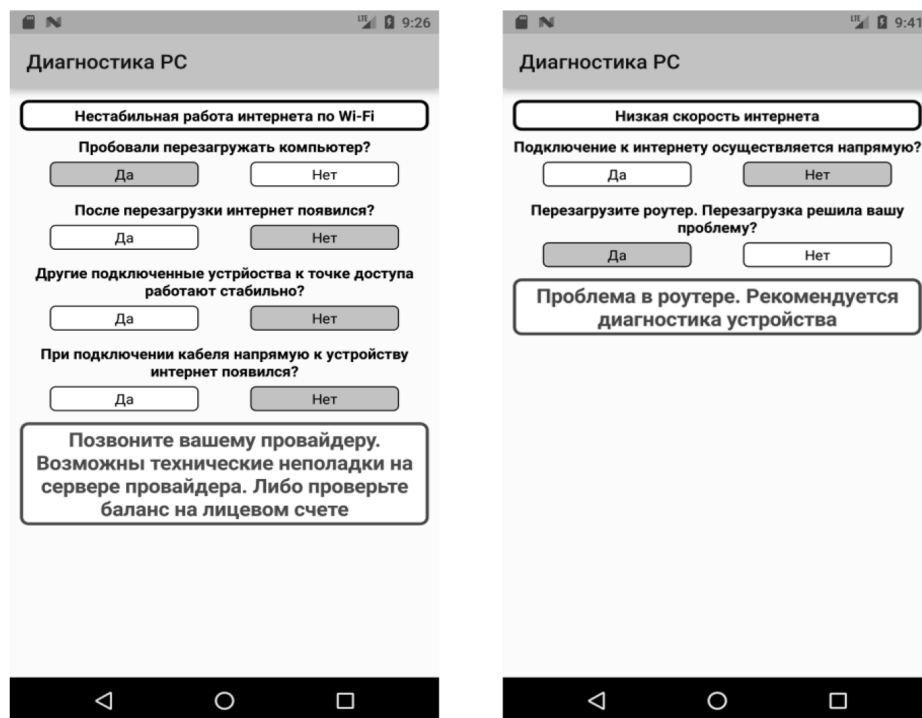


Рисунок 4. Представления опросного окна

Окно «*О программе*» – содержит информирующий характер о разработчике и назначении программы.

В соответствии с диагностической схемой, выбранной в главном окне информационной системы, на опросное окно выводится блок с

названием диагностической схемы и фиксируется в верхней части опросного окна. Ниже данного блока пользователю выводится начальный наводящий вопрос, соответствующий данной диагностической схеме с вариантами ответов в виде кнопок «Да» и «Нет».

При выборе пользователем какого-либо варианта экспертная система обрабатывает результат и принимает решение в соответствии с диагностической схемой предоставить пользователю следующий наводящий вопрос или же вывести возможный диагноз. Блок вывода возможно диагноза визуально выделен в красную рамку с целью привлечения внимания для упрощения взаимодействия с пользователем.

### Вывод

В результате выполнения работы была спроектирована экспертная системы в виде мобильного приложения для диагностики

неисправностей в работе вычислительной техники и разработан его прототип.

В настоящее время ведется наполнение базы данных, проводится исследовательская работа с интернет-провайдерами города Красноярска, предоставляющими услуги. Обрабатываются все обращения клиентов, у которых произошел какой-либо сбой в работе оборудования, программного обеспечения или сети.

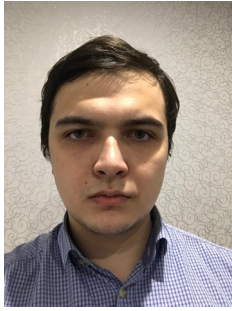
В дальнейшем можно расширять базу знаний экспертной системы в других направлениях, связанных с работой вычислительной техники.

### Список литературы

1. Android Design Principles. URL: <http://developer.android.com/design/get-started/principles.html> (дата обращения 18.11.2018).
2. Android Developers. URL: <http://developer.android.com/> (дата обращения 25.11.2018).
3. Болотова Л.С. Системы искусственного интеллекта: модели и технологии, основанные на знаниях. – М., 2012. – 664 с.
4. Гаврилова Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем. – Питер, 2000. – 383 с.
5. Основы работы с SQLite в Андроид. URL: <http://vlad8.com/tech/android-sqlite-database/> (дата обращения 27.11.2018).
6. Релиз свободной среды разработки Android Studio 1.0. URL: <http://www.opennet.ru/opennews/art.shtml?num=41218> (дата обращения 19.11.2018).
7. Спицын В.Г. Представление знаний в информационных системах. – Томск, 2006. – 146 с.
8. Якубов С.Х. Алгоритмические методы построения баз знаний в интеллектуальных системах // Современные материалы, техника и технологии. – 2016. – № 1 (4). – С. 238-243.

### References

1. Android Design Principles. URL: <http://developer.android.com/design/get-started/principles.html> (data obrashcheniya 18.11.2018).
2. Android Developers. URL: <http://developer.android.com/> (data obrashcheniya 25.11.2018).
3. Bolotova L.S. Sistemy iskusstvennogo intellekta: modeli i tekhnologii, osnovannyje na znaniyah. – Moskva, 2012. – 664 p.
4. Gavrilova T.A. Bazy znaniy intellektual'nyh sistem. – Piter, 2000. – 383 p.
5. Osnovy raboty s SQLite v Android. URL: <http://vlad8.com/tech/android-sqlite-database/> (data obrashcheniya 27.11.2018).
6. Reliz svobodnoj sredy razrabotki Android Studio 1.0. URL: <http://www.opennet.ru/opennews/art.shtml?num=41218> (data obrashcheniya 19.11.2018).
7. Spicyn V.G. Predstavlenije znaniy v informacionnyh sistemah. – Tomsk, 2006. – 146 p.
8. Jakubov S.H. Algoritmicheskije metody postrojenija baz znaniy v intellektual'nyh sistemah // Sovremennyje materialy, tekhnika i tekhnologii. – 2016. – № 1 (4). – P. 238-243.



**Шабанов Э.В.**  
**Shabanov E.V.**

*магистрант кафедры  
«Вычислительная техника и инженерная  
кибернетика»  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет,  
г. Уфа, Российская Федерация*



**Гиниятуллин В.М.**  
**Giniyatullin V.M.**

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

УДК 004.021

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-2-63-69

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ГИПЕРБОЛИЧЕСКАЯ ТРИЛАТЕРАЦИЯ

На данный момент основным методом спутниковой навигации является сферическая трилатерация – расчет точки пересечения четырех сфер, центрами которых являются координаты спутников, а радиусами – расстояния от спутников до приемника. Координаты спутников приемник получает из их информационных сигналов, в то время как расстояния до спутников рассчитываются как разницы времен отправления и приема сигнала.

Основной проблемой данного метода является сложность синхронизации часов спутников и приемника, поскольку точность используемых часов сильно различается (на спутниках стоят атомные часы, а в приемниках, обычно, кварцевые). В результате рассинхронизации часов спутников и приемника может возникнуть ошибка в определении координат. Эту ошибку можно минимизировать, используя более точные часы в приемнике, но данный способ сложен в реализации и экономически не выгоден. Вместо этого для корректировки ошибки в систему уравнений сферической трилатерации добавляется дополнительное уравнение, а ошибка вычисляется как четвертая переменная в данной системе. При этом необходимы данные с дополнительного спутника.

Система уравнений алгоритма сферической трилатерации решается итерационным численным методом. В данной работе рассматривается гиперболическая трилатерация – альтернативный алгоритм, использующий аналитические методы и не требующий синхронизации часов спутников и приемника.

Рассмотрены приложения спутниковой навигации, требующие повышенной точности спутникового позиционирования. Рассмотрены программно-определяемые радиосистемы, а также программная реализация спутникового приемника, основанная на программно-определяемой радиосистеме. Описан принцип функционирования, а также недостатки используемого в большинстве пользовательских устройств алгоритма сферической трилатерации. Описан метод гиперболической трилатерации, а также переход от уравнений гиперболической трилатерации к полным квадратичным формам. Разработан альтернативный алгоритм спутниковой навигации – гиперболическая трилатерация. Проведено его сравнение с алгоритмом сферической трилатерации, проанализированы отличия результатов

работы разработанного алгоритма гиперболической трилатерации от алгоритма сферической трилатерации. Проанализирована причина большего разброса алгоритма гиперболической трилатерации, приведено решение, понижающее разброс результатов гиперболической трилатерации до уровня сферической трилатерации. Определены задачи дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** спутниковая навигация, GPS, ГЛОНАСС, трилатерация, коника, псевдорасстояние, точность, гиперболоид, аналитический метод, числа произвольной размерности.

## DIFFERENTIAL HYPERBOLIC TRILATERAL

Now the main satellite navigation algorithm is spherical trilateration. Spherical trilateration is calculation of four spheres intersection. Centers of the spheres are satellite coordinates. Their radiuses are distances between satellites and receiver. Receiver gets satellites coordinates from their information signals. The distances are calculated as differences between receive time and transmit time multiplied by the speed of light.

The main issue of spherical trilateration is difficulty of satellite and receiver clocks synchronization (precision is different because of different types of clocks). Dyssynchronization may cause a position fix error. This error may be reduced when more precise receiver clocks are used but precise receiver clocks are expensive and difficult to implement. Another method to reduce the error is to add a fourth equation in system and calculate the error as a fourth variable. This method requires data from additional satellite.

Spherical trilateration equation system is solved by numerical method. In this article another method is considered – hyperbolic trilateration. The method is analytical and does not require satellite receiver clock synchronization.

Applications of satellite navigation that require improved accuracy of satellite positioning are considered. The software-defined radio systems are considered, as well as the software implementation of a satellite receiver based on a software-defined radio system. The principle of functioning and disadvantages of common used spherical trilateration algorithm are considered. The method of hyperbolic trilateration is described, as well as the transition from the hyperbolic trilateration equations to the quadratic forms. An alternative algorithm for satellite navigation is developed – the hyperbolic trilateration. The algorithm is compared to the spherical trilateration algorithm and the differences of the results of developed algorithm and the spherical trilateration algorithm are analyzed. The reason for the larger scatter of the hyperbolic trilateration algorithm is analyzed, a solution that reduces the scatter of the results of hyperbolic trilateration algorithm to the level of spherical trilateration is given. The objectives of further research are defined.

**Key words:** satellite navigation, trilateration, GPS, GLONASS, conic, pseudorange, precision, hyperboloid, analytic method, variable precision numbers.

### Алгоритмы сферической трилатерации

На данный момент для расчета навигационного решения используется алгоритм сферической трилатерации. Его входными данными являются псевдодальности от приемника до спутников и координаты соответствующих спутников. Алгоритм выглядит следующим образом:

- для каждого из четырех спутников строится уравнение сферы с центром в этом спутнике и радиусом, равным его псевдодальности [1];

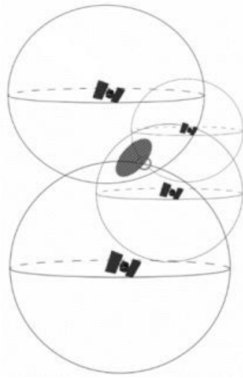
- ко всем уравнениям добавляется переменная, представляющая собой общую погрешность расчета псевдодальностей до спутников;

- полученная система решается итерационным методом [2].

В результате определяется навигационное решение и общая ошибка расчета псевдодальностей.

На рисунке 1 приведен принцип определения координат алгоритмом сферической трилатерации.





**Рисунок 1.** Определение координат сферической трилатерацией

Система уравнений, соответствующая данному алгоритму:

$$\begin{cases} \sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 + (z - z_A)^2} + e = R_A \\ \sqrt{(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + (z - z_B)^2} + e = R_B \\ \sqrt{(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2} + e = R_C \\ \sqrt{(x - x_D)^2 + (y - y_D)^2 + (z - z_D)^2} + e = R_D \end{cases} \quad (1)$$

где  $x, y, z$  – искомые координаты;  
 $x_i, y_i, z_i$  – координаты  $i$ -го спутника;  
 $R_i$  – расстояние до  $i$ -го спутника;  
 $e$  – общая для всех спутников ошибка определения расстояний.

В случае определения координат объекта, для которого точно известно, что он находится на поверхности земли, четвертое уравнение системы можно опустить и вместо него использовать уравнение сферического приближения земной поверхности [3] либо, используя всего три уравнения, выбрать из двух корней тот, что находится на поверхности земли. При этом необходимо обеспечивать синхронизацию часов спутников и приемника, поскольку четвертое уравнение позволяет вычислять разность хода часов на спутниках и приемнике и вносить соответствующие корректировки в часы приемника.

**Переход от сфер к гиперболам**

Гиперболической навигацией обычно называют навигационные системы, основанные на измерении разниц времени приема двух сигналов без необходимости в синхронизации часов приемника и устройства, передающего сигнал [4]. Для гиперболической навигации на плоскости распределение разниц времен прибытия сигнала с двух передающих устройств представляет гиперболу.

Два таких измерения позволяют построить две гиперболы, пересекающиеся в двух точках. Построение третьей гиперболы позволяет определить точное местоположение приемника.

В статье [4] приведен метод определения координат приемника, не требующий синхронизации часов приемника и спутников. Метод использует разности расстояний от спутников до приемника и сводится к решению следующей системы уравнений:

$$R_A = \sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 + (z - z_A)^2} \quad (2)$$

$$R_B = \sqrt{(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + (z - z_B)^2} \quad (3)$$

$$R_C = \sqrt{(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2} \quad (4)$$

$$R_D = \sqrt{(x - x_D)^2 + (y - y_D)^2 + (z - z_D)^2} \quad (5)$$

$$R_{AB} = R_A - R_B \quad (6)$$

$$R_{AC} = R_A - R_C \quad (7)$$

$$R_{AD} = R_A - R_D \quad (8)$$

$$R_{BC} = R_B - R_C \quad (9)$$

$$R_{BD} = R_B - R_D \quad (10)$$

где  $x, y$  – координаты приемника;  
 $x_i, y_i$  – координаты  $i$ -го спутника;  
 $R_i$  – расстояние от  $i$ -го спутника до приемника;  
 $R_{ij}$  – разниц расстояний от  $i$ -го спутника до приемника и  $j$ -го спутника до приемника.

С помощью математических преобразований уравнения данной системы можно свести к полным квадратичным формам (ПКФ). Преобразование приведено в статье [5].

Полученные уравнения являются ПКФ трехмерных поверхностей и в общем виде выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} &A_{11}x^2 + A_{22}y^2 + A_{33}z^2 + 2A_{12}xy + \\ &+ 2A_{13}xz + 2A_{23}yz + 2A_{14}x + \\ &+ 2A_{24}y + 2A_{34}z + A_{44} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Имея данные о 4 спутниках, можно составить 6 ПКФ вида (11). Расчет коэффициентов одной из ПКФ (для спутников А и В) приведен ниже:

$$\begin{aligned}
A_{11} &= \left(\frac{x_B - x_A}{R_{AB}}\right)^2 - 1, + \\
A_{22} &= \left(\frac{y_B - y_A}{R_{AB}}\right)^2 - 1, \\
A_{33} &= \left(\frac{z_B - z_A}{R_{AB}}\right)^2 - 1, \\
A_{12} &= \left(\frac{x_B - x_A}{R_{AB}}\right) \left(\frac{y_B - y_A}{R_{AB}}\right), \\
A_{13} &= \left(\frac{x_B - x_A}{R_{AB}}\right) \left(\frac{z_B - z_A}{R_{AB}}\right), \\
A_{23} &= \left(\frac{y_B - y_A}{R_{AB}}\right) \left(\frac{z_B - z_A}{R_{AB}}\right), \\
A_{14} &= \left(\frac{x_B - x_A}{R_{AB}}\right) \left(\frac{x_A^2 - x_B^2 + y_A^2 - y_B^2 + z_A^2 - z_B^2 - R_{AB}^2}{2R_{AB}}\right) + x_B, \\
A_{24} &= \left(\frac{y_B - y_A}{R_{AB}}\right) \left(\frac{x_A^2 - x_B^2 + y_A^2 - y_B^2 + z_A^2 - z_B^2 - R_{AB}^2}{2R_{AB}}\right) + y_B, \\
A_{34} &= \left(\frac{z_B - z_A}{R_{AB}}\right) \left(\frac{x_A^2 - x_B^2 + y_A^2 - y_B^2 + z_A^2 - z_B^2 - R_{AB}^2}{2R_{AB}}\right) + z_B, \\
A_{44} &= \left(\frac{x_A^2 - x_B^2 + y_A^2 - y_B^2 + z_A^2 - z_B^2 - R_{AB}^2}{2R_{AB}}\right).
\end{aligned} \tag{12}$$

Геометрическим представлением уравнений данной системы являются гиперболоиды. Точкой пересечения пяти таких гиперболоидов являются координаты приемника [5].

#### **Алгоритм гиперболической трилатерации**

Алгоритм спутниковой навигации, использующий системы уравнений (11), выглядит следующим образом:

- 1) получить 5 трехмерных ПКФ;
- 2) подставив в 4 трехмерные ПКФ начальное приближение  $Z$ , получить 4 двумерные ПКФ;
- 3) используя алгоритм расчета точек пересечения коник [6], получить по 4 точки пересечения для каждой из 6 пар коник;
- 4) выбрать из каждой пары по точке таким образом, чтобы точки минимально отличались друг от друга;
- 5) посчитать грубые  $X$ ,  $Y$  как среднее полученных в 4 пункте точек;
- 6) подставить  $X$ ,  $Y$  из 5 пункта в 5 трехмерную ПКФ из пункта 1, получить квадратное уравнение;
- 7) решить квадратное уравнение, выбрать корень, минимально отличающийся от  $Z$ ;
- 8) выполнить пункты 2 – 5, в пункте 2 подставив  $Z$  из пункта 7.

В результате  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  становятся равны координатам приемника.

Числовой пример выполнения алгоритма приведен в [7].

Результаты работы алгоритма представлены на рисунке 2. Большой круг здесь – координаты приемника (радиус – погрешность), квадраты – результаты работы сферической трилатерации, треугольники – результаты работы гиперболической трилатерации. На графике видно, что результаты гиперболической трилатерации расположены менее кучно, чем результаты сферической трилатерации.

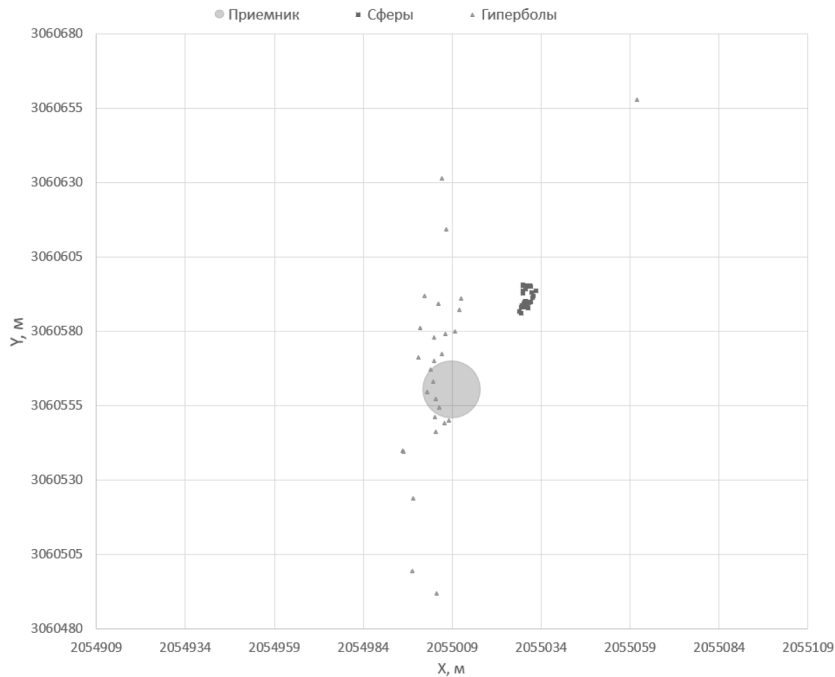


Рисунок 2. Результаты работы программы

### Повышение точности алгоритма

Поскольку навигационные спутники находятся на значительном удалении от поверхности Земли, в алгоритмах обработки спутниковых данных встречаются сравнительно большие числа. Числа в памяти обычно представляются либо в виде числа с фиксированной запятой, либо в виде числа с плавающей запятой. При этом числа с плавающей запятой представляются в виде трех чисел, в которые записываются знак, мантисса и экспонента числа. Размерность мантиссы чисел типа double равна [8] 52 бита. При такой размерности ошибки вычислений начнут происходить при числах больше 1015 [9].

Для обеспечения большей точности необходимо использовать библиотеку работы с числами произвольной размерности. В данной работе используется GNU Multiple Precision Arithmetic Library (GMP). GMP

является свободной библиотекой арифметики с числами произвольной размерности. Она работает со знаковыми целыми числами, числами с фиксированной запятой и числами с плавающей запятой. Максимальная размерность чисел при этом ограничена только памятью оборудования, на котором работает библиотека. Помимо основных арифметических действий в GMP реализовано большое количество функций, таких как экспонента, тригонометрические функции, вычисление квадратного корня и т.д. [10].

В ходе повышения точности с 52 до 58 бит с шагом в 2 бита было обнаружено, что разброс результатов гиперболической трилатерации становится равным разбросу результатов сферической трилатерации при размерности чисел, равной 58 бит. Повышение точности показано на рисунке 3.



Рисунок 3. Повышение разрядности с 52 до 58 бит с шагом в 2 бита

### Вывод

Подобрано и модифицировано для работы с алгоритмом гиперболической трилатерации свободное ПО GNSS-SDR, реализующее программно-определяемый спутниковый приемник.

С помощью программно-определяемой радиосистемы получены тестовые данные, необходимые для сравнения алгоритмов.

Разработан и реализован алгоритм гиперболической трилатерации, использующий в качестве начального приближения данные GNSS-SDR.

Проведено сравнение результатов работы GNSS-SDR без дополнительной обработки гиперболической трилатерацией и с ней. В результате показано, что гиперболическая

трилатерация точнее приблизительно на 15-20 метров при точности сферической трилатерации, равной 80 метрам, а гиперболической – 60 метрам.

Проанализирован разброс результатов гиперболической трилатерации и найдено решение, уменьшающее разброс результатов гиперболической трилатерации.

Задачами последующих исследований являются:

- подбор первоначального приближения, не зависящего от результатов сферической трилатерации;
- аппаратная реализация спутникового приемника, использующего алгоритм гиперболической трилатерации.

### Список литературы

1. Хрусталеv Д. GPS – взгляд изнутри. Спутниковая навигация и принципы построения приемников GPS и ГЛОНАСС // Компоненты и Технологии. – 2001. - № 6. – С. 118-120.

2. Конин В.В. Спутниковые системы и технологии. – Киев: Национальный авиационный университет, 2000. – 245 с.

3. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 272 с.

4. Егoшин А.В., Моторов М.Н. Определение координат систем радионавигации GPS и ГЛОНАСС на основе измерения времени прихода сигналов со спутника // Программные системы и вычислительные методы. – 2014. - № 2 (7). – С. 217-227.

5. Гиниятуллин В.М., Шабанов Э.В. К вопросу о получении полных квадратичных форм для приложений спутниковой навигации // Актуальные проблемы науки и техники: Материалы IX Международной научно-практической конференции молодых ученых. – Уфа, 2016. – С. 273-275.

6. Арсланов И.Г., Богданова П.Д., Гиниятуллин В.М. Классификация взаиморасположений двух коник: монография. – Саарбрюккен: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2014. – 132 с.

7. Гиниятуллин В.М., Шабанов Э.В. Гиперболическая трилатерация // Актуальные проблемы науки и техники: Материалы X

Международной научно-практической конференции молодых ученых. – Уфа, 2017. – С. 220-224.

8. IEEE 754 — стандарт двоичной арифметики с плавающей точкой. URL: <http://www.softelectro.ru/ieee754.html> (дата обращения: 02.12.2017).

9. Хэзфилд Р., Кирби Л. Искусство программирования на С. Фундаментальные алгоритмы, структуры данных и примеры приложений. Энциклопедия программиста. Киев: ДиаСофт, 2001. – 736 с.

10. The GNU MP Bignum Library. URL: <https://gmplib.org> (дата обращения: 02.12.2017).

### References

1. Hrustalev D. GPS – the view from the inside. Satellite navigation and principles of construction of receivers GPS and GLONASS // Components and Technologies. – 2001. – no. 6. – p. 118-120.

2. Konin V.V. Satellite systems and technologies. – Kyiv: National Aviation University, 2000. – 245 p.

3. Jacenkov V.S. Basics of satellite navigation. – M.: Hot line – Telecom. 2005. – 272 p.

4. Egoshin A.V., Motorov M.N. Determination of coordinates of GPS and GLONASS radio navigation systems based on satellite signal arrival time measurement // Software systems and computational methods. – 2014. – no. 2 (7). – p. 217-227.

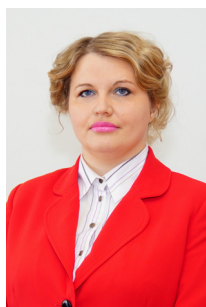
5. Giniyatullin V.M., Shabanov Je.V. On the question of obtaining complete quadratic forms for satellite navigation applications // Actual problems of science and technology: Proceedings of the IX International scientific and practical conference of young scientists. – Ufa, 2016. – p. 273-275.
6. Arslanov I.G., Bogdanova P.D., Giniyatullin V.M. Classification of the relative positions of two conics: a monograph. – Saarbrücken: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2014. – 132 p.
7. Giniyatullin V.M., Shabanov E.V. Hyperbolic trilateration // Actual problems of science and technology: Proceedings of the X International scientific and practical conference of young scientists. – Ufa, 2017. – p. 220-224.
8. IEEE 754 — binary floating-point arithmetic standard. URL <http://www.softelectro.ru/ieee754.html> (accessed: 02.12.2017).
9. Hjezfeld R., Kirby L. The art of computer programming. Fundamental algorithms, data structures and application examples. Encyclopedia of programmers. – Kyiv: DiaSoft, 2001. – 736 p.
10. The GNU MP Bignum Library. Available at: <https://gmplib.org> (accessed: 02.12.2017).





**Лихачев Е.А.**  
**Likhachev E.A.**

*старший преподаватель  
кафедры «Информационно-  
измерительная техника»,  
факультет авионики,  
энергетики и  
инфокоммуникаций,  
Уфимский государственный  
авиационный технический  
университет,  
г. Уфа,  
Российская Федерация*



**Зайцева А.А.**  
**Zaytseva A.A.**

*доцент, кандидат  
технических наук  
кафедры «Информационно-  
измерительная техника»,  
факультет авионики,  
энергетики и  
инфокоммуникаций,  
Уфимский государственный  
авиационный технический  
университет,  
г. Уфа,  
Российская Федерация*



**Клименко О.В.**  
**Klimenko O.V.**

*студент  
кафедры «Информационно-  
измерительная техника»,  
факультет авионики,  
энергетики и  
инфокоммуникаций,  
Уфимский государственный  
авиационный технический  
университет,  
г. Уфа,  
Российская Федерация*

УДК 621.317.791

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-2-70-76

## **МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ САУ ВЕРТОЛЁТА Ка-226**

САУ представляет собой цифровой комплекс, в котором задачи контроля решаются с помощью встроенных средств контроля (ВСК) с использованием бортовых средств контроля (БСК), без применения дополнительных наземных автоматизированных систем контроля и контрольно-проверочной аппаратуры (КПА).

В связи с тем, что задачи обработки информации, логики управления и пилотажных алгоритмов реализуются программно-аппаратным способом в специализированном вычислителе (ВУП), определение входных стимулирующих и выходных контролируемых сигналов, используемых для контроля параметров, характеризующих исправность блоков САУ, с построением развернутых таблиц стимулирующих и контролируемых параметров не представляется возможным.

Поэтому в качестве стимулирующих сигналов ВСК САУ при проведении контроля предлагается использовать обобщенные признаки, которые включают в себя аппаратные исправности блоков САУ, контроль наличия ввода данных и состояния входных параметров от датчиков, сравнение параметров цифровой модели сервопривода РМ АП с реальными перемещениями штоков.

В качестве контролируемых сигналов предлагается использовать обобщенные интегральные признаки исправности блоков, сформированные по результатам проведения контроля.

Для определения параметров полноты контроля и коэффициентов глубины поиска отказов строятся функционально-логические модели (ФЛМ). При этом используются логически обобщенные параметры (стимулирующие сигналы и признаки исправности).

В данной работе приведены результаты моделирования последствий контролируемых и неконтролируемых отказов САУ, приводящих к резким забросам автопилотных штоков гидроусилителя КАУ-165. Представленные материалы дают возможность оценить поведение

вертолета от момента отказа до момента предполагаемого вмешательства летчика в управление. Приведена методика моделирования отказов и критерии оценки последствий отказов для объекта Ка-226.

**Ключевые слова:** система автоматического управления, вертолет, отказ, надежность, тангаж, крен, курс, частота вращения турбокомпрессора, положение лопаток ВНА, эксперимент, перегрузка.

## Ka-226 HELICOPTER SELF-PROPELLED GUN FAILURE MODELING TECHNIQUE

ACS is a digital complex in which control tasks are solved with the help of built-in control means (VSC) using on-Board control means (BSC), without the use of additional ground automated control systems and control and verification equipment (KPA).

Due to the fact that the tasks of information processing, control logic and aerobatic algorithms are implemented by software and hardware in a specialized computer (VUP), the definition of input and output stimulatory signals used to control the parameters characterizing the serviceability of ACS units, with the construction of detailed tables of stimulating and controlled parameters is not possible.

Therefore, it is proposed to use generalized features as stimulating signals of ACS during the control, which include hardware serviceability of ACS units, control of data input and the state of the input parameters from the sensors, comparison of the parameters of the digital model of the RM AP servo with the real movements of the rods.

As controlled by signals it is proposed to use the generalized integral characteristics of the health units, generated by the results of the inspection.

To determine the parameters of completeness of control and the coefficients of the depth of failure search, functional and logical models (FLM) are constructed using logically generalized parameters (stimulating signals and signs of serviceability).

In this paper we present the results of modeling the consequences of controlled and uncontrolled failures of ACS, leading to a sharp casting of the autopilot rods of the power steering KAU-165. The presented materials make it possible to assess the behavior of the helicopter from the time of failure to the time of the alleged intervention of the pilot in control. The technique of modeling of cracks and criteria of assessment of the implications of failure to object, the Ka-226.

**Key words:** automatic control system, helicopter, failure, reliability, pitch, roll, heading, turbo-compressor speed, position of VNA blades, experiment, overload.

В работе исследуются активные отказы, то есть отказы, сопровождающиеся резким отклонением рулевых поверхностей.

В САУ объекта Ка-226 имеются системы контроля исправности вычислителя, рулевой машины и датчиков, которые не только обнаруживают и сигнализируют летчику о факте отказа, но и выполняют автоматическое отключение отказавшего канала управления. Учитывая наличие систем контроля, моделирование выполнено как для случая контролируемого отказа, так и для случая, когда система контроля не обнаружила отказа. При этом следует отметить, что расчетная вероятность последнего события не превышает  $\lambda \cdot 10^{-6}$  за один час полета.

Дополнительно выполнены отказы, вызванные обрывом обратной связи сервоконтуров рулевых машин в предположении, что система контроля отключена.

Для проверки отказобезопасности САУ в режиме угловой стабилизации целесообразно провести моделирование следующих состояний отказа:

- контролируемый одноканальный отказ. Автопилотный шток гидроусилителя резко перемещается от «нейтрали» на механический упор и через 0,4 с после возникновения отказа возвращается в «нейтраль» за время  $\approx 1,5$  с. Время 0,4 с – это время, необходимое для надежного обнаружения отказа системой контроля. В неотказавших каналах

обеспечивается нормальное функционирование;

- контролируемый одноканальный отказ, приводящий к резкому перемещению автопилотного штока гидроусилителя с одного механического упора на другой через 0,4 с после возникновения отказа штоков возвращается в «нейтраль» за время  $\approx 1,5$  с. В неотказавших каналах обеспечивается нормальное функционирование:

- контролируемый трехканальный отказ, приводящий к резкому забросу автопилотных штоков гидроусилителя от «нейтрали» на механические упоры с последующим возвратом их в «нейтраль» через 0,4 с после возникновения отказа. Рассматриваются все возможные варианты;

- контролируемый трехканальный отказ, приводящий к резкому перемещению автопилотных штоков гидроусилителя с одного механического упора на другой, через 0,4 с после возникновения отказа штоки возвращается в «нейтраль». Рассматриваются все возможные варианты;

- неконтролируемый одноканальный отказ, приводящий к резкому забросу автопилотного штока гидроусилителя от «нейтрали» на механические упоры. В неотказавших каналах обеспечивается нормальное функционирование;

- неконтролируемый одноканальный отказ, приводящий к резкому перемещению автопилотного штока гидроусилителя с одного механического упора на другой. В неотказавших каналах обеспечивается нормальное функционирование;

- неконтролируемый трехканальный отказ, приводящий к резкому забросу автопилотных штоков гидроусилителя от «нейтрали» на механические упоры. Рассматриваются все возможные варианты;

- неконтролируемый трехканальный отказ, приводящий к резкому перемещению автопилотных штоков гидроусилителя с одного механического упора на другой. Рассматриваются все возможные варианты;

- неконтролируемый одноканальный отказ, возникающий при обрыве обратной связи сервоконтуров в рулевой системе.

Моделирование отказов в режиме угловой стабилизации выполняется на скоростях полета  $V=0, 90, 140, 180$  км/ч в условиях прямолинейного горизонтального полета.

Отказы вводятся в конце первой секунды полета.

#### Модели, используемые при исследованиях

При математическом моделировании отказов использовалась модель вертолѐта с переменными по скорости коэффициентами.

Датчики углов и угловых скоростей имитируются пропорциональными звеньями. При использовании моделей не учитывались зоны нечувствительности рулевых машин и бустеров.

#### Описание законов управления

Законы управления, обеспечивающие угловую стабилизацию вертолѐта, имеют вид:

$$\begin{cases} \Delta\delta_{z.a.n.} = i_{\vartheta} \cdot \Delta\vartheta + i_{\omega_z} \cdot \omega_z \cdot \Phi; \\ \Delta\delta_{x.a.n.} = i_{\gamma} \cdot \Delta\gamma + i_{\omega_x} \cdot \omega_x \cdot \Phi; \\ \Delta\varphi_{дош.a.n.} = i_{\psi} (V_{пр}) \cdot \Delta\psi + i_{\omega_y} (V_{пр}) \cdot \omega_y \cdot \Phi; \end{cases}$$

$$\text{где } \omega_z^{\Phi} = \frac{1}{T_{\omega_z}^{\Phi} + 1} \cdot \omega_z; \quad \omega_x^{\Phi} = \frac{1}{T_{\omega_x}^{\Phi} + 1} \cdot \omega_x; \quad \omega_y^{\Phi} = \frac{1}{T_{\omega_y}^{\Phi} + 1} \cdot \omega_y;$$

$$T_{\omega_z}^{\Phi} = 0.05\text{с}; \quad T_{\omega_x}^{\Phi} = 0.05\text{с}; \quad T_{\omega_y}^{\Phi} = 0.05\text{с}.$$

$$i_{\vartheta} = -0.234 \frac{\text{град}}{\text{град}} = -14 \frac{\% \text{ х.штг.}}{\text{град}}; \quad i_{\omega_z} = -0.15 \frac{\text{град}}{\text{град/с}} = -9 \frac{\% \text{ х.штг.}}{\text{град/с}};$$

$$i_{\gamma} = -0.2 \frac{\text{град}}{\text{град}} = -15.5 \frac{\% \text{ х.штг.}}{\text{град}}; \quad i_{\omega_x} = -0.1 \frac{\text{град}}{\text{град/с}} = -7.75 \frac{\% \text{ х.штг.}}{\text{град/с}};$$

$$t_{\psi}(V_{np}) = \begin{cases} 0.05 \frac{\text{град}}{\text{град}}, \text{ при } V_{np} \leq 100 \text{ км/ч}; \\ (0.05 - 0.0008 \cdot (V_{np} - 100)) \frac{\text{град}}{\text{град}}, \text{ при } 100 \text{ км/ч} < V_{np} < 150 \text{ км/ч}; \\ 0.01 \frac{\text{град}}{\text{град}}, \text{ при } V_{np} \geq 150 \text{ км/ч} \end{cases}$$

$$t_{\omega_y}(V_{np}) = \begin{cases} 0.078 \frac{\text{град.}}{\text{град/с}}, \text{ при } V_{np} \leq 100 \text{ км/ч}; \\ (0.078 - 0.00116 \cdot (V_{np} - 100)) \frac{\text{град.}}{\text{град/с}}, \text{ при } 100 \text{ км/ч} < V_{np} < 150 \text{ км/ч}; \\ 0.02 \frac{\text{град}}{\text{град/с}}, \text{ при } V_{np} \geq 150 \text{ км/ч} \end{cases}$$

$$t_{\psi}(V_{np}) = \begin{cases} 16.7 \frac{\% \text{х.ит.}}{\text{град}}, \text{ при } V_{np} \leq 100 \text{ км/ч}; \\ (16.7 - 0.268 \cdot (V_{np} - 100)) \frac{\% \text{х.ит.}}{\text{град}}, \text{ при } 100 \text{ км/ч} < V_{np} < 150 \text{ км/ч}; \\ 3.3 \frac{\% \text{х.ит.}}{\text{град}}, \text{ при } V_{np} \geq 150 \text{ км/ч} \end{cases}$$

$$t_{\omega_y}(V_{np}) = \begin{cases} 26.0 \frac{\% \text{х.ит.}}{\text{град/с}}, \text{ при } V_{np} \leq 100 \text{ км/ч}; \\ (26.0 - 0.386 \cdot (V_{np} - 100)) \frac{\% \text{х.ит.}}{\text{град/с}}, \text{ при } 100 \text{ км/ч} < V_{np} < 150 \text{ км/ч}; \\ 6.7 \frac{\% \text{х.ит.}}{\text{град/с}}, \text{ при } V_{np} \geq 150 \text{ км/ч} \end{cases}$$

### Методика оценки последствий отказов САУ

Количественной мерой последствий отказов служат максимальные величины отклонений углов и перегрузок, возникающих вследствие отказов, в течение времени от момента отказа до момента вмешательства летчика в управление.

По материалам летных исследований, среднее значение потребного времени САУ составляет 0,8 с для канала крена и 0,9 – 1 с для канала тангажа.

Величина интервала времени, требующегося для распознавания и вмешательства летчика в управление с целью парирования отказа, составляет 2 с.

Допустимая область изменения параметров для каждого вертолета определяются заказчиком.

При этом считается, что летчик может вывести вертолет из неблагоприятной ситуации, если за время реакции летчика на резкий отказ параметры полета не выйдут за пределы ограничения допустимой области.

По результатам моделирования составлены таблицы, в которых приводятся временные зависимости параметров вертолета  $\vartheta, \gamma, \psi, \Delta n_x, \Delta n_y, \Delta n_z$  при отказах САУ.

Определены максимальные значения параметров вертолета за время от момента отказа ( $t_{отк} = 1$  с) до момента вмешательства летчика в управление вертолетом. При этом данные моделирования позволяют определить величины отклонений углов и приращений перегрузок в течение 4 с после отказа.



### Моделирование контролируемых отказов САУ. Результаты моделирования одноканальных отказов

Результаты моделирования одноканальных отказов, приводящих к резкому забросу автопилотного штока от «нейтраль» на механический упор с последующим возвратом его в «нейтраль» через 0,4 с после возникновения отказа. Максимальные значения углов тангажа, крена, курса и составляющих вектора перегрузки за время  $\tau_{л}=2$  с (от 1 до 3 с).

Из приведенных материалов видно, что за время  $\tau_{л}=2$  с величины углов тангажа, крена и курса достигают +19.5,-11.53;  $\pm 16.7$ ;  $\pm 18.8$  град соответственно. Приращения составляющих вектора перегрузки  $n_x, n_y, n_z$  достигают  $\pm 0.05$ ; +0.262, -0.334;  $\pm 0.185$  ед. пер. соответственно.

Результаты моделирования одноканальных отказов, приводящих к резкому перемещению автопилотного штока с одного механического упора на другой с последующим возвратом его в «нейтраль» через 0,4 с после возникновения отказа:

- за время  $\tau_{л}=2$  с величины углов тангажа, крена и курса достигают +45.4,-35.3;  $\pm 45.4$ ;  $\pm 54.8$  град соответственно. Приращения составляющих вектора перегрузки  $n_x, n_y, n_z$  достигают +0.137, -0.115; +0.685, -0.981;  $\pm 0.32$  ед. пер. соответственно.

### Результаты моделирования трехканальных отказов

Результаты моделирования трехканальных отказов, приводящих к резкому забросу автопилотного штока от «нейтраль» на механический упор с последующим возвратом его в «нейтраль» через 0,4 с после возникновения отказа. Максимальные значения приращений углов тангажа, крена, курса и составляющих вектора перегрузки за время  $\tau_{л}=2$  с (от 1 до 3 секунды):

- за время  $\tau_{л}=2$  с величины углов тангажа, крена и курса достигают +20.4,-14.2;  $\pm 19.8$ ;  $\pm 21.1$  град соответственно. Приращения составляющих вектора перегрузки  $n_x, n_y, n_z$  достигают  $\pm 0.05$ ,  $\pm 0.39$ ;  $\pm 0.21$  ед. пер. соответственно.

Результаты моделирования трехканальных отказов, приводящих к резкому перемещению автопилотного штока с одного механического упора на другой с последующим воз-

вратом его в «нейтраль» через 0,4 с после возникновения отказа. Максимальные значения приращений углов тангажа, крена, курса и составляющих вектора перегрузки за время  $\tau_{л}=2$  с (от 1 до 3 с):

- за время  $\tau_{л}=2$  с величины углов тангажа, крена и курса достигают +49.5,-48.9;  $\pm 56.6$ ;  $\pm 63.3$  град соответственно. Приращения составляющих вектора перегрузки  $n_x, n_y, n_z$  достигают +0.25,-0.11; +0.51, -1.23;  $\pm 0.4$  ед. пер. соответственно.

Последствия трехканальных отказов заметно хуже, чем последствия одноканальных отказов.

### Результаты моделирования отказов, вызванных обрывом обратной связи рулевой системы

При моделировании отказов в качестве внешнего возмущения имитировалось действие слабовозмущенной атмосферы ( $\sigma_{wx,wy,wz}=0.5$  м/с).

С момента отказа в каналах автопилота развиваются автоколебания.

В канале тангажа автоколебания имеют период  $\approx 1,2$  с ( $f=0.83$  Гц) и амплитуду, не превышающую 1,2 град.

В канале крена автоколебания имеют период  $\approx 1,13$  с ( $f=0.88$  Гц) и амплитуду, не превышающую 1,44 град.

В канале направления автоколебания имеют период  $\approx 1,03 - 1,3$  с ( $f=0.97-0.77$  Гц) и амплитуду, не превышающую 0,4 – 1,82 град для скоростей полета  $V=0 - 180$  км/ч.

### Моделирование неконтролируемых отказов. Результаты моделирования одноканальных отказов

Максимальные значения приращений углов тангажа, крена, курса и составляющих вектора перегрузки за время  $\tau_{л}=2$  с (от 1 до 3 с):

- за время  $\tau_{л}=2$  с величины углов тангажа, крена и курса достигают +30.9,-21;  $\pm 29.8$ ;  $\pm 36$  град соответственно. Приращения составляющих вектора перегрузки  $n_x, n_y, n_z$  достигают  $\pm 0.1$ ; +0.54, -0.72;  $\pm 0.28$  ед. пер. соответственно.

Максимальные значения приращений углов тангажа, крена, курса и составляющих вектора перегрузки за время  $\tau_{л}=2$  с (от 1 до 3 с):



- за время  $\tau_{л}=2$  с величины углов тангажа, крена и курса достигают +57.2, -46.9;  $\pm 58.5$ ;  $\pm 69$  град соответственно. Приращения составляющих вектора перегрузки  $n_x, n_y, n_z$  достигают +0.22, -0.17; +0.88, -1.36;  $\pm 0.33$  ед. пер. соответственно.

Анализ материалов показывает:

- принудительный возврат автопилотных штоков гидроусилителя КАУ-165 в «нейтраль» при автоматическом обнаружении отказа приводит к уменьшению отклонений углов и вертикальной перегрузки.

#### **Результаты моделирования трехканальных отказов**

Максимальные значения приращений углов тангажа, крена, курса и составляющих вектора перегрузки за время  $\tau_{л}=2$  с (от 1 до 3 с):

- за время  $\tau_{л}=2$  с величины углов тангажа, крена и курса достигают +33.1, -28.8;  $\pm 34.8$ ;  $\pm 40.7$  град соответственно. Приращения составляющих вектора перегрузки  $n_x, n_y, n_z$  достигают +0.16, -0.09;  $\pm 0.48, -0.91$ ;  $\pm 0.36$  ед. пер. соответственно.

Максимальные значения приращений углов тангажа, крена, курса и составляющих вектора перегрузки за время  $\tau_{л}=2$  с (от 1 до 3 с):

- за время  $\tau_{л}=2$  с величины углов тангажа, крена и курса достигают +61.4, -64.8;  $\pm 72.9$ ;  $\pm 84.2$  град соответственно. Приращения составляющих вектора перегрузки  $n_x, n_y, n_z$  достигают +0.47, -0.23; +0.63, -2.43;  $\pm 0.34$  ед. пер. соответственно.

Анализ материалов показывает:

- принудительный возврат автопилотных штоков гидроусилителя КАУ-165 в «нейтраль» при автоматическом обнаружении отказа приводит к уменьшению отклонений углов и вертикальной перегрузки.

#### **Вывод**

Представленные в отчете материалы позволяют, задавая время от момента отказа

до момента предполагаемого вмешательства летчика в управление, определить максимальные значения приращений углов и составляющих вектора перегрузки, соответствующих этому времени:

- из материалов отчета следует, что при принудительном возврате автопилотных штоков гидроусилителя КАУ-165 в «нейтраль», в случае контролируемых отказов, существенно уменьшается величина отклонений углов и составляющих вектора перегрузки, вызванных этим отказом. При невмешательстве в течение 2 с максимальные отклонения углов тангажа, крена и курса уменьшаются в 1,2 – 2 раза. Составляющие вертикальной перегрузки уменьшаются в 1,3 – 1,95 раза.

- максимальные значения углов тангажа, крена, курса в случае одноканальных контролируемых отказов, приводящих к резкому забросу автопилотного штока от «нейтрали» на механический упор, за время  $\tau_{л}=2$  с не превысили 19, 16, 7, 18, 8 град соответственно. Максимальное приращение вертикальной перегрузки составило 0,334 ед. пер. В случае одноканальных контролируемых отказов, приводящих к резкому забросу автопилотного штока с одного механического упора на другой за время  $\tau_{л}=2$  с максимальные значения углов тангажа, крена, курса не превысили 45,3, 45,4, 54,8 град соответственно. Максимальное приращение вертикальной перегрузки составило 0,981 ед. пер.

- последствия многоканальных контролируемых отказов, сопровождающихся плавным выключением САУ, существенно хуже последствий одноканальных. В случае трехканального отказа, приводящего к резкому забросу автопилотных штоков с одного механического упора на другой, приращения углов тангажа, крена и курса достигают при  $\tau_{л}=2$  с 49, 56,5, 63 град соответственно. Приращения вертикальной перегрузки достигают 1,23 ед. пер.

#### **Список литературы**

1. Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Силаев А.В. Реконфигурация системы управления летательными аппаратами при отказах // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 1. – с. 3-20.

2. Уравнения движения вертолета Ка-226. Письмо ОАО «КАМОВ», вх. № 444 от 16.05.2000 г.

3 Описание математических моделей вертолета КА-226, динамики несущего винта,

рулевых машин, турбулентной атмосферы. Отчет № 178-220-02, 2002г.

4. Сравнительный анализ результатов стендовых и летных исследований последствий отказов САУ на вертолете с летчиком в контуре управления. Отчет № 1321-78-II предприятия п/я В-8759, 1978 г.

5. Руководство по летной эксплуатации вертолета Ка-226, ОАО "Камов", 2002. - 664с

6. Глумов В.М., Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Силаев А.В. Повышение живучести автоматических систем с использованием алгоритмического обеспечения инвариантности к отказам // Надежность, живучесть и безопасность автоматизированных комплексов: Тезисы доклада IV Всесоюзного совещания. – М.: ИПУ АН СССР, 1988. – С. 29-30.

7. Егупов Н.Д., Пупков К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления. – Т. 3: Методы современной теории автоматического управления. – М: МГТУ, 2004. – С. 616.

#### References

1. Zemljakov S.D., Rutkovskij V.Ju., Silajev A.V. Rekonfiguracija sistemy upravlenija letatel'nymi apparatami pri otkazah // Avtomatika i telemekhanika. – 1996. – № 1. – s. 3-20.

2. Uravnenija dvizhenija vertoleta Ka-226. Pis'mo ОАО "КАМОВ", v. № 444 ot 16.05.2000 g.

3. Opisanije matematicheskikh modelej vertoleta KA-226, dinamiki nesushhego vinta, rulevyh mashin, turbulentnoj atmosfery. Otchet № 178-220-02, 2002 g.

4. Sravnitel'nyj analiz rezul'tatov stendovyh i letnyh issledovanij posledstvij otkazov SAU na vertolete s letchikom v konture upravlenija. Otchet № 1321-78-II predpriyatija p/ja V-8759, 1978 g.

5. Rukovodstvo po letnoj ekspluatacii vertoleta Ka-226, ОАО "Kamov", 2002. – 664 s.

6. Glumov V.M., Zemljakov S.D., Rutkovskij V.Ju., Silajev A.V. Povyshenije zhivuchesti avtomaticheskikh sistem s ispol'zovanijem algoritmicheskogo obespechenija invariantnosti k otkazam // Nadezhnost', zhivuchest' i bezopasnost' avtomatizirovannyh kompleksov: Tezisy doklada IV Vsesojuznogo soveshhanija. – М.: IPU AN SSSR, 1988. – s. 29-30.

7. Jegupov N.D., Pupkov K.A. Metody klassicheskoy i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija. T. 3: Metody sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija. – М: MGTU, 2004. – s. 616.



*Самаров Е.К.*

*Samarov E.K.*

*кандидат технических наук,  
декан факультета инфокоммуникационных систем и технологий,  
Технологический университет,  
г. Королев, Московская область, Российская Федерация*

УДК 004.932

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-2-77-83

## СИНТЕЗ АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОЙ ЛИНЕЙНОЙ МОДУЛЯЦИИ ШУМА В ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Задачи цифровой обработки изображений являются важными составляющими огромного количества направлений современной прикладной науки. Примерами таких задач являются хранение, передача, воспроизведение и анализ фотографических образов, сделанных на медицинском оборудовании, картографических снимков, авиакосмических изображений, различных фотографий военной направленности и многие другие. При этом данные, получаемые с любого регистрирующего устройства, подвергаются обработке программно-аппаратными средствами в целях минимизации их объема при допустимом уровне потери качества в зависимости от функционального назначения. В большинстве случаев возникает потребность в подавлении шума, обусловленная тем, что, во-первых, он является избыточной информацией, увеличивающей объем изображения, а, во-вторых, может уменьшать полезные свойства изображения или даже исказить результаты измерений.

В настоящей статье разработан и предлагается алгоритм оптимальной линейной модуляции для подавления шума в цифровой обработке изображений. Она включает в себя описание дискретного двумерного косинусного преобразования, применяемого при обработке цифровых изображений в соответствии со стандартом сжатия JPEG, использование частотных и пространственных фильтров, осуществление фильтрации по окрестностям элементов пространственной области и предложенную модель подавления шума при помощи оптимальной линейной модуляции по окрестностям. Разработанный алгоритм подавления шума может быть применен не только к изображениям в стандарте JPEG, но и к изображениям в стандартах ICER и JPEG2000, в которых используются более совершенные методы сжатия цифровых изображений, основанные уже не на дискретных преобразованиях Фурье, а на современных вейвлет-преобразованиях.

Настоящая статья имеет существенное практическое значение. В работе сделан упор именно на математических аспектах высокоэффективных алгоритмов для компьютерной цифровой обработки изображений, цифровой фильтрации и подавления шума, программно-аппаратная реализация которых позволит существенно увеличить скорость, точность и степень сжатия изображений.

**Ключевые слова:** цифровые изображения, цифровая обработка изображений, дискретное преобразование Фурье, степень сжатия изображений, стандарт сжатия изображений, частотный фильтр, пространственный фильтр, цифровая фильтрация, линейная модуляция, подавление шума.

## SYNTHESIS OF THE ALGORITHM FOR OPTIMAL LINEAR NOISE MODULATION IN DIGITAL IMAGE PROCESSING

The tasks for digital image processing are important parts of a huge number of areas in modern applied science. Examples of such tasks are the storage, transfer, rendition and analysis of photographic images made by medical equipment, cartographic images, aerospace images, various photos for military purposes, and many others. At the same time, the data obtained from any recording device are processed by software and hardware in order to minimize the volume with an acceptable level of quality loss depending on the functional purpose. In most cases, there is a need to suppress noise, due to the fact that, firstly, it is excessive information that increases the volume of the image, and, secondly, it can reduce the useful properties of the image or even distort the measurement results.

In the article we offer designed algorithm of optimal linear modulation for noise suppression in digital image processing. It includes the description of the discrete two-dimensional cosine transformation used in digital images processing in accordance with the JPEG compression standard, frequency and spatial filters, the implementation of filtration in the neighborhood of the elements of the spatial domain and the designed model of noise suppression using optimal linear modulation in the neighborhood. The developed noise suppression algorithm can be applied not only to images in the JPEG standard used discrete Fourier transformations, but also to images in the ICER and JPEG 2000 standards, which use more advanced methods of digital image compression based on modern wavelet transforms.

This article has essential practical value. It focuses on the mathematical aspects of highly efficient algorithms for computer digital image processing, digital filtering and noise suppression, software and hardware implementation of which will allow significantly increase the rate, accuracy and compression of images.

**Key words:** digital images, digital image processing, discrete Fourier transformation, compression ratio, compression standard, frequency filter, spatial filter, digital filtration, linear modulation, noise suppression.

### 1. Дискретное двумерное преобразование Фурье

Световые датчики регистрирующего прибора расположены на светочувствительной матрице с шагом  $h_1$  по оси абсцисс и с шагом  $h_2$  по оси ординат. Если двумерный аналоговый сигнал  $z(x, y)$  представляет собой яркость монохромного цвета, то его дискретизация в форме прямоугольника с целочисленными сторонами  $X$  и  $Y$  определяется по формуле

$$\tilde{z}(x, y) = \sum_{n=0}^{X-1} \sum_{m=0}^{Y-1} z(x, y) \delta(x_0 + nh_1, y_0 + mh_2),$$

где символом  $\delta$  обозначена обобщенная двумерная функция «Дельта – функция Дирака». Преобразованием Фурье дискретного сигнала  $\tilde{z}(x, y)$  является аналоговый сигнал

$\tilde{Z}(f_1, f_2)$ , вычисляемый по формулам [1]:

$$\begin{aligned} \tilde{Z}(f_1, f_2) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{z}(x, y) e^{-i2\pi f_1 x} e^{-i2\pi f_2 y} dx dy = \\ &= \sum_{n=0}^{X-1} \sum_{m=0}^{Y-1} z(x_0 + nh_1, y_0 + mh_2) e^{-i2\pi(f_1 nh_1 + f_2 mh_2)} = \\ &= \sum_{n=0}^{X-1} \sum_{m=0}^{Y-1} z_{n,m} e^{-i2\pi(f_1 nh_1 + f_2 mh_2)}, \end{aligned}$$

где введено обозначение

$$z_{n,m} = z(x_0 + nh_1, y_0 + mh_2),$$

$$n = 0, 1, \dots, X - 1; \quad m = 0, 1, \dots, Y - 1.$$

Значения аналогового сигнала  $\tilde{Z}(f_1, f_2)$ ,

на частотах

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{k_1}{Xh_1}, & k_1 &= 0, 1, \dots, X - 1, \\ f_2 &= \frac{k_2}{Yh_2}, & k_2 &= 0, 1, \dots, Y - 1 \end{aligned}$$



определяются по формуле

$$\tilde{z}\left(\frac{k_1}{Xh_1}, \frac{k_2}{Yh_2}\right) = \sum_{n=0}^{X-1} \sum_{m=0}^{Y-1} z_{n,m} e^{-i2\pi(k_1 n/X + k_2 m/Y)},$$

и если ввести обозначение

$$\tilde{z}_{k_1, k_2} = \tilde{z}\left(\frac{k_1}{Xh_1}, \frac{k_2}{Yh_2}\right),$$

то выражение

$$\tilde{z}_{k_1, k_2} = \sum_{n=0}^{X-1} \sum_{m=0}^{Y-1} z_{n,m} e^{-i2\pi(k_1 n/X + k_2 m/Y)} \quad (1)$$

и будет дискретным преобразованием Фурье (ДПФ) цифрового изображения  $\{z_{n,m}\}$ .

Обратное ДПФ определяется по формуле:

$$z_{n,m} = \frac{1}{XY} \sum_{k_1=0}^{X-1} \sum_{k_2=0}^{Y-1} \tilde{z}_{k_1, k_2} e^{i2\pi(k_1 n/X + k_2 m/Y)} \quad (2)$$

Для доказательства формулы (2) достаточно подставить в неё выражение (1) и воспользоваться формулой Эйлера в теории комплексных чисел, а также формулой суммы первых членов геометрической прогрессии.

Для ДПФ справедлива формула Парсеваля – Ляпунова:

$$\sum_{k_1=0}^{X-1} \sum_{k_2=0}^{Y-1} |\tilde{z}_{k_1, k_2}|^2 = \frac{1}{XY} \sum_{n=0}^{X-1} \sum_{m=0}^{Y-1} |z_{n,m}|^2, \quad (3)$$

устанавливающая связь между нормой функции в пространстве  $L_2$  и суммой квадратов модулей её коэффициентов Фурье. Левую часть формулы Парсеваля – Ляпунова называют энергетическим спектром.

## 2. Дискретное двумерное косинусное преобразование Фурье

В стандарте JPEG используется дискретное косинусное преобразование Фурье (дискретное КДФ), формулы, которого можно получить, если, воспользовавшись формулой Эйлера, заменить в формулах (1, 2, 3) комплексную экспоненту на её действительную часть.

Наиболее удобным и широко распространенным является прямое дискретное КДФ в виде

$$\tilde{z}_{k_1, k_2} = \sum_{n=0}^{X-1} \sum_{m=0}^{Y-1} z_{n,m} \cos\left(k_1(n + 0,5)/X\right) \cdot \cos\left(k_2(m + 0,5)/Y\right),$$

где  $n, k_1 = 0, 1, \dots, X - 1$ ;  $m, k_2 = 0, 1, \dots, Y - 1$ .

Обратное дискретное КДФ определяется по формуле:

$$z_{n,m} = \frac{1}{XY} \sum_{k_1=0}^{X-1} \sum_{k_2=0}^{Y-1} \tilde{z}_{k_1, k_2} \cdot \cos\left(k_1(n + 0,5)/X\right) \cos\left(k_2(m + 0,5)/Y\right)$$

В стандарте JPEG используется вариант алгоритма дискретного КДФ, который называют алгоритмом быстрого косинусного преобразования Фурье. Быстрое дискретное КДФ позволяет осуществлять дискретное КДФ с повышенной скоростью.

Кроме косинусного преобразования Фурье в различных научных и прикладных исследованиях применяется также и синусное преобразование Фурье. Формулы для синусного преобразования Фурье можно получить, если, воспользовавшись формулой Эйлера, заменить в формулах (1, 2, 3) комплексную экспоненту на её мнимую часть. Однако в практических приложениях синусное преобразование Фурье встречается гораздо реже, чем дискретное КДФ. Это связано с тем, что производная функции косинус равна 0 в точках  $k_1=0$  и  $k_2=0$ , что очень удобно для продолжения образа и прообраза Фурье по симметрии за точки  $k_1=0$  и  $k_2=0$ .

К сожалению, использование преобразований Фурье в цифровой обработке изображений ограничено, поскольку в силу принципа неопределенности Гейзенберга повышение точности определения значений функции приводит к понижению точности определения значений её преобразования Фурье и наоборот. Более высокая точность, степень сжатия, скорость и качество цифровой обработки изображений достигается за счет применения вместо преобразований Фурье современного аппарата вейвлет-преобразований. В частности, вейвлет-преобразования используются в стандарте JPEG 2000 и программном пакете ICER [2]. Однако стоит отметить, что в силу ряда причин, связанных, в основном, с высокой сложностью применяемых в стандарте JPEG2000 методов цифровой обработки изображений, стандарт JPEG2000 так и не приобрел такого широкого распространения и популярности, как стандарт JPEG [3]. Даже такие известные интер-



нет-браузеры, как Yandex, Google Chrome, Edge и ряд других, не открывают файлы, записанные в формате jp2, т.е. в формате JPEG2000. То же относится и к программному пакету ICER.

### 3. Частотные фильтры

Вернемся к формуле (1), выражающей дискретный двумерный массив – образ Фурье  $\tilde{Z}_{k_1, k_2}$  с размерами:

$$k_1 = 0, 1, \dots, X-1; \quad k_2 = 0, 1, \dots, Y-1 \quad (4)$$

через прообраз Фурье – цифровое изображение  $Z_{n, m}$  с теми же размерами:

$$n = 0, 1, \dots, X-1; \quad m = 0, 1, \dots, Y-1 \quad (5)$$

Двумерный числовой массив  $H_{k_1, k_2}$  называют линейным частотным фильтром (линейной частотной фильтр-функцией), а двумерный числовой массив  $F_{n, m}$  называют результатом линейной частотной фильтрации цифрового изображения  $Z_{n, m}$ , если выполнено соотношение:

$$F_{n, m} = \frac{1}{XY} \sum_{k_1=0}^{X-1} \sum_{k_2=0}^{Y-1} \tilde{Z}_{k_1, k_2} H_{k_1, k_2} \cdot e^{-i2\pi(k_1 n/X + k_2 m/Y)}, \quad (6)$$

В соответствии с формулой (6), результат линейной частотной фильтрации  $F_{n, m}$  представляет собой обратное ДПФ функции  $\tilde{Z}_{k_1, k_2} H_{k_1, k_2}$ , которая получена из образа Фурье  $\tilde{Z}_{k_1, k_2}$  цифрового изображения  $Z_{n, m}$  при помощи умножения на линейную частотную фильтр-функцию  $H_{k_1, k_2}$ .

В случае, когда результатом частотной фильтрации цифрового изображения  $Z_{n, m}$  будет двумерный числовой массив  $F_{n, m}$  с размерами (5), определяемый по формуле

$$F_{n, m} = \frac{1}{XY} \sum_{k_1=0}^{X-1} \sum_{k_2=0}^{Y-1} H(\tilde{Z}_{k_1, k_2}) \cdot e^{-i2\pi(k_1 n/X + k_2 m/Y)}, \quad (7)$$

где фильтр-функция  $H = H(\tilde{Z}_{k_1, k_2})$  не является линейной функцией, фильтр (7) есть пример нелинейного фильтра.

В зависимости от свойств частотной фильтр-функции различают фильтры низких частот, подавляющие высокие частоты и пропускающие низкие частоты; фильтры высо-

ких частот, подавляющие низкие частоты и пропускающие высокие частоты; идеальные фильтры; гауссовские фильтры и т.д. [4].

### 4. Пространственные фильтры

Линейные частотные фильтры, основанные на преобразовании спектра Фурье цифрового изображения, близко связаны с линейными пространственными фильтрами, преобразующими прообраз Фурье, т.е. исходное цифровое изображение. Эта связь устанавливается с помощью преобразования свертки. Приведем определение свертки в дискретном случае.

Пусть  $h_{n, m}$  – двумерный числовой массив с размерами (5). Свертка цифрового изображения  $Z_{n, m}$  с функцией (двумерным массивом)  $h_{n, m}$  обозначается  $Z_{n, m} * h_{n, m}$  и определяется по формуле

$$Z_{n, m} * h_{n, m} = \sum_{k_1=0}^{X-1} \sum_{k_2=0}^{Y-1} Z_{n, m} h_{n-k_1, m-k_2} \quad (8)$$

Важнейшим свойством свертки является формула

$$\tilde{Z}_{k_1, k_2} \tilde{h}_{k_1, k_2} = \sum_{n=0}^{X-1} \sum_{m=0}^{Y-1} (Z_{n, m} * h_{n, m}) \cdot e^{-i2\pi(k_1 n/X + k_2 m/Y)}, \quad (9)$$

смысл которой заключается в том, что ДПФ свертки двух функций равняется произведению ДПФ этих функций.

Справедлива и обратная формула

$$\tilde{Z}_{k_1, k_2} * \tilde{h}_{k_1, k_2} = \sum_{n=0}^{X-1} \sum_{m=0}^{Y-1} (Z_{n, m} h_{n, m}) \cdot e^{-i2\pi(k_1 n/X + k_2 m/Y)}, \quad (10)$$

утверждающая, что ДПФ произведения двух функций равняется свертке преобразований Фурье этих функций.

Заметим, что формулу (8), относящуюся к конечным дискретным массивам, а также вытекающие из неё формулы (9) и (10), называют формулами для круговой (циклической) свертки, в отличие от термина «свертка», относящегося к бесконечным дискретным массивам, а также к непрерывным функциям.

Заметим также, что свертка является коммутативной операцией.

### 5. Фильтрация по окрестностям элементов пространственной области

Частотная и пространственная фильтрации, разобранные в разделах 3 и 4, основывались на применении известных заранее функций к спектру цифрового изображения или к исходному цифровому изображению. По этой причине эти фильтрации носят название элементарных фильтраций [5].

Данный раздел посвящен фильтрации другого типа, а именно, фильтрации в пространственной области, осуществляемой по окрестностям каждого элемента изображения. Для указанного типа пространственной фильтрации используются термины: маска и ядро.

Опишем схему фильтрации по окрестностям, введя маску, например, в виде числовой квадратной матрицы 3-го порядка:

$$C_{3,3} = \begin{pmatrix} c_{-1,-1} & c_{0,-1} & c_{1,-1} \\ c_{-1,0} & c_{0,0} & c_{1,0} \\ c_{-1,1} & c_{0,1} & c_{1,1} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

С этой целью рассмотрим сначала произвольный элемент  $Z_{n_0,m_0}$  исходного изображения, номер которого удовлетворяет неравенствам:

$$0 < n_0 < X - 1; \quad 0 < m_0 < Y - 1, \quad (12)$$

и окрестность этого элемента в пространственной области (на плоскости  $xOy$ ), состоящую из 8 его ближайших соседей элементов изображения. Эта окрестность представляет собой квадратную матрицу 3-го порядка:

$$O_{3,3} = \begin{pmatrix} Z_{n_0-1,m_0-1} & Z_{n_0,m_0-1} & Z_{n_0+1,m_0-1} \\ Z_{n_0-1,m_0} & Z_{n_0,m_0} & Z_{n_0+1,m_0} \\ Z_{n_0-1,m_0+1} & Z_{n_0,m_0+1} & Z_{n_0+1,m_0+1} \end{pmatrix} \quad (13)$$

При осуществлении фильтрации на основе маски  $C_{3,3}$  каждый элемент изображения  $Z_{n_0,m_0}$  преобразуется в элемент  $f_{n_0,m_0}$ , определяемый с помощью окрестности  $O_{3,3}$  по формуле:

$$f_{n_0,m_0} = \sum_{i=-1,0,1} \sum_{j=-1,0,1} c_{i,j} Z_{n_0+i,m_0+j} \quad (14)$$

Элементы  $f_{n_0,m_0}$  и являются результатом фильтрации элементов  $Z_{n_0,m_0}$  изображения с номерами, удовлетворяющими неравенствам (12).

Если же элемент изображения  $Z_{n_0,m_0}$  расположен на горизонтальных или вертикальных границах изображения, т.е. в случае, когда  $n_0 = 0, X - 1$ , а также в случае, когда  $m_0 = 0, Y - 1$ , то окрестность  $O_{3,3}$  выходит за границы изображения, и для применения маски (11) изображение нужно расширить нулями.

Заметим, что фильтрация изображения, осуществляемая по формулам (11) – (14), является линейной фильтрацией и часто используется для сглаживания изображений. В случае, когда в формуле (11) все элементы  $c_{i,j}$  равны  $\frac{1}{9}$ , результат линейной фильтрации  $f_{n_0,m_0}$ , полученный по формуле (14), является средним арифметическим элементов матрицы  $O_{3,3}$ .

Если бы мы вообще не вводили маску (11), а вместо вычисления значения  $f_{n_0,m_0}$  по формуле (14) в качестве значения  $f_{n_0,m_0}$  вычисляли, например, максимум, минимум или медиану значений элементов изображения по различным квадратным или прямоугольным окрестностям элемента изображения  $Z_{n_0,m_0}$ , то мы бы получили нелинейные фильтры, применяемые для шумоподавления. Также для шумоподавления применяют нелинейные фильтры, в которых в качестве значения  $f_{n_0,m_0}$  вычисляются среднее геометрическое, среднее гармоническое и другие средние значения, отличные от среднего арифметического, причем не только по окрестности  $O_{3,3}$ , но и по квадратным или прямоугольным окрестностям других размеров.

### 6. Подавление шума при помощи линейной модуляции по окрестностям

Рассмотрим математическую модель фоторегистрации, основанную на предположении о том, что цифровое изображение  $Z_{n,m}$  представляет собой сумму

$$Z_{n,m} = u_{n,m} + v_{n,m},$$

в которой значения  $u_{n,m}$  являются точными, а  $v_{n,m}$  – независимые случайные величины (помеха, шум).

Двумерные массивы  $u_{n,m}$  и  $Z_{n,m}$  часто называют неискаженным и искаженным изображениями соответственно.

Также, как и в разделе 3 настоящей статьи, символом  $\tilde{Z}_{k_1,k_2}$  будем обозначать двумерный числовой массив с размерами (4), являющийся образом Фурье цифрового изображения  $Z_{n,m}$  с размерами (5). Символами  $H_{k_1,k_2}$  и  $F_{n,m}$  будем обозначать соответственно линейный частотный фильтр и результат частотной фильтрации изображения  $Z_{n,m}$  в пространственной области, осуществляемой по формуле (6).

Кроме того, обозначим символами  $\tilde{U}_{k_1,k_2}$  и  $\tilde{V}_{k_1,k_2}$  образы Фурье неискаженного изображения и шума соответственно и будем считать, что мы, эмпирически наблюдая спектр  $\tilde{Z}_{k_1,k_2}$  искаженного изображения, с приемлемой точностью можем определить спектр  $\tilde{V}_{k_1,k_2}$  шума.

Из формулы (6) вытекает, что изображение шума в пространственной области приближенно можно вычислить по формуле

$$v_{n,m} = \frac{1}{XY} \sum_{k_1=0}^{X-1} \sum_{k_2=0}^{Y-1} \tilde{V}_{k_1,k_2} H_{k_1,k_2} \cdot e^{-i2\pi(k_1 n/X + k_2 m/Y)}, \quad (15)$$

Рассмотрим произвольный элемент  $u_{n_0,m_0}$  неискаженного изображения, номер которого удовлетворяет неравенствам (12), и его окрестность в пространственной области, заданную, например, квадратной матрицей 3-го порядка:

$$O = \begin{pmatrix} u_{n_0-1,m_0-1} & u_{n_0,m_0-1} & u_{n_0+1,m_0-1} \\ u_{n_0-1,m_0} & u_{n_0,m_0} & u_{n_0+1,m_0} \\ u_{n_0-1,m_0+1} & u_{n_0,m_0+1} & u_{n_0+1,m_0+1} \end{pmatrix} \quad (16)$$

Введем для окрестности (16) константу  $M$ , определяющую линейную модуляцию шума в пространственной области по формуле

$$\hat{u}_{n,m} = u_{n,m} - M v_{n,m}, \quad (17)$$

где символом  $\hat{u}_{n,m}$  обозначено приближенное значение  $u_{n,m}$ . Найдем значение константы  $M$ , которое дает минимум дисперсии  $\sigma_{n_0,m_0}^2$  величины  $\hat{u}_{n,m}$  по окрестности

(16). Дисперсия  $\sigma_{n_0,m_0}^2$  вычисляется по формуле

$$\sigma_{n_0,m_0}^2 = \sum_{i=-1,0,1} \sum_{j=-1,0,1} (\hat{u}_{n_0+i,m_0+j} - \bar{u}_{n_0,m_0})^2, \quad (18)$$

где символом  $\bar{u}_{n_0,m_0}$  обозначено среднее значение величины  $\hat{u}_{n,m}$ , вычисляемое по формуле

$$\bar{u}_{n_0,m_0} = \frac{1}{9} \sum_{i=-1,0,1} \sum_{j=-1,0,1} \hat{u}_{n_0+i,m_0+j} \quad (19)$$

Подставляя выражение (19) в (18), получаем

$$\sigma_{n_0,m_0}^2 = \sum_{i=-1,0,1} \sum_{j=-1,0,1} \left( \hat{u}_{n_0+i,m_0+j} - \frac{1}{9} \sum_{i=-1,0,1} \sum_{j=-1,0,1} \hat{u}_{n_0+i,m_0+j} \right)^2 \quad (20)$$

Для того чтобы константа модуляции  $M$  доставляла минимум величине  $\sigma_{n_0,m_0}^2$ , необходимо, чтобы производная от дисперсии по  $M$  равнялась нулю:

$$\frac{d(\sigma_{n_0,m_0}^2)}{dM} = 0, \quad (21)$$

причем из структуры формулы (20) вытекает, что условие (21) также является и достаточным. Вычисляя производную (21), получаем

$$\sum_{i=-1,0,1} \sum_{j=-1,0,1} \left( \hat{u}_{n_0+i,m_0+j} - \frac{1}{9} \sum_{i=-1,0,1} \sum_{j=-1,0,1} \hat{u}_{n_0+i,m_0+j} \right) \cdot \left( -v_{n_0+i,m_0+j} + \frac{1}{9} \sum_{i=-1,0,1} \sum_{j=-1,0,1} v_{n_0+i,m_0+j} \right) = 0,$$

откуда находим значение константы модуляции шума:

$$M = \frac{\overline{u_{n_0, m_0} v_{n_0, m_0}} - \overline{u_{n_0, m_0}} \cdot \overline{v_{n_0, m_0}}}{\overline{v_{n_0, m_0}^2} - \overline{v_{n_0, m_0}}^2},$$

где чертой сверху обозначено среднее значение величины, вычисляемое по формуле (19).

В заключение отметим, что применение для шумоподавления окрестности  $O$ , задан-

ной по формуле (16), не является принципиальным, и описанный алгоритм оптимальной линейной модуляции практически без изменений переносится на любые другие квадратные или прямоугольные окрестности пространственной области.

### Список литературы

1. Привалов И.И. Ряды Фурье. – М.: Едиториал УРСС, 2018. – 168 с.
2. Фаствидео [Электронный ресурс] / URL: <https://www.fastvideo.ru/> (дата обращения: 12.02.2019 г.).
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
4. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 608 с.
5. Емельянов С.Г., Мирошниченко С.Ю., Панищев В.С., Титов В.С., Труфанов М.И. Обработка цифровых аэрокосмических изображений для геоинформационных систем. – Белгородская область: ТНТ, 2012. – 176 с.

### References

1. Privalov I.I. Rjady Fur'je. – М.: Editorial URSS, 2018. – 168 s.
2. Fastvideo [Elektronnyj resurs] / URL: <https://www.fastvideo.ru/> (data obrashhenija: 12.02.2019 g.);
3. Gonsales R., Vuds R. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij. – М.: Tehnosfera, 2012. – 1104 s.
4. Krasil'nikov N.N. Cifrovaja obrabotka 2D- i 3D-izobrazhenij. – SPb.: BHV-Peterburg, 2011. – 608 s.
5. Emel'janov S.G., Miroshnichenko S.Ju., Panishhev V.S., Titov V.S., Trufanov M.I. Obrabotka cifrovyyh aerokosmicheskikh izobrazhenij dlja geoinformacionnyh system. – Belgorodskaja oblast'.: TNT, 2012. – 176 s.



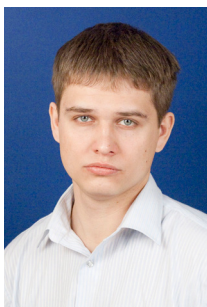
**Ахупова Д.А.**  
**Akhupova D.A.**

аспирант кафедры  
«Телекоммуникационные системы»,  
Уфимский государственный авиационный  
технический университет,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Султанов А.Х.**  
**Sultanov A.Kh.**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой  
«Телекоммуникационные системы»,  
Уфимский государственный авиационный  
технический университет,  
г. Уфа, Российская Федерация



**Мешков И.К.**  
**Meshkov I.K.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Телекоммуникационные системы»,  
Уфимский государственный авиационный  
технический университет,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Грахова Е.П.**  
**Grakhova E.P.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Телекоммуникационные системы»,  
Уфимский государственный авиационный  
технический университет,  
г. Уфа,  
Российская Федерация

УДК 004.378

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-2-84-91

## **ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ОРТОГОНАЛЬНОГО ЧАСТОТНОГО МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ**

В настоящее время во всем мире идут активные работы по внедрению и расширению областей применения систем беспроводной передачи данных, радиосвязи, радиовещания и телевидения, использующих технологию ортогонального частотного мультиплексирования (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). Использование данной технологии позволяет эффективно использовать отведенную полосу частот и бороться с помехами, возникающими при передаче полезной информации по радиоканалу при сохранении высоких



скоростей передачи. В качестве областей применения данной технологии можно выделить: в беспроводных каналах связи технология OFDM используется в следующих стандартах цифрового наземного телерадиовещания: DVB-T, DVB-T2, DVB-H, DVB-SH, DVB-T2lite, T-DMB, ISDB-T, MediaFLO, Eureka-147,

DAB, DAB+, DRM, DRM+, отечественной системе РАВИС; в проводных каналах связи используется в стандарте кабельного цифрового телевизионного вещания DVB-C2 и передачи данных ADSL и VDSL, а также для передачи данных по линиям электропередач на основе стандарта PLC. Активно OFDM используется в стандартах передачи данных IEEE 802.11a/g/n/ac, IEEE 802.16d/e, IEEE 802.16m, LTE и LTE-A и будущих сетей поколения 5G. Еще одним из перспективных и интересных применений OFDM является ее использование в сверхширокополосных сетях передачи данных на основе стандарта IEEE 802.15.3a (Ultra-Wideband Technology, UWB) и последующих разработок. Активно OFDM начинает внедряться в спутниковых и радиорелейных системах связи.

В работе предлагается найти оптимальную ширину полосы канала для сверхширокополосных систем связи, чтобы максимально эффективно использовать отведенную полосу частот для заполнения спектральной маски ГКРЧ. Предложен план распределения СШП-OFDM. Проведено имитационное моделирование СШП-OFDM в диапазоне рабочих частот ГКРЧ с разной шириной полосы. Представлены результаты расчёта максимальной скорости передачи, длительности символов, ширины полосы поднесущей для СШП-OFDM. Практическая новизна работы состоит в том, что предложен способ заполнения СШП-OFDM в диапазоне рабочих частот ГКРЧ.

**Ключевые слова:** СШП, OFDM, ГКРЧ, QPSK, спектральная маска, эффективная изотропная излучаемая мощность, многоканальная система связи, спектральная эффективность, широкополосный доступ, электромагнитная совместимость.

## **IMPROVING THE EFFICIENCY OF FUNCTIONING OF ULTRA-WIDE-BAND COMMUNICATION SYSTEMS BASED ON TECHNOLOGY OF ORTHOGONAL FREQUENCY MULTIPLEXING**

Currently, worldwide, active work is underway to introduce and expand the areas of application of wireless data transmission systems, radio communications, radio broadcasting and television using Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technology. The use of this technology allows you to effectively use the allotted frequency band and to deal with interference arising from the transmission of useful information over the air while maintaining high transmission rates. As applications of this technology can be identified: in wireless communication channels OFDM technology is used in the following standards of digital terrestrial broadcasting: DVB-T, DVB-T2, DVB-H, DVB-SH, DVB-T2lite, T-DMB, ISDB-T, MediaFLO, Eureka-147, DAB, DAB+, DRM, DRM+, domestic system RAVIS; in wired communication channels it is used in the DVB-C2 cable digital television broadcasting standard and ADSL and VDSL data transmission standards, as well as for transmission of data via power lines based on the PLC standard. OFDM is actively used in IEEE 802.11a / g / n / ac data transmission standards, IEEE 802.16d / e, IEEE 802.16m, LTE and LTE-A and future 5G generation networks. Another promising and interesting OFDM application is its use in ultra-wideband data networks based on the IEEE 802.15.3a standard (Ultra-Wideband Technology, UWB) and subsequent developments. OFDM actively begins to be implemented in satellite and radio relay communication systems.

The paper proposes to find the optimal bandwidth in order to make the most appropriate use of the presented frequency band for filling the spectral mask of the GRFC. A distribution plan for UWB-OFDM is proposed. The resulting simulation modeling of UWB-OFDM in the frequency range of the GRFC with different bandwidths was carried out. The results of the calculation of the maximum transmission rate, the duration of the characters, the width of the subcarrier band for

UWB-OFDM are presented. The practical novelty of the work lies in the fact that a method has been proposed for filling UWB-OFDM in the frequency range of the GKRCН.

**Key words:** UWB, OFDM, SCR, QPSK, spectral mask, effective isotropic radiated power, multi-channel communication system, spectral efficiency, broadband access, electromagnetic compatibility.

Перепополнение радиочастотного спектра в настоящее время является глобальной проблемой всего информационного мира. В данном контексте расширение «нелицензируемой» части спектра, использование которой не требует получения лицензии, видится выходом из грядущего «кризиса пропускной способности» каналов связи. К системам связи, работающим на безлицензионной основе, относятся сверхширокополосные (СШП) системы связи, предусматривающие использование частот в диапазоне 2,85 – 10,6 ГГц. В конце 2009 года Российская Федерация присоединилась к странам, регулирующим работу СШП систем связи: был принят документ, определяющий предельно допустимые значения излучаемой мощности СШП передающих устройств [1].

Методы формирования СШП сигнала, удовлетворяющего установленным ограничениям, можно разделить на две группы: методы с использованием и без использования несущей частоты [2]. К первой группе относится МВ-OFDM (Multiband orthogonal frequency-division multiplexing) – технология формирования СШП сигнала с мультиплексированием по многим ортогональным поднесущим; ко второй – метод формирования

СШП сигнала на основе применения ультракоротких импульсов сложной формы.

Технология МВ-OFDM представляется более перспективной, в сравнении с ультракороткими радиоимпульсами, так как не требует использования высокоскоростных генераторов высокой точности. К тому же, благодаря использованию множества поднесущих частот, МВ-OFDM позволяет создать многоканальную систему связи и тем самым повысить спектральную эффективность, существенно увеличив процент использования выделенного спектра.

Так, стандарт [3], разработанный для СШП систем связи, работающих в условиях ограничения Федеральной комиссии по связи (FCC, Federal Communications Commission), предусматривает разделение разрешенного диапазона 3,1 – 10,6 ГГц на 14 каналов шириной 528 МГц (рис. 1). Каждый канал в свою очередь делится на 128 поднесущих с шагом 4,125 МГц. Из них используются 122 поднесущие: 100 поднесущих – для модуляции данных, 12 поднесущих – пилотные, применяются для синхронизации, 10 поднесущих – защитные.

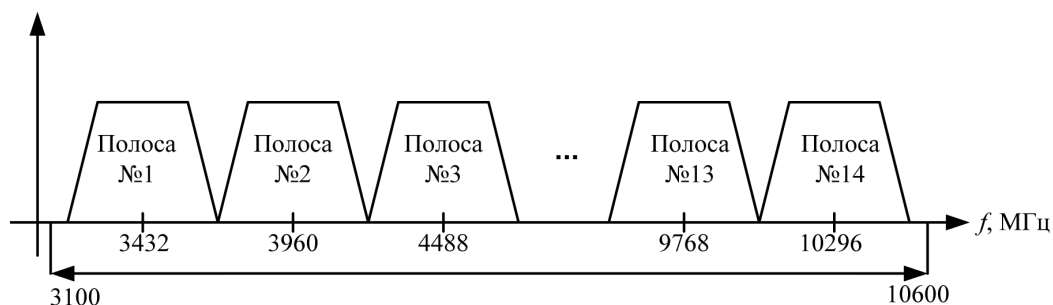


Рисунок 1. Структура МВ-OFDM сигнала

Каждая поднесущая модулируется посредством четырехпозиционной фазовой модуляции (QPSK, Quadrature Phase Shift Keying). Для защиты от помех используется кодирование с прямым исправлением ошибок (свер-

точное кодирование) со скоростью 11/32, 1/2, 5/8 и 3/4.

Математическая модель СШП сигнала на основе технологии OFDM (СШП-OFDM)

может быть описана как сумма сигналов основной полосы частот:

$$r_{RF}(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} r_k(t - kT_{SYM}) \exp(j2\pi f_k t) \right\} \quad (1)$$

где  $\text{Re}(\cdot)$  – действительная часть комплексной переменной,  $r_k(t - kT_{SYM})$  – сигнал основной полосы частот  $k$ -го символа OFDM, который не равен нулю в интервале от 0 до  $T_{SYM}$ ,  $N$  – количество символов OFDM,  $T_{SYM}$  – символный интервал,  $f_k$  – центральная частота для  $k$ -й полосы. Точная структура  $k$ -го символа OFDM зависит от его местоположения в пакете:

$$r_k(t) = \begin{cases} r_{\text{преамбула},k}(t), & 0 \leq k < N_{\text{преамбула}} \\ r_{\text{заголовок},k-N_{\text{преамбула}}}(t), & N_{\text{преамбула}} \leq k < N_{\text{заголовок}} \\ r_{\text{данные},k-N_{\text{преамбула}}}(t), & N_{\text{заголовок}} \leq k < N_{\text{данные}} \end{cases} \quad (2)$$

где  $N_{\text{преамбула}}$  – количество символов в преамбуле,  $N_{\text{заголовок}}$  – количество символов в заголовке,  $N_{\text{данные}}$  – количество символов данных.

Все символы  $r_k(t)$  могут быть описаны с использованием обратного преобразования Фурье с определенным набором коэффициентов  $C_n$ , где коэффициенты определяются как данные, пилот-сигналы или защитные символы:

$$r_k(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0, T_{CP}] \\ \sum_{-N_{ST}/2}^{N_{ST}/2} C_n \exp(j2\pi n \Delta_f) \cdot (t - T_{CP}), & t \in [T_{CP}, T_{CP} + T_{FFT}] \\ 0, & t \in [T_{CP} + T_{FFT}, T_{CP} + T_{FFT} + T_{GI}] \end{cases} \quad (3)$$

где  $\Delta_f$  – заданная частота поднесущей,  $N_{ST}$  – общее количество используемых поднесущих,  $T_{CP}$  – длительность циклического префикса,  $T_{GI}$  – это длительность защитного интервала,  $T_{FFT}$  – период IFFT / FFT (Inverse Fast Fourier transform (Обратное преобразование Фурье)/Fast Fourier transform (Быстрое преобразование Фурье)) [2].

Важным фактором при формировании СШП-сигналов является низкий уровень разрешенных значений эффективной изотропной излучаемой мощности (ЭИИМ), который позволяет СШП системам связи работать практически на уровне шума, не создавая помех другим радиослужбам, осуществляя принцип вторичного использования спектра.

На рисунке 2 показана спектральная маска, описывающая распределение ЭИИМ по рабочему диапазону частот для СШП устройств, работающих внутри помещений на территории РФ, определенная Государственной комиссией по радиочастотам (ГКРЧ) [1].

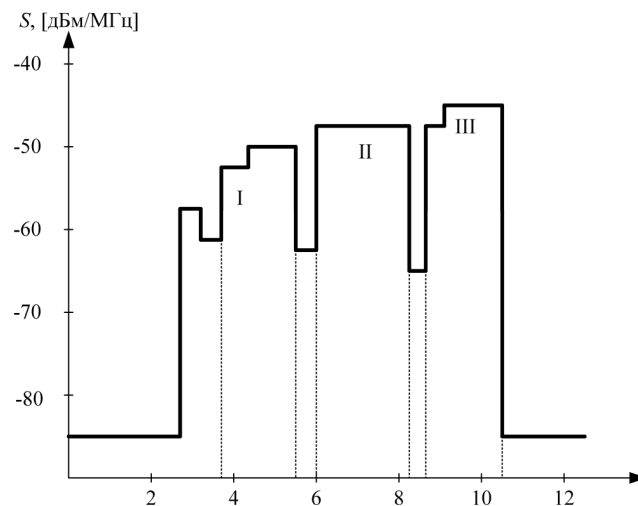


Рисунок 2. Маска максимальной спектральной плотности мощности, утвержденная ГКРЧ РФ

Особенностью ГКРЧ маски является наличие сильных провалов спектральной плотности мощности (СПМ) на некоторых частотах, образующих три «окна», где ЭИИМ максимальна: 3,95–4,425 ГГц – I «окно», 6–8,1 ГГц – II «окно» и 8,625–10,6 ГГц – III «окно». Различаются также и диапазоны частот, выделенные для СШП систем связи: для ГКРЧ он соответствует 2,85–10,6 ГГц, а для маски FCC составляет 3,1 – 10,6 ГГц.

Наличие спектральных «окон» в маске ГКРЧ существенно усложняет задачу формирования СШП сигнала, удовлетворяющего ее ограничениям. Так, в работах [4, 5] были представлены радиоимпульсы сложной спек-

тральной формы, отличающиеся невысокой степенью заполнения спектрального пространства под маской. Использование технологии МВ-OFDM должно существенно повысить данный показатель.

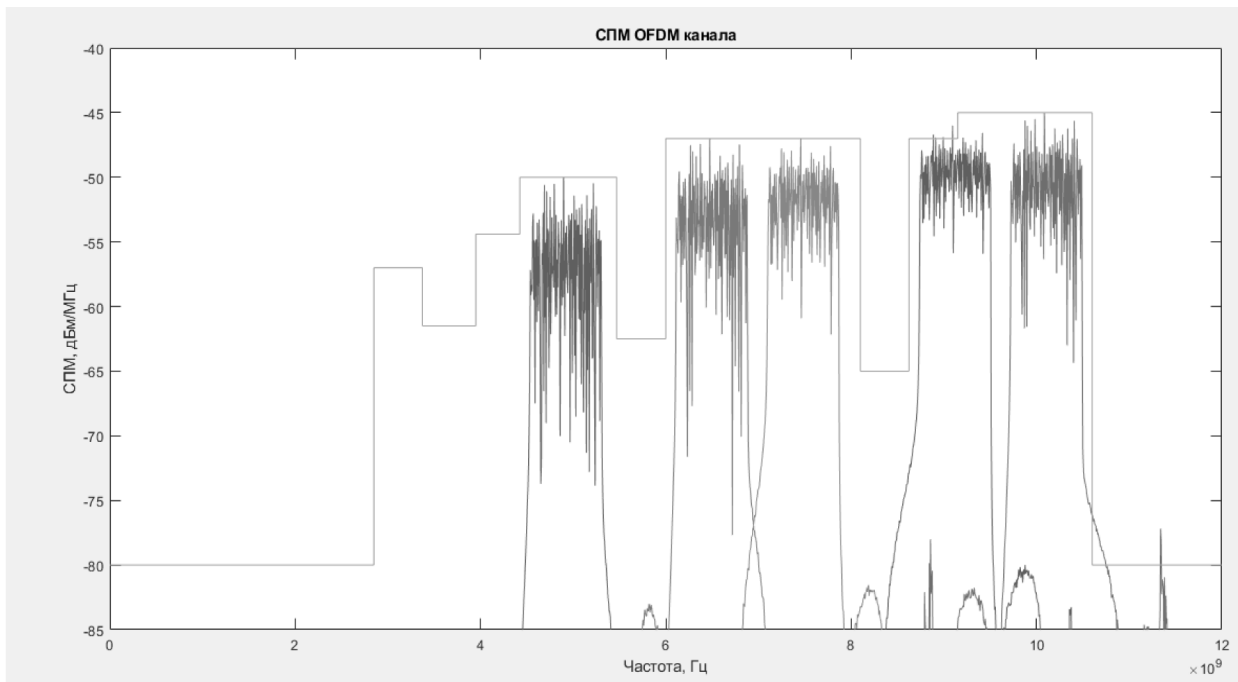
В данном случае необходимо определить оптимальную полосу канала СШП-OFDM системы связи, позволяющую максимизировать скорость передачи информации, а также процент использования выделенного диапазона частот. В ходе поиска были разработаны три варианта заполнения спектральной маски КРЧ, характеристики которых представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Предлагаемый частотный план распределения СШП-OFDM, для заполнения спектральной маски ГКРЧ

№	Полоса частот, МГц	Ширина канала, МГц	№ канала	$F_n$ , МГц	$F_{ц}$ , МГц	$F_b$ , МГц
1	3950-5470	986	1	4425	4918	5411
			2	6000	6493	6986
	6000-8100	986	3	6986	7499	7972
			4	8625	9118	9611
			5	9611	10104	10597
8625-10600	986					
2	3950-5470	658	1	3950	4279	4608
			2	4608	4937	5266
	6000-8100	658	3	6000	6329	6658
			4	6658	6987	7316
			5	7316	7645	7974
	8625-10600	658	6	8625	8954	9283
			7	9283	9612	9941
			8	9941	10270	10599
3	2850-3375	520	1	2850	3110	3370
	3375-3950	520	2	3370	3630	3890
	3950-5470	520	3	4425	4685	4945
			4	4945	5205	5465
	6000-8100	520	5	6000	6260	6520
			6	6520	6780	7040
			7	7040	7300	7560
			8	7560	7820	8080
	8625-10600	520	9	8625	8885	9145
			10	9150	9410	9670
			11	9670	9930	10 190

При использовании полосы частот шириной 986 МГц можно расположить три полосы частот в трех «окнах», где ЭИИМ макси-

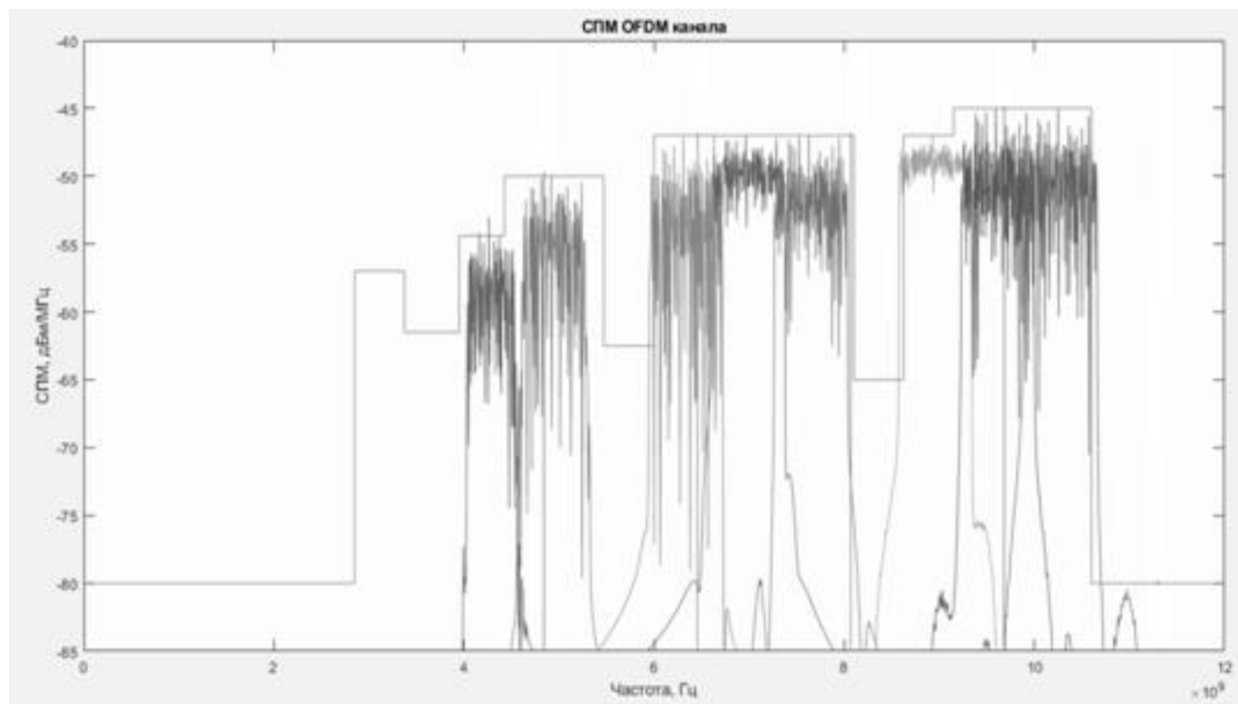
мальна. В данном случае неиспользованными остаются 190 МГц (рис. 3).



**Рисунок 3.** Результаты имитационного моделирования СШП-OFDM в диапазоне рабочих частот ГКРЧ с шириной полосы 986 МГц

При использовании полосы частот шириной 658 МГц можно расположить восемь

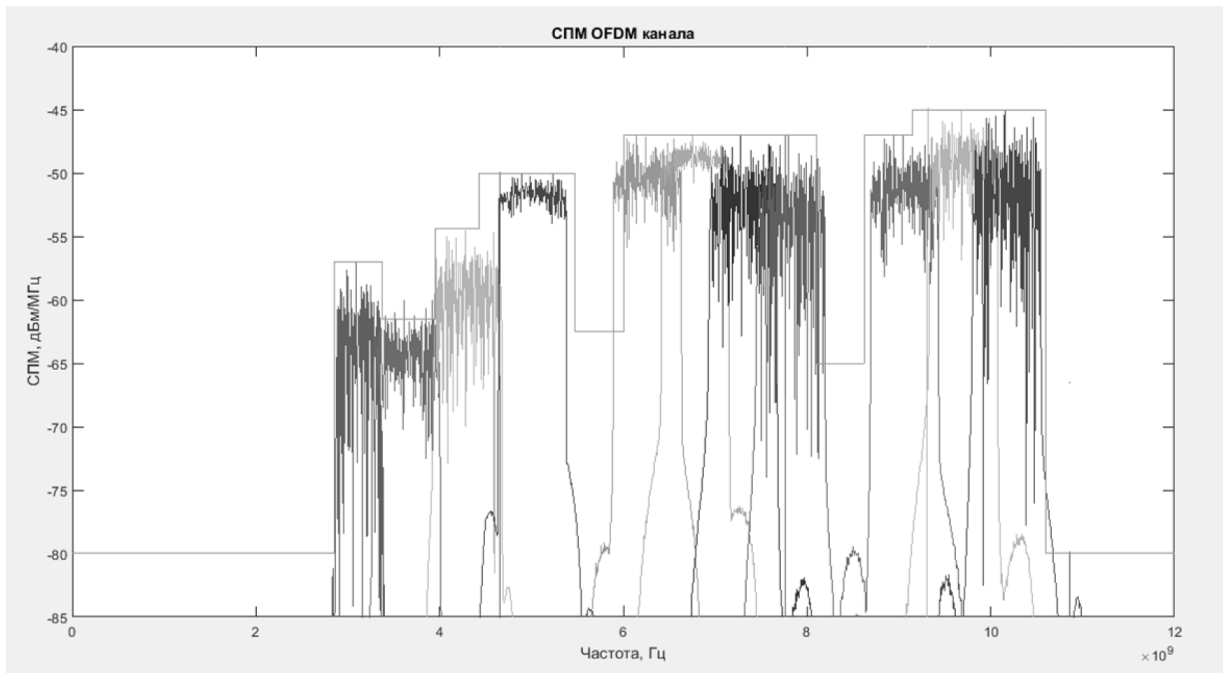
полос частот. В данном случае неиспользованными остаются 331 МГц (рис. 4).



**Рисунок 4.** Результаты имитационного моделирования СШП-OFDM в диапазоне рабочих частот ГКРЧ с шириной полосы 658 МГц



При использовании полосы частот шириной 520 МГц можно расположить десять полос частот. В данном случае неиспользованными остаются 975 МГц (рис. 5).



**Рисунок 5.** Результаты имитационного моделирования СШП-OFDM в диапазоне рабочих частот ГКРЧ с шириной полосы 520 МГц

Передаваемый сигнал должен быть организован в виде последовательности кадров. Кадр имеет длительность  $T_F$ , OFDM-символ имеет длительность  $T_{SYM}$  и состоит из защитного интервала длительностью  $T_{GI}$ , длительности результирующего сигнала  $T_{FFT}$ ,  $T_{CP}$ :

$$T_{SYM} = T_{FFT} + T_{GI} + T_{CP} \quad (4)$$

$$T_{CP} = \frac{32}{DF}, \quad (5)$$

$$T_{GI} = \frac{5}{DF},$$

где  $DF$  – предлагаемая ширина полосы.

OFDM-символы содержат полезную информацию (о данных) и опорную информацию (пилотные и нулевые поднесущие). При предлагаемом распределении количество несущих частот будет равно:

$$N_{ST} = N_{SD} + N_{SDP} + N_{SG}, \quad (6)$$

где  $N_{SD}$  – 100 частот для модуляции данных,  $N_{SDP}$  – 12 поднесущих пилотных, для синхронизации,  $N_{SG}$  – 10 частот защитные или нулевые поднесущие.

При этом максимальная скорость передачи в канале будет равна:

$$R_b = \frac{DF}{1+a} mCR \frac{T_{FFT}}{T_{FFT} + T_{GI}} \quad (7)$$

где  $R_b$  – максимальная скорость передачи,  $m$  – число битов информации, передаваемых на одной несущей,  $CR$  – скорость сверточного кода,  $a$  – коэффициент скругления спектра.

Рассчитанные параметры передачи сигнала для предлагаемых полос канала отображены в таблице 2.

**Таблица 2.** Параметры передачи сигнала для выбранных полос канала

$DF$ , МГц	$N_{ST}$	$T_{GI}$ , нс	$T_{FFT}$ , нс	$T_{CP}$ , нс	$T_{SYM}$ , нс	$Df_p$ , МГц	$CR$	$R_b$ , Мбит/с
520	122	9,615	246,15	61,538	317,323	4,0625	11/32	378,466
658	122	7,599	194,529	48,632	250,76	5,141	11/32	478,904
986	122	5,071	129,817	32,454	167,342	7,703	11/32	717,629

Таким образом, в данной работе было предложено несколько методов распределения СШП-OFDM в диапазоне рабочих частот, где ЭИИМ максимальна. Было проведено

имитационное моделирование, получен план распределения полос частот и параметры OFDM сигнала для используемого режима вещания.

### Список литературы

1. Приложение к решению ГКРЧ № 09-05-02 от 15 декабря 2009 г. Выписка из решения Государственной комиссии по радиочастотам от 24 мая 2013 г. № 13-18-03 – М., 2013. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70302998/> (дата обращения: 19.09.2017).
2. Зубарев Ю.Б., Сагдуллаев Ю.С., Сагдуллаев Т.Ю. Видеоинформационные технологии систем связи // *Спутник+*, 2011. – 295 с.
3. IEEE P802.15.3a Wireless Personal Area Networks – Multi-band OFDM Physical Layer Proposal for IEEE 802.15 Task Group 3a — Anuj Batra et al., Texas Instruments, USA: IEEE, 2003.
4. Grakhova, E.P., Sultanov, A.K., Vinogradova, I.L. et al. Experimental demonstration of high-speed data transmission based on Gaussian pulses for IR-UWB radio-over-fiber systems // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, Volume 10342, 2017, 1034209.
5. Grakhova E.P., Rommel S., Jurado-Navas A., Sultanov A.K., Olmos J.J.V., Monroy I.T. Pulse shaping for high capacity impulse radio ultra-wideband wireless links under the Russian spectral emission mask // *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, 2016. - № 7794774.

### References

1. Prilozhenije k resheniju GKRC h №09-05-02 ot 15 dekabrja 2009 g. Vypiska iz reshenija Gosudarstvennoj komissii po radiochastotam ot 24 maja 2013 g. № 13-18-03/ – Moskva: 2013. [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70302998/> (data obrashhenija: 19.09.2017).
2. Zubarev Ju.B., Sagdullaev Ju.S., Sagdullaev T.Ju. Videoinformacionnyje tehnologii sistem svjazi. – Sputnik+, 2011. – 295 s.
3. IEEE P802.15.3a Wireless Personal Area Networks – Multi-band OFDM Physical Layer Proposal for IEEE 802.15 Task Group 3a — Anuj Batra et al., Texas Instruments, USA: IEEE, 2003.
4. Grakhova E.P., Sultanov A.K., Vinogradova I.L. et al. Experimental demonstration of high-speed data transmission based on Gaussian pulses for IR-UWB radio-over-fiber systems // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Volume 10342, 2017, 1034209.
5. Grakhova E.P., Rommel S., Jurado-Navas A., Sultanov A.K., Olmos J.J.V., Monroy I.T. Pulse shaping for high capacity impulse radio ultra-wideband wireless links under the Russian spectral emission mask // *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, 2016. - № 7794774.



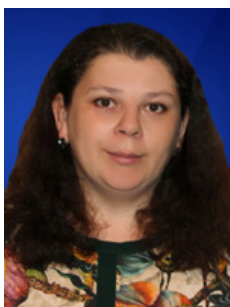
**Мурлин А.Г.**  
**Murlin A.G.**

*кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Информационные системы и  
программирование»,  
Кубанский государственный  
технологический университет,  
г. Краснодар, Российская Федерация*



**Мурлина В.А.**  
**Murlina V.A.**

*кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Информационные системы и  
программирование»,  
Кубанский государственный  
технологический университет,  
г. Краснодар, Российская Федерация*



**Янаева М.В.**  
**Yanaeva M.V.**

*кандидат технических наук,  
заведующий кафедрой  
«Информационные системы и  
программирование»,  
Кубанский государственный  
технологический университет,  
г. Краснодар, Российская Федерация*



**Кривоногов С.В.**  
**Krivonogova S.V.**

*старший преподаватель кафедры  
«Информационные системы и технологии»,  
Нижегородский государственный  
инженерно-экономический университет,  
г. Княгинино,  
Российская Федерация*

УДК 004.75

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-2-92-104

## **МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ СБОРА И ВЫВОЗА ТВЁРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ**

В статье рассматривается алгоритм построения оптимальных маршрутов сбора и вывоза твердых бытовых отходов для парка машин с учетом динамического изменения маршрутов и перераспределения точек обхода. Рассмотрены шаги выполнения процесса клининговых работ с подробным описанием каждого из них. Определены недостатки существующего алгоритма, а также сложности, возникающие при его работе. Рассмотрены существующие программные решения, и определено, что все они являются универсальными, для рассматриваемой предметной области существующие решения отсутствуют. Изучены возможные факторы перевозок мусора, и выявлены методы оптимизации перевозок, данные методы

возможно применять ко всем компаниям, занимающимся аналогичной деятельностью. Выявлены возможные проблемы, возникающие при перевозках, предложены меры по устранению и совершенствованию работы перевозок. Построен граф маршрутов, поделённый на зоны. Определены методы снижения затрат на перевозки. Выявлен общий коэффициент отклонения и определена погрешность результатов. Показана архитектура информационной системы с учётом построения её на основе разработанных алгоритмов оптимизации. Предложены необходимые для работы системы серверные компоненты. Разработаны способы динамического перераспределения точек между автомобилями автопарка. Описаны процессы, протекающие в системе, структура базы данных и запросы, поступающие к серверу. Определены принципы взаимодействия клиентов с сервером через API. Создан процесс обработки запроса на создание маршрута. Описан процесс обработки запросов. Определен цикл запросов к API со стороны клиентов. Для компаний, занимающихся организацией вывоза твердых бытовых отходов, целесообразно внедрять информационную систему поддержки построения оптимальных маршрутов для некоторой совокупности транспортных средств и с учётом динамически изменяющейся обстановки. Использование разработанных алгоритмов построения оптимальных маршрутов для транспортных средств клининговой компании позволит получить дополнительную прибыль за счёт рационального использования транспортных средств и экономии расходных материалов.

**Ключевые слова:** алгоритм, база данных, информационная система, клининговая компания, мобильное приложение, приложение, оптимизация, предприятие, проектирование, пользователь, синхронизация, технологии, эффективность, транспортная логистика.

## MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF LOGISTIC ROUTES OF COLLECTING AND EXPORT OF MUNICIPAL SOLID WASTE

The article discusses the algorithm for constructing optimal routes for collecting and transporting solid household waste for a fleet of vehicles, taking into account the dynamic change of routes and the redistribution of bypass points. The steps of the process of cleaning work with a detailed description of each of them. The shortcomings of the existing algorithm, as well as difficulties arising from its operation, are identified. Existing software solutions are considered and it is determined that they are all universal, for the subject domain under consideration there are no existing solutions. Possible factors of garbage transportation have been studied and methods of transport optimization have been identified, these methods can be applied to all companies engaged in similar activities. Possible problems arising during transportation have been identified, and measures have been proposed for the elimination and improvement of transport operations. Built route graph divided into zones. Methods to reduce transportation costs are defined. The general coefficient of deviation is revealed and the error of results is determined. The architecture of the information system is shown taking into account its construction on the basis of the developed optimization algorithms. Required server components for system operation. Methods have been developed for the dynamic redistribution of points between vehicles in a fleet. Describes the processes occurring in the system, the database structure and requests coming to the server. The principles of client interaction with the server through the API. Created the process of processing the request to create a route. Describes the processing of requests. Defined a cycle of requests to the API by the customers. For companies engaged in organizing the removal of solid household waste, it is advisable to implement an information system to support the construction of optimal routes for a certain set of vehicles and taking into account the dynamically changing environment. The use of the developed algorithms for constructing the best routes for vehicles of a cleaning company will provide additional income through rational use of vehicles and saving consumables.

**Key words:** algorithm, database, information system, cleaning company, mobile application, application, optimization, enterprise, design, user, synchronization, technologies, efficiency, transport logistics.

### Введение

На сегодняшний день множество предприятий, занимающихся логистикой, требуют оптимизации маршрутов для уменьшения издержек и увеличения прибыли. Но на данный момент существуют автоматизированные системы, основной целью которых является оптимизация торговой логистики, на что и рассчитаны используемые в этих системах алгоритмы. Для некоторых компаний, таких как клининговые, необходим немного другой подход – оптимизация общего времени и расстояния обхода всех точек в городе. Оптимизация по нескольким критериям (необходимое количество автомашин или минимальное время обхода всех точек) является наиболее выгодной схемой работы такой информационной системы. Сбор и транспортировка твердых бытовых отходов (ТБО) по разным причинам, в основном – экономическим и социальным, рассматриваются как один из наиболее важных элементов системы управления твердыми отходами. Более 60 % затрат на системы управления твердыми отходами в разных странах обусловлено сбором и транспортным

процессом, включая трудовые затраты, высокую цену на топливо, оборудование и обслуживание оборудования. Поэтому как никогда актуальна задача оптимизации маршрутов сбора и вывоза ТБО. Недостаточно оптимизировать маршрут для одного транспортного средства, необходима оптимизация работы всего парка клининговой компании, при этом достаточно важен вопрос учета статистических данных, используемых при оптимизации. Существует множество готовых программных решений для составления оптимальных маршрутов обхода нескольких точек. Однако основной областью, для которой ведутся эти разработки, является логистика. Есть принципиальное отличие логистического маршрута от маршрутов клининговых машин – это область оптимизирования. В логистике оптимизируется время обхода точек машиной для полной её разгрузки. Для парка клининговой компании же требуется одновременный обход всех точек за минимальное время [18; С. 70].

Планируемый процесс с использованием специализированной информационной системы строится в несколько шагов (рис. 1).

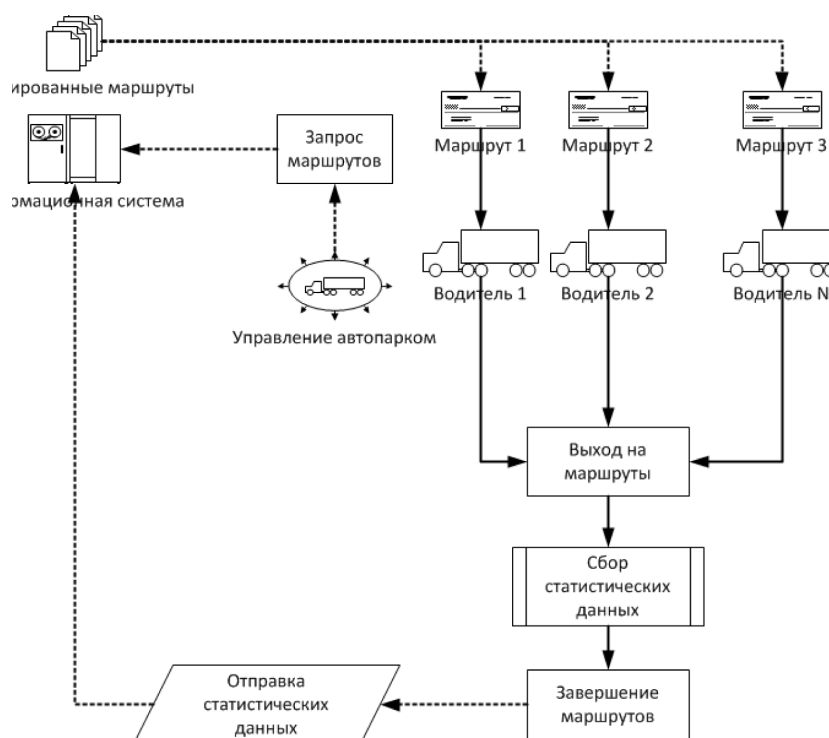


Рисунок 1. Схема планируемого процесса



Первый шаг – на определенный день строится несколько маршрутов для каждого водителя. Для этого используется алгоритм построения маршрута с учётом прогнозируемых значений ситуации на дороге и загруженности пунктов сбора. Прогнозируемые значения рассчитываются с помощью статистических данных, собранных при предыдущих прохождениях маршрутов, а также при помощи посторонних информационных систем (ИС), предоставляющих информацию о текущей и прогнозируемой загруженности дорог [5].

Второй шаг заключается в обеспечении всех водителей маршрутом на текущий день. Для этого используется информационная система, содержащая все маршруты и управляющая их на мобильные устройства водителей. После получения маршрута и выезда водителя из гаража это отмечается в системе для расчёта прогнозируемого времени прохода определённых участков маршрута и всего маршрута в целом.

После посещения каждого маршрута водитель отмечает на своем мобильном устройстве загруженность определённого пункта сбора. Это позволяет спрогнозировать загруженность при построении маршрутов в будущем.

Третий шаг – завершение цикла. После возвращения водителя весь маршрут сохраняется как пройденный и информация о прохождении будет использоваться для прогнозирования при построении маршрутов в следующие дни.

Такая схема процесса несёт некоторые трудности при расчёте оплаты труда водителей. Ведь маршруты могут меняться каждый день, а соответственно будет меняться протяженность и количество пунктов сбора. Данную проблему можно решить несколькими методами:

- определить фиксированный оклад каждому водителю;
- перевести систему в режим построения маршрутов на месяц вперед и распределения этих маршрутов для равномерной оплаты каждому из водителей.

Выбор метода расчёта суммы оплаты водителям зависит от конкретно выбранного предприятия.

Вопрос оптимизации транспортных маршрутов подробно рассмотрен с точки зрения оптимизации затрат на торговую логистику. В отличие от торговой логистики, оптимизация логистики вывоза ТБО требует немного другого – оптимизации общего времени и расстояния обхода всех точек в городе парком грузовых машин. Особенно это актуально в крупных городах, где усложнена ситуация на дорогах, а контейнеры с ТБО находятся в густонаселенных районах.

Для клининговых компаний из всех факторов, требующих оптимизации, наиболее существенные – это:

- количество заполненных контейнеров на точке сбора, которое влияет на наполненность кузова грузовой машины;
- пропускная способность дорог, которая влияет на скорость перемещения транспорта по городу.

Необходим алгоритм, который разделит все точки в городе на несколько маршрутов, общее время обхода которых будет оптимальным. Также необходимо учитывать физическую возможность грузовых машин перенести весь груз, собранный на маршруте, и оптимально распределить этот груз между всеми единицами транспорта [20; С. 47].

Материалы и методы. Для построения оптимальных маршрутов используется алгоритм зональной многокритериальной оптимизации логистических маршрутов. Данный алгоритм разделяет общую зону, состоящую из пунктов обхода, на несколько подзон, которые и представляют собой маршруты для обхода (рис. 2).

Проблема построения оптимальных маршрутов сбора и вывоза твёрдых бытовых отходов для парка машин неоднократно рассматривалась, предложены различные информационные системы и программное обеспечение для её решения. В системе ARCGIS поднимается важный вопрос – динамическое распределение точек между маршрутами. Предлагается использовать постоянные маршруты для каждой машины и при переполнении убирать её с маршрута, а оставшиеся точки передавать другим машинам. Такой подход добавляет множество сложностей – достроение маршрутов другим авто, уведомление их об изменениях.

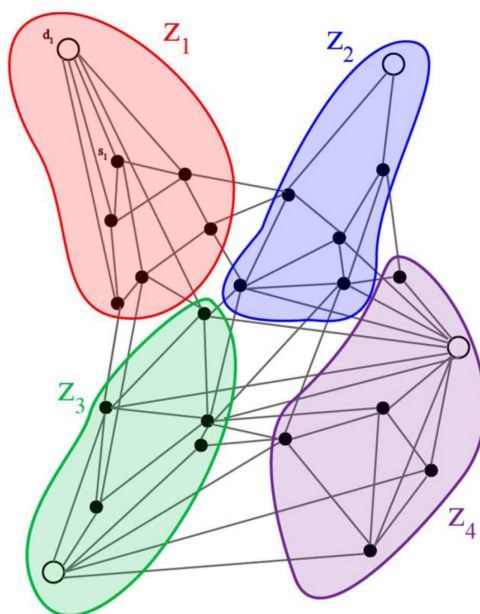


Рисунок 2. Граф маршрутов, разбитый на зоны

Возможна ситуация, когда в ближайших маршрутах машины окажутся также перегруженными, и придётся забирать машины из дальних маршрутов, что займёт большое количество времени [2; С. 22].

Проблему построения маршрутов важно рассмотреть с точки зрения построения алгоритма. Для каждой машины необходимо выстраивать каждый раз новый маршрут с учетом её характеристик, при этом учитывая наполненность пунктов сбора. Необходимо учитывать тот факт, что наполненность пунктов может изменяться даже при достаточно точном прогнозировании – случайные, не поддающиеся прогнозированию, значения либо изменение заселённости определённого района города. В таких случаях необходимо динамическое изменение маршрутов с заблаговременным реагированием и уведомлением водителя об изменении [1, 4, 5].

При наличии сведений о наполненности определённых пунктов сбора данный алгоритм подразумевает динамическое перераспределение точек между другими машинами автопарка.

Будем использовать следующие обозначения:

$S\{s_0, s_1, \dots, s_n\}$  – множество пунктов сбора (ПС);

$T\{t_0, t_1, \dots, t_m\}$  – множество единиц транспорта (ТС);

$D\{d_0, d_1, \dots, d_k\}$  – множество пунктов отгрузки (ПО);

$v(t_i)$  – вместимость ТС  $t_i \in T$ ;

$v(s_k)$  – наполненность ПС  $s_k \in D$ ;

$r_{ab}$  – длительность пути от точки  $a$  к точке  $b$ ;

$Z\{z_0, z_1, \dots, z_m\}$  – множество зон обхода (ЗО), где  $z_i$  – зона для  $i$ -го ТС;

$f_i(z_i)$  – функция определяющая длительность обхода транспортом  $t \in T$  точек  $s_{ii} \in S$ ;

$v(z_i)$  – функция определяющая наполненность всех ПС в ЗО;

Наиболее оптимальный маршрут получаем при условиях (1) и (2):

$$f_{t_1} = f_{t_1} = \dots = f_{t_m}, \quad (1)$$

$$v(z_t) \leq v(t), \forall t \in T. \quad (2)$$

Исходные данные для задачи представляются в виде взвешенного ориентированного графа, вершинами которого являются перекрестки дорог, ПС и ПО, а в качестве веса ребёр выступает длительность передвижения по данной дороге.

После этого необходимо распределить ПС и ПО на ЗО для каждого ТС. Для этой цели предназначен алгоритм оптимизации маршрутов эвакуации населения. Изменения в алгоритме вносятся на этапе перераспределения точек между ЗО.

После вычисления  $f_t$  всех ЗО происходит обмен ПС между всеми ЗО для оптимизации

общего времени обхода всех зон. В общем случае алгоритм перераспределения может быть описан последовательностью, представленной ниже.

1. Определяются допустимые погрешности:

- длительности обхода  $\Delta t$ ;
- вместимости грузовой машины  $\Delta c$ .

2. Для каждой ЗО рассчитывается длительность обхода  $f(z_i)$  и наполненность всех ПС в ЗО  $v(z_i) = \sum_k s_k, s_k \in z_i$ .

3. Находятся максимальное и минимальное значения длительности обхода для всех ЗО  $f_{max}$  и  $f_{min}$ .

4. Если условие выполняется  $\Delta f = f_{max} - f_{min} < \Delta t$ , то переходим к следующему шагу, иначе - к шагу 6).

5. Если условие выполняется  $|v(t) - v(z_t)| \leq \Delta c, \forall t \in T$ , то алгоритм завершается, иначе - к шагу 6.

6. Рассчитывается средняя длительность обхода ЗО:

$$f_{mid} = \frac{f_{max} + f_{min}}{2}.$$

7. Для каждой ЗО  $z_i \in Z$  рассчитывается отклонение (рис. 3):

- длительности обхода  $\Delta f_i = \frac{f(z_i) - f_{mid}}{\Delta t}$ ;

- наполненности  $\Delta v_i = \frac{v(t_i) - \Delta v(z_i)}{\Delta c}$ ;

- общий коэффициент отклонения  $k = \Delta v_i + \Delta f_i$ .

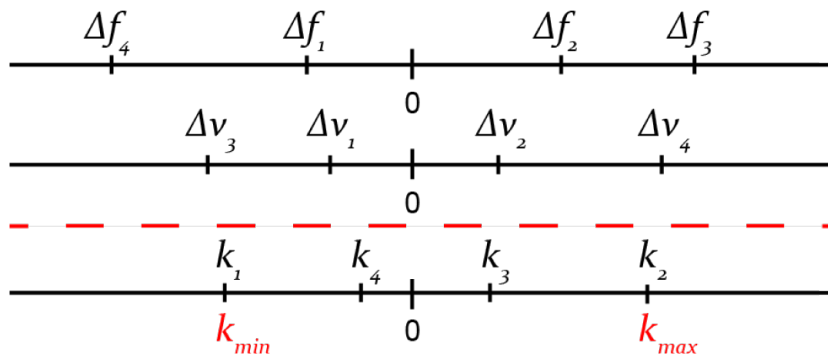


Рисунок 3. Определение общего коэффициента отклонения

8. Находятся ЗО  $z_{min}$  и  $z_{max}$  с наименьшим и наибольшим значениями общего коэффициента соответственно.

9. Для  $z_{min}$ : среди остальных ЗО  $Z_o \subset Z, z_{min} \notin Z_o$  находится минимальное расстояние  $r_{s_0 s_m}$  между ПО и  $s_m \in z_{min}$   $s_0 \in z_{0min}, z_{0min} \in Z_o$ ;

ПС  $s_0$  переносится из  $z_{0min}$  в  $z_{min}$ .

10. Для  $z_{max}$ : среди остальных ЗО  $Z_o \subset Z, z_{max} \notin Z_o$  находится минимальное расстояние  $r_{s_0 s_m}$  между ПО  $s_m \in z_{max}$  и  $s_0 \in z_{0max}, z_{0max} \in Z_o$ ; ПС  $s_0$  переносится из  $z_{0max}$  в  $z_{max}$ .

11. Для  $z_{min}, z_{0min}, z_{max}$  и  $z_{0max}$  заново рассчитывается длительность обхода  $f$  и наполненность  $v$ .

12. Находятся максимальное и минимальное значение длительности обхода  $f_{max}$  и  $f_{min}$ .

13. Если  $f_{max} - f_{min} < \Delta f$ , допустимая погрешность  $\Delta t$  удваивается.

14. Возврат к шагу 2.

Итогом выполнения алгоритма должно быть приближение итоговых значений к условиям (1) и (2).

Алгоритм основывается на идее использования общего коэффициента отклонения. Это позволяет выделить ЗО с максимальным отклонением от оптимальных условий, как в сторону перерасхода ресурсов, так и в сторону недорасхода.

Следует также учитывать, что погрешность времени посещения ПС может быть намного ниже, чем возможная в реальных условиях. Для этого предусмотрен шаг с увеличением допустимой погрешности при деградации получаемых результатов (рис. 4).

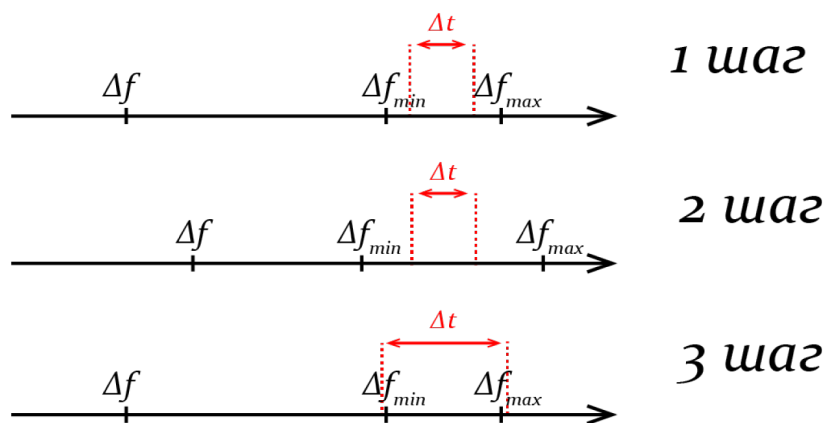


Рисунок 4. Изменение погрешности при деградации результатов

### Результаты

Использование данного алгоритма позволяет оптимизировать маршруты для парка грузовых машин, где основная цель – оптимизация общего времени и расстояния всех маршрутов. Помимо этого учитывается оптимальное распределение груза для предотвращения перегруза или неоптимального использования грузового отсека каждой машины. В условиях получения сведений о

наполненности пунктов сбора от водителей алгоритм может быть использован несколько раз для динамического изменения маршрутов во избежание перегрузки автомашин в результате неверно спрогнозированных данных [6; С. 611].

Схематично архитектура системы представлена на рисунке 5.

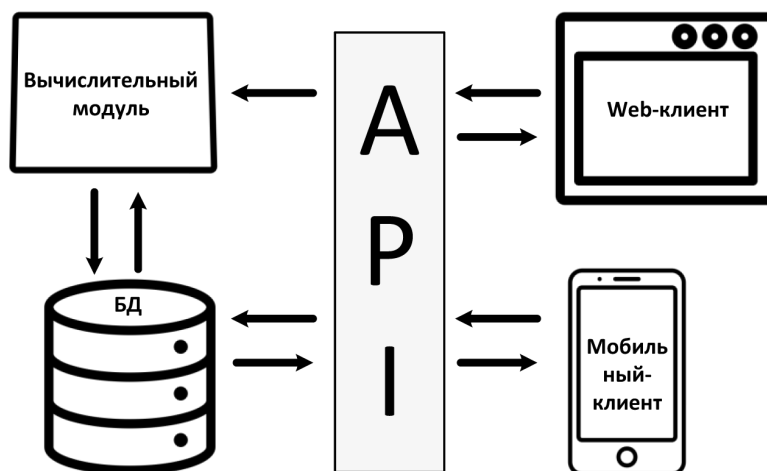


Рисунок 5. Архитектура системы

Серверная часть системы содержит в себе следующие компоненты:

- база данных;
- API для взаимодействия с клиентской частью;
- вычислительный модуль.

База данных должна хранить данные обо всех машинах, точках сбора и вывоза, а также маршрутах и путях в этом маршруте [8, 9].

Также для поддержания обработки статистических данных требуется информация о пройденных маршрутах, путях в них и посещённых точках.

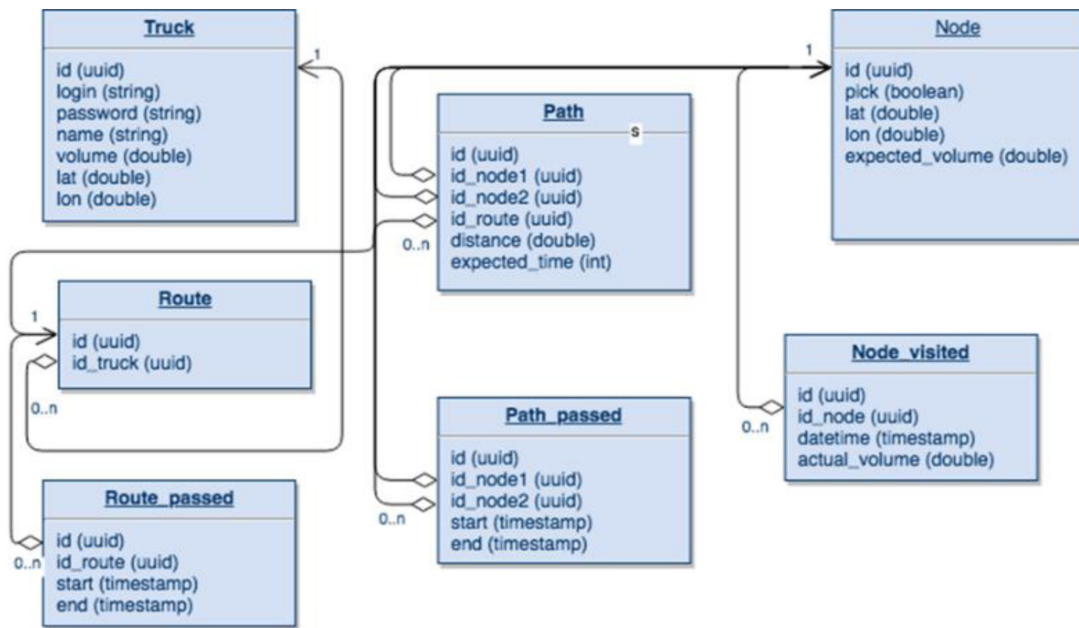


Рисунок 6. Схема базы данных системы

Для взаимодействия клиентов с сервером в API требуется реализовать следующие процессы:

- инициация расчета маршрутов;
- авторизация с загрузкой маршрута;
- обновление геопозиции автомашины;
- прохождение пути;
- посещение точки;
- прохождение маршрута.

Инициация расчета маршрутов является запросом, который возвращает ответ от сервера – были ли построены маршруты, или возникла ошибка. В запросе необходимо

передавать идентификаторы автомашин (случай, когда в смену выходят не все автомашины).

Процесс обработки запроса (рис. 7): при поступлении запроса запрашивается информация из таблиц Path, Node (все записи) и Truck (по полученным id), после чего полученная информация передается в вычислительный модуль и ожидает ответа (были ли построены маршруты), который возвращается в виде ответа на запрос.

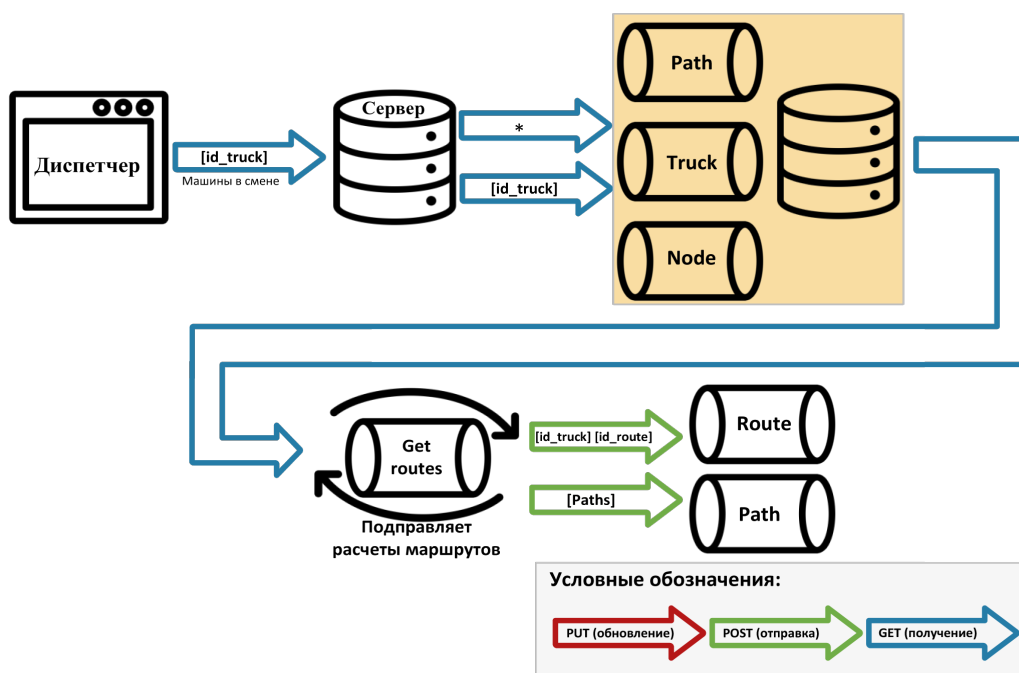


Рисунок 7. Процесс обработки запроса на создание маршрута



При авторизации отправляются логин и пароль, на что возвращается ответ – объект Truck, если данные верны, либо сообщение об ошибке. После загрузки Truck, по его id загружается объект маршрута Route. По id

маршрута загружаются пути, а также загружаются все точки, после чего процесс авторизации и загрузки маршрутов заканчивается. Схематично данный процесс представлен на рисунке 8.

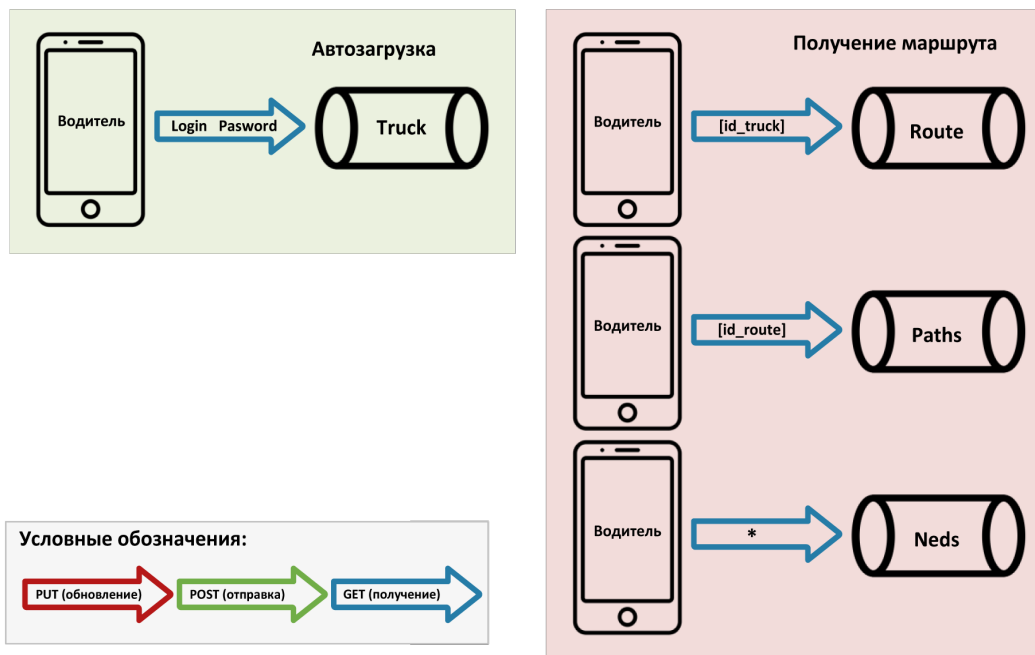


Рисунок 8. Процесс авторизации с загрузкой маршрута

Обновление геопозиции автомашины происходит с каждым её изменением на клиенте и является запросом к серверу с передачей

данных о геопозиции – широты (lat) и долготы (lon). Схема процесса представлена на рисунке 9.

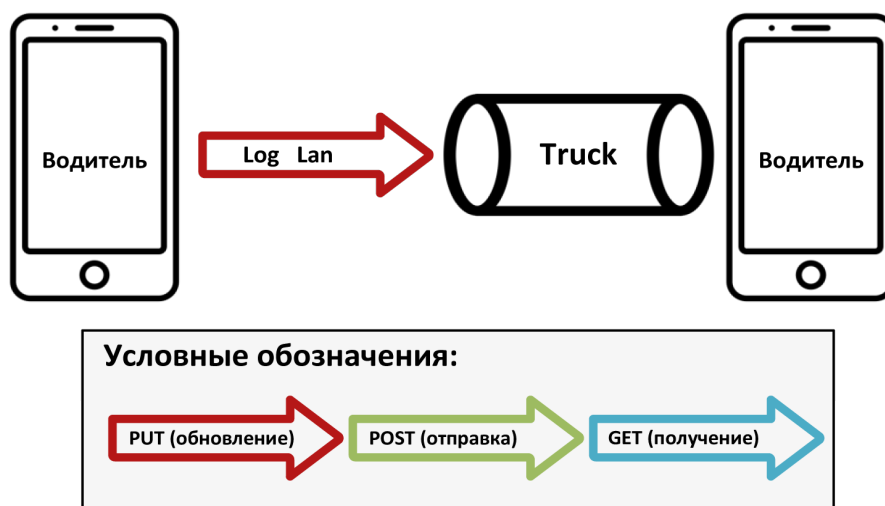


Рисунок 9. Обновление геопозиции автомашины

Прохождение пути, посещение точки и посещение точки – запросы с передачей всех необходимых данных (ссылки на необходимые идентификаторы, время начала и завершения для пути и маршрута, время

посещения для точки) [10, 11]. Цикл запросов к API в рамках одной смены представлен на рисунке 10.

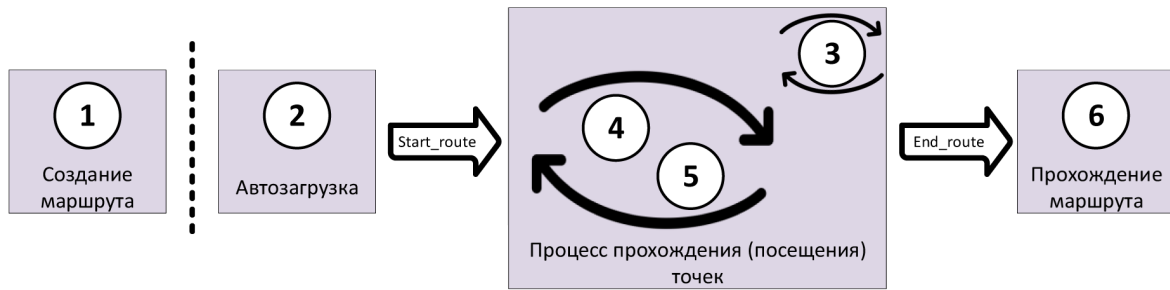


Рисунок 10. Цикл запросов к API со стороны клиентов

Перед началом смены отправляется запрос на создание маршрутов, после чего каждый водитель входит в систему под своим логином и паролем. По мере прохождения маршрута отправляются данные о начале, завершении и посещении. Параллельно с этим отправляется информация о текущей геопозиции автомашины. После отправки каждым водителем запроса о прохождении маршрута цикл завершается.

При получении определенных запросов сервер производит следующие вычисления:

- расчет оптимальных маршрутов для выбранных автомашин (прямой запрос на создание маршрутов);
- обновление ожидаемого объема точки (при запросе посещения точки);
- обновление ожидаемого времени прохождения пути (при запросе прохождения пути).

При расчете оптимальных маршрутов на входе подпрограмма получает информацию из таблиц Path, Node (все записи) и Truck (по определенным id), после чего производит необходимые вычисления, используя алгоритм оптимизации. После вычисленных для каждой автомашины маршрутов создаются записи в таблице Route для каждой машины и записи в таблице Path для каждого маршрута. Произведя все вычисления, подпрограмма отправляет ответ клиенту.

### Обсуждение

Представленный алгоритм разработки систем построения оптимальных маршрутов сбора и вывоза твердых бытовых отходов имеет важное прикладное практическое значения для достаточно крупных клининговых компаний, где экономически целесообразно организовать мобильное перераспределение точек обхода и маршрутов движения транспорта. Применение такой мобильной системы сокращает себестоимость организации

вывоза твердых бытовых отходов, что не может не сказаться на увеличении эффективности работы предприятия в целом [11, 12]. Особенно это актуально в крупных городах, где скоплена большая часть населения, что создает сложную ситуацию на дорогах. Ситуацию на дороге, а также другие важные факторы можно спрогнозировать при помощи методов статистического анализа [13-15].

Несмотря на всю прозрачность схемы определения маршрутов и затрат для всей компании в целом, в ней необходимо учитывать множество факторов, влияющих на расходы [16, 17]. Так, при достаточном количестве грузовых машин даже небольшое изменение в затраченном времени на обработку всего маршрута или в пройденном расстоянии в итоге окажет солидное влияние на итоговые затраты за определённый период. Для получения таких результатов необходимо большое количество математических вычислений, особенно при работе со статистическими данными. Используемые математические методы применяются не только в оптимизации маршрута по определенным критериям, но и в вычислении ожидаемых значений этих критериев.

### Выводы

Информационная система оптимизации логистических маршрутов с учетом статистических данных позволяет автоматически строить маршруты для нескольких автомашин автопарка организации [18-20]. Разработанный алгоритм с учетом нескольких различных критериев, с учетом изменения данных с течением времени позволяет планировать оптимальные маршруты для транспорта. Использование информационной системы для клининговой компании позволяет экономически целесообразно выполнять работу по организации вывоза твердых бытовых отходов.

### Список литературы

1. Боев В.Д. Компьютерное моделирование [Электронный ресурс] / Боев В.Д., Сыпченко Р.П. – М.: Интернет-университет информационных технологий (ИНТУИТ), 2016. – 525 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/73655.html>. – ЭБС «IPRbooks»
2. Ганин Д.В., Климов Р.В. Особенности моделирования надежности распределенных систем хранения данных // Вестник НГИЭИ. – 2017. - № 7 (74). – С. 18–25.
3. Дементьев В.Е. О связи между каузальным и некаузальным прогнозом при оценивании многомерных случайных полей // Вестник НГИЭИ. – 2018. - № 10 (89). – С. 5–13.
4. Евстигнеев В.А. Применение теории графов в программировании / Под ред. А.П. Ершова. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985.
5. Егоров В.И., Михайлов А.В., Мельберт А.А. Разработка программы для планирования маршрутов мусоровоза // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2.
6. Ерофеев А.В. Применение ARCGIS для оптимизации вывоза твердых бытовых отходов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. – Оренбург, 30 января – 01 февраля 2013 г. – С. 611-613.
7. Зангиев Т.Т., Гуржиев А.О. Оптимизация маршрутов эвакуации населения в масштабах города // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – 2016. - № 14-1. – С. 124-128.
8. Киселева Т.В. Программная инженерия. Ч. 1 [Электронный ресурс]: учебное пособие. – Электрон. текстовые данные. – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2017. – 137 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/69425.html>. – ЭБС «IPRbooks»
9. Крайнюченко И.В., Попов В.П. Теория и анализ систем [Электронный ресурс]. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2018. – 250 с.
10. Крайнюченко И.В., Попов В.П. Теория и анализ систем [Электронный ресурс]. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2018. – 250 с.
11. Крэг Ларман. Применение UML 2.0 и шаблонов проектирования: Практическое руководство. – 3-е изд.; пер. с англ. – М.: И.Д. Вильямс, 2009 – 736 с.
12. Купер А., Рейман Р., Кронин Д., Носсел К. Интерфейс. Основы проектирования взаимодействия. – СПб.: Питер, 2016 – 720 с.
13. Мейер Б. Объектно-ориентированное программирование и программная инженерия [Электронный ресурс]. – М.: Интернет-университет информационных технологий (ИНТУИТ), 2016. – 285 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/39552.html>. – ЭБС «IPRbooks»
14. Мурлин А.Г., Мурлина В.А., Янаева М.В., Ватаманов П.Ю. Моделирование информационной системы для автоматизации учета сервисов и оборудования корпоративных клиентов провайдера связи // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ, 2017. - № 10 (134). – С. 835-844. – IDA: 1341710068. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2017/10/pdf/68.pdf>
15. Павлов Д.А., Яхонтова И.М. Математическая модель задачи организации маршрутов в крупномасштабных транспортных сетях с применением методов многокритериальной оптимизации // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – № 09 (133). – С. 1220–1230. – IDA [article ID]: 1331709092. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2017/09/pdf/92.pdf>
16. Попов А.А., Холдонов А.А. Структурная оптимизация нечетких регрессионных моделей с минимизацией ошибки прогноза на тестовой выборке // Вестник НГИЭИ. – 2018. - № 2 (81). – С. 7–19.
17. Ревунков Г.И., Ковалева Н.А., Силантьева Е.Ю. Проектирование баз данных [Электронный ресурс] : учебное пособие. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 48 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/103499>
18. Савельев В.П., Шамин А.А. Оптимальное планирование ритмичного производства // Вестник НГИЭИ. – 2018. - № 11 (90). – С. 68–76.

19. Саймон Р., Ханну К. Администрирование PostgreSQL 9. Книга рецептов [Электронный ресурс] : руководство / пер. Самохвалова Е.В. – Электрон. дан. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 368 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/39995>.

20. Северова Е.С. Транспортировка твердых коммунальных отходов // Грузовое и пассажирское автохозяйство. – 2006. – № 11. – С. 46-47.

21. Семакова А. Введение в разработку приложений для смартфонов на ОС Android [Электронный ресурс]. – М.: Интернет-университет информационных технологий (ИНТУИТ), 2016. – 102 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/73670.html>. – ЭБС «IPRbooks»

22. Семенов А.А. Сетевые технологии и Интернет [Электронный ресурс]: учебное пособие. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2017. – 148 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66840.html>. – ЭБС «IPRbooks»

23. Янаева М.В. Обработка и анализ данных с использованием СУБД: учеб. пособие. – Краснодар: Изд. КубГТУ, 2018. – 127 с.

24. Яхонтова И.М., Пономарева Д.Н. Применение системы показателей бизнес-процессов для управления предприятием // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ. – 2015. – № 09 (113). – С. 1293 – 1313. – IDA [article ID]: 1131509092. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2015/09/pdf/92.pdf>

## References

1. Bojev V.D. Sypchenko R.P. Komp'juternoje modelirovanije [Elektronnyj resurs] / Bojev V.D. – М.: Интернет-университет информационных технологий (INTUIT), 2016. – 525 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/73655.html>. – JeBS «IPRbooks»

2. Ganin D.V., Klimov R.V. Osobennosti modelirovanija nadezhnosti raspredelennyh sistem hranenija dannyh // Vestnik NGIJeI. – 2017. - № 7 (74). – S. 18–25.

3. Dement'jev V.E. O svjazi mezhdju kauzal'nym i nekauzal'nym prognozom pri

ocenivanii mnogomernyh sluchajnyh polej // Vestnik NGIJeI. – 2018. - № 10 (89). – S. 5–13.

4. Evstignejev V.A. Primenenije teorii grafov v programmirovanii / Pod red. A.P. Jershova. – Moskva: Nauka. Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury, 1985.

5. Jegorov V.I., Mihajlov A.V., Mel'bert A.A. Razrabotka programmy dlja planirovanija marshrutov musorovoza // Sovremennyye problemy nauki i obrazovanija. – 2014. – № 2.

6. Jerofejev A.V. Primenenije ARCGIS dlja optimizacii vyvoza tvjordyh bytovyh othodov // Universitetskij kompleks kak regional'nyj centr obrazovanija, nauki i kul'tury. – Orenburg, 30 janvarja-01 fevralja 2013 g. – S. 611-613.

7. Zangijev T.T., Gurzhijev A.O. Optimizacija marshrutov evakuacii naselenija v masshtabah goroda // Fundamental'nyoe i prikladnyoe issledovanija v sovremennom mire. – 2016. - № 14-1. – S. 124-128.

8. Kiseljova T.V. Programnaja inzhenerija. Chast' 1 [Elektronnyj resurs]: uchebnoje posobieje. – Stavropol': Severo-Kavkazskij federal'nyj universitet, 2017. – 137 s. – Rezhim dostupa: <http://www.iprbookshop.ru/69425.html>. – JeBS «IPRbooks»

9. Krajnjuchenko I.V., Popov V.P. Teorija i analiz sistem [Elektronnyj resurs]. – Saratov: Aj Pi Jer Media, 2018. – 250 s.

10. Krajnjuchenko I.V., Popov V.P. Teorija i analiz sistem [Elektronnyj resurs] – Saratov: Aj Pi Jer Media, 2018. – 250 s.

11. Krjeg Larman. Primenenije UML 2.0 i shablonov proektirovanija^ Prakticheskoe rukovodstvo. – 3-e izd. / Per. s angl. – М.: I.D. Vil'jams, 2009 – 736 s.

12. Kuper A., Rejman R., Kronin D., Nossel K. Interfejs. Osnovy proektirovanija vzaimodejstvija. – SPb.: Piter, 2016 – 720 s.

13. Mejer B. Ob`jektno-orijentirovannoje programmirovaniye i programnaja inzhenerija [Elektronnyj resurs]. – М.: Интернет-университет информационных технологий (INTUIT), 2016. – 285 s. – Rezhim dostupa: <http://www.iprbookshop.ru/39552.html>. – JeBS «IPRbooks»

14. Murlin A.G., Murlina V.A., Janaeva M.V., Vatamanov P.Ju. Modelirovanije informacionnoj sistemy dlja avtomatizacii uchjota servisov i oborudovanija korporativnyh klientov provajdera svjazi // Politematicheskij setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta



- (Nauchnyj zhurnal KubGAU). – Krasnodar: KubGAU, 2017. - № 10 (134). – S. 835-844. – IDA : 1341710068. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2017/10/pdf/68.pdf>
15. Pavlov D.A., Jahontova I.M. Matematicheskaja model' zadachi organizacii marshrutov v krupnomasshtabnyh transportnyh setjah s primenenijem metodov mnogokriterial'noj optimizacii // Politematicheskij setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Elektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU. – 2017. – № 09 (133). – S. 1220 – 1230. – IDA [article ID]: 1331709092. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2017/09/pdf/92.pdf>
16. Popov A.A., Holdonov A.A. Strukturnaja optimizacija nechetkih regressionnyh modelej s minimizaciej oshibki prognoza na testovoj vyborke // Vestnik NGIJeI. – 2018. - № 2 (81). – S. 7–19.
17. Revunkov G.I., Kovaljova N.A., Silant'jeva Je.Ju. Projektirovanije baz dannyh [Elektronnyj resurs] : uchebnoje posobije. – Moskva : MGTU im. N.Je. Baumana, 2018. – 48 s. – Rezhim dostupa: <https://e.lanbook.com/book/103499>
18. Savel'jev V.P., Shamin A.A. Optimal'noje planirovanije ritmichnogo proizvodstva // Vestnik NGIJeI. – 2018. - № 11 (90). – S. 68–76.
19. Sajmon R., Hannu K. Administrirovanije PostgreSQL 9. Kniga receptov [Elektronnyj resurs] : rukovodstvo / per. Samohvalova Je.V. – Elektron. dan. – Moskva: DMK Press, 2013. – 368 s. – Rezhim dostupa: <https://e.lanbook.com/book/39995>.
20. Severova Je.S. Transportirovka tvjordyh kommunal'nyh othodov – Gruzovoje i passazhirskoje avtohozjajstvo. – 2006. – № 11. – S. 46-47.
21. Semakova A. Vvedenije v razrabotku prilozhenij dlja smartfonov na OS Android [Elektronnyj resurs]. – M.: Internet-universitet informacionnyh tehnologij (INTUIT), 2016. – 102 s. – Rezhim dostupa: <http://www.iprbookshop.ru/73670.html>. – JeBS «IPRbooks»
22. Semjonov A.A. Setevyje tehnologii i Internet [Elektronnyj resurs]: uchebnoje posobije. – SPb.: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet, JeBS ASV, 2017. – 148 c. – Rezhim dostupa: <http://www.iprbookshop.ru/66840.html>. – JeBS «IPRbooks»
23. Janajeva M.V. Obrabotka i analiz dannyh s ispol'zovanijem SUBD: ucheb. posobije / M.V. Janajeva. – Krasnodar: Izd. KubGTU, 2018. – 127 s.
24. Jahontova I.M., Ponomareva D.N. Primenenije sistemy pokazatelej biznes-processov dlja upravlenija predpriyatijem // Politematicheskij setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Elektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2015. – № 09 (113). – S. 1293–1313. – IDA [article ID]: 1131509092. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2015/09/pdf/92.pdf>





**Табет Науф Кайед Абдулла**  
**Thabet Nayef Kayed Abdulla**

*преподаватель,  
Аденский университет,  
г. Аден,  
Республика Йемен*



**Фетисов В.С.**  
**Fetisov V.S.**

*доктор технических наук, профессор  
кафедры «Информационно-измерительная  
техника», Уфимский государственный  
авиационный технический университет,  
г. Уфа,  
Российская Федерация*

УДК 620.179.142.5

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-2-105-112

## **ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ОТЛОЖЕНИЙ ПАРАФИНА НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НЕФТЕПРОВОДА**

Для планирования и эффективного проведения дорогостоящих мероприятий по очистке нефтепроводов от парафиновых отложений нужна достоверная информация о текущей толщине слоя этих отложений. Следовательно, необходимы соответствующие средства измерений. Очень перспективными представляются измерительные преобразователи на основе тепловых методов. Как правило, такие преобразователи имеют электронагреватель и термодатчики, с помощью которых регистрируются параметры процессов теплопередачи, зависящие, в частности, от толщины слоя парафиновых отложений.

После анализа известных тепловых преобразователей авторы предложили новое техническое решение, в основе которого лежит идея локализации области измерений по длине трубы и перенаправления теплового потока от нагревателя внутрь слоя отложений. Это делает преобразователь более чувствительным к толщине слоя отложений. Предлагается измерения толщины слоя отложений в интересующем сечении трубы делать многоточечными, что делает возможным оценку неравномерности отложений по внутренней поверхности трубы.

Предложенный авторами способ назван термодинамическим, поскольку измерения проводятся не в условиях теплового баланса, а задолго до его наступления, и для оценки толщины отложений используются временные и температурные параметры динамики процесса теплопередачи.

Для реализации предложенного способа на трубопроводе соосно с ним располагают основной кольцевой нагреватель, под которым равномерно по окружности располагают несколько термодатчиков. Также устанавливают два дополнительных кольцевых нагревателя-термобарьера на одинаковых расстояниях по обе стороны от основного нагревателя, весь участок трубопровода между нагревателями-термобарьерами теплоизолируют от окружающей среды слоем термоизолятора. Включают одновременно все нагреватели, затем отключают их, при этом непрерывно измеряют температуру на трубе под основным нагревателем с помощью термодатчиков, затем по полученным временным диаграммам изменения температуры определяют толщину отложений.

**Ключевые слова:** асфальто-смоло-парафиновые отложения (АСПО), парафин, нефтепровод, измерение толщины, термодинамический метод, кольцевой электронагреватель, термобарьер, термоизоляция.

## THERMODYNAMIC METHOD OF DETERMINATION OF THICKNESS OF PARAFFIN SEDIMENTS ON OIL PIPELINE INNER SURFACE

For planning and effective implementation of expensive operations for cleaning oil pipelines from paraffin deposits it is necessary to get faithful information concerning paraffin sediments thickness. Therefore, corresponding measuring devices are necessary. Measuring transducers based on thermal methods are more preferable. As a rule, such transducers includes electrical heater and temperature sensors for measurement of heat transfer parameters which are dependent on many factors including paraffin sediments thickness.

After analysis of known heat transfer transducers authors proposed the new technical solution based on the idea of localization of measurement area in a pipe and redirection of thermal flow from the heater into the layer of paraffin deposit. It makes the proposed transducer more sensitive to the thickness of paraffin sediments. It was proposed to implement measurement of paraffin deposit thickness as multipoint, that make possible to estimate nonuniformity of paraffin layer on the inner surface of the pipe.

The proposed method was called thermodynamic method, because measurement is implemented not under thermal balance conditions but it is finished long before achievement this state, and temporal and temperature parameters of heat transfer dynamic process are used for estimation of paraffin deposit thickness.

To realize the proposed method it is necessary to install the ring-shaped electrical heater around the pipe. Under the heater a few temperature sensors must be placed with equal distances between neighboring ones. Also two additional the same shape heaters functioning as thermal barriers must be placed on the pipe with equal distances astride the main heater. All the pipe segment between the heaters-barriers must be isolated from the ambient air by the heat-insulating layer.

For measurement implementation it is necessary to switch on all the heaters simultaneously, then switch off them, and all this time to measure temperature under the main heater by the mentioned sensors, then with the received temperature time chart to determine the paraffin deposit thickness.

**Key words:** asphaltic resinous paraffine sediments (ARPS), paraffin, oil-pipeline, thickness measurement, thermodynamic method, ring-shaped electrical heater, thermal barrier, heat-insulating.

Ежегодно многие страны мира тратят огромные средства на очистку нефтепроводов от вредных асфальто-смоло-парафиновых отложений (АСПО). Так как основу этих отложений составляют именно парафины, то далее для простоты будем называть их просто парафиновыми отложениями. Для борьбы с ними периодически проводят специальные мероприятия, связанные с нагревом трубы, применением специальных механических скребков, использованием химических растворителей или промывающей горячей воды. Если вовремя не производить такую очистку, то эффективное сечение нефтепровода может недопустимо сильно сузиться, сильно затруд-

няя или вообще перекрывая при этом транспортировку нефти. Для планирования и эффективного проведения дорогостоящих мероприятий по очистке трубы от парафина нужна достоверная информация о текущей толщине слоя отложений. Следовательно, необходимы соответствующие средства измерений. В нашей предыдущей статье [1] мы сформулировали требования, предъявляемые к измерителям толщины АСПО и рассмотрели различные альтернативные варианты реализации таких устройств на основе различных физических принципов. Очень перспективными с точки зрения соотношения «качество измерений / стоимость» пред-

ставляются измерительные преобразователи на основе тепловых методов.

Наиболее просто реализуются тепловые способы контроля отложений, основанные на изменении условий теплопередачи в трубе при росте толщины отложений. Один из таких способов [2] заключается в том, что в трубу врезают элемент, в котором совмещены нагреватель и датчик температуры, причем чувствительную поверхность датчика располагают так, чтобы она сопрягалась с внутренней поверхностью трубы. Нагреватель включают на определенное время, затем отключают. При этом регистрируют показания температурного датчика. Они будут существенно отличаться для чистой трубы и для трубы с внутренними отложениями, которые ухудшают условия теплообмена. По параметрам зависимостей температуры от времени рассчитывают толщину отложений. Достоинством способа является возможность контроля толщины отложений в любом сечении трубы и в любой точке окружности данного сечения. Однако серьезным недостатком описанного решения является необходимость врезки специальных функциональных элементов в стенку трубопровода, что ограничивает возможности его применения.

От указанного недостатка свободен способ, описанный в [3]. Согласно ему, на наружной поверхности трубы соосно с ней на определенном расстоянии друг от друга располагают кольцевые нагреватель и термодатчик. В этом случае не требуется применять какие-либо механические воздействия на трубопровод и останавливать технологический поток. Нагреватель включают и отключают с определенной периодичностью. Термодатчиком регистрируют форму сигнала, соответствующую количеству тепла, перенесенного по участку трубы. Если внутренняя поверхность трубы чистая, то, благодаря интенсивному теплоотводу в транспортируемую жидкость, до термодатчика будет доходить лишь небольшая часть тепла. Если же внутренняя поверхность трубы теплоизолирована от жидкости слоем отложений, то по стенке трубы до термодатчика будет доходить гораздо большая часть теплового потока.

По параметрам снятых временных диаграмм рассчитывают толщину слоя отложений. Недостаток способа состоит в интегральном характере получаемых результатов (рассчитывается средняя по длине участка трубы толщина отложений и не детализируются неравномерности отложений по окружности в сечениях трубы). Кроме того, чувствительность результата к толщине слоя отложений не очень велика, так как большая часть теплового потока распространяется вдоль стенки трубы в обоих направлениях и никак не связана с отложениями.

Последний из отмеченных отрицательных факторов может быть значительно ослаблен за счет введения нагревателей-термобарьеров. Пример введения такого термобарьера реализован в способе [4]. Суть этого способа состоит в том, что на наружной поверхности трубы кроме основного точечного нагревателя и расположенного под ним термодатчика формируют второй нагреватель, который окружает основной. Одновременное включение нагревателей приводит к тому, что вокруг основного нагревателя в стенке трубы под вторым нагревателем формируется эквипотенциальная зона, которая изменяет градиент температур. Большая часть теплового потока вместо распространения по стенке трубы направляется внутрь трубы через слой отложений. Вследствие этого зависимость температуры, регистрируемой термодатчиком, от толщины слоя отложений становится более ярко выраженной. Толщина слоя отложений рассчитывается по параметрам снятой временной диаграммы. Однако данный способ ориентирован на точечную оценку толщины отложений, тогда как для надежного контроля отложений требуется определять их толщину в нескольких точках окружности данного сечения трубы. Размещать же несколько описанных структур по окружности на наружной поверхности трубы представляется нецелесообразным и труднореализуемым, особенно для трубопроводов малого диаметра.

Для применения на трубах более удобной представляется кольцеобразная форма нагревателя. Именно такой используется в спо-

собе, описываемом патентом [5]. Способ включает в себя размещение на трубопроводе соосно с ним кольцевого нагревателя и группы термодатчиков, располагаемых в одну линию на поверхности трубопровода параллельно его оси. Кольцевой нагреватель включают, и, после установления термодинамического равновесия, регистрируют распределение температуры вдоль поверхности трубы с помощью группы термодатчиков. С увеличением расстояния от нагревателя температура экспоненциально уменьшается. Крутизна этой зависимости зависит от условий теплообмена с жидкостью: если слоя отложений нет, то температура падает очень быстро; если же отложения имеются, то они ухудшают теплообмен, и чем толще слой, тем медленнее изменяется температура. Таким образом, по параметрам указанной зависимости определяют толщину слоя отложений. Рассмотренный способ имеет невысокую чувствительность к толщине отложений, так как распространение тепла от нагревателя происходит преимущественно внутри стенки трубы, и лишь малая часть попадает в слой отложений и в жидкость, вследствие чего зависимость измеряемого параметра от толщины отложений невелика, а значит, результирующая погрешность определения толщины слоя отложений будет большой. Другим недостатком способа является то, что результат измерений формируется на довольно длинном отрезке трубы, по длине которого отложения могут иметь разную толщину. Результат при этом является осредненным для данного отрезка, а его достоверность (оцениваемая как доверительная вероятность нахождения погрешности в определенных пределах) применительно к отдельному сечению трубы невысока. Достоверность измерений невелика также вследствие того, что в любом сечении трубы толщина отложений по окружности внутренней поверхности трубы также в общем случае непостоянна, а измерения проводятся только для одной точки окружности.

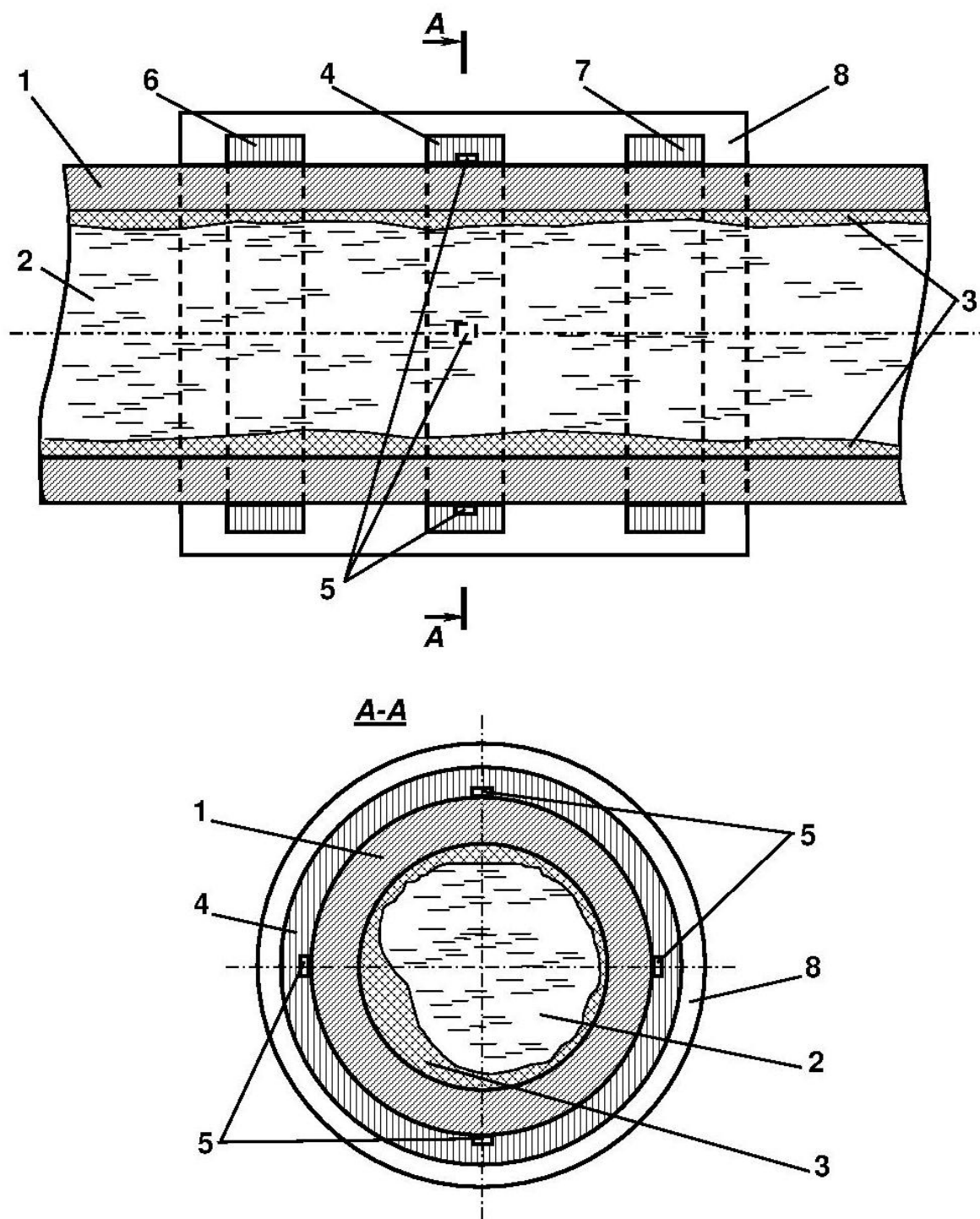
Анализ рассмотренных технических решений позволил авторам выявить неиспользованные возможности в части уменьше-

ния случайной погрешности измерения толщины слоя отложений и повышения достоверности этих измерений за счет сужения области измерений по длине трубы и перенаправления теплового потока от нагревателя внутрь слоя отложений, а также за счет детализации измерений толщины слоя отложений в интересующем сечении трубы.

Предложенный авторами способ назван термодинамическим, поскольку измерения проводятся не в условиях теплового баланса, а задолго до его наступления, и для оценки толщины отложений используются временные и температурные параметры динамики процесса теплопередачи.

Реализация предложенного способа проиллюстрирована на рисунке 1. Построение измерительного преобразователя заключается в том, что на трубопроводе 1 соосно с ним располагают основной кольцевой нагреватель 4, под которым равномерно по окружности располагают несколько термодатчиков 5. Также устанавливают два дополнительных кольцевых нагревателя-термобарьера 6 и 7 на одинаковых расстояниях по обе стороны от основного нагревателя, весь участок трубопровода между нагревателями-термобарьерами теплоизолируют от окружающей среды слоем термоизолятора 8. Для осуществления предложенного способа включают одновременно все нагреватели, затем отключают их, при этом непрерывно измеряют температуру на трубе под основным нагревателем в нескольких точках с помощью термодатчиков, равномерно распределенных по окружности вокруг трубы, затем по полученным временным диаграммам изменения температуры определяют толщину отложений.





**Рисунок 1.** Датчик с тремя кольцевыми нагревателями:

- 1 – стенка трубопровода; 2 – транспортируемая жидкость; 3 – отложения на внутренней поверхности трубопровода; 4 – основной кольцевой нагреватель; 5 – термодатчики; 6 – первый нагреватель-термобарьер; 7 – второй нагреватель-термобарьер; 8 – термоизолятор

Более детально процесс проиллюстрирован на рисунке 2, где приведены примерные временные диаграммы сигнала на одном из термодатчиков для случаев чистого трубо-

провода (рис. 2, а) и трубопровода с отложениями на внутренней поверхности (рис. 2, б).



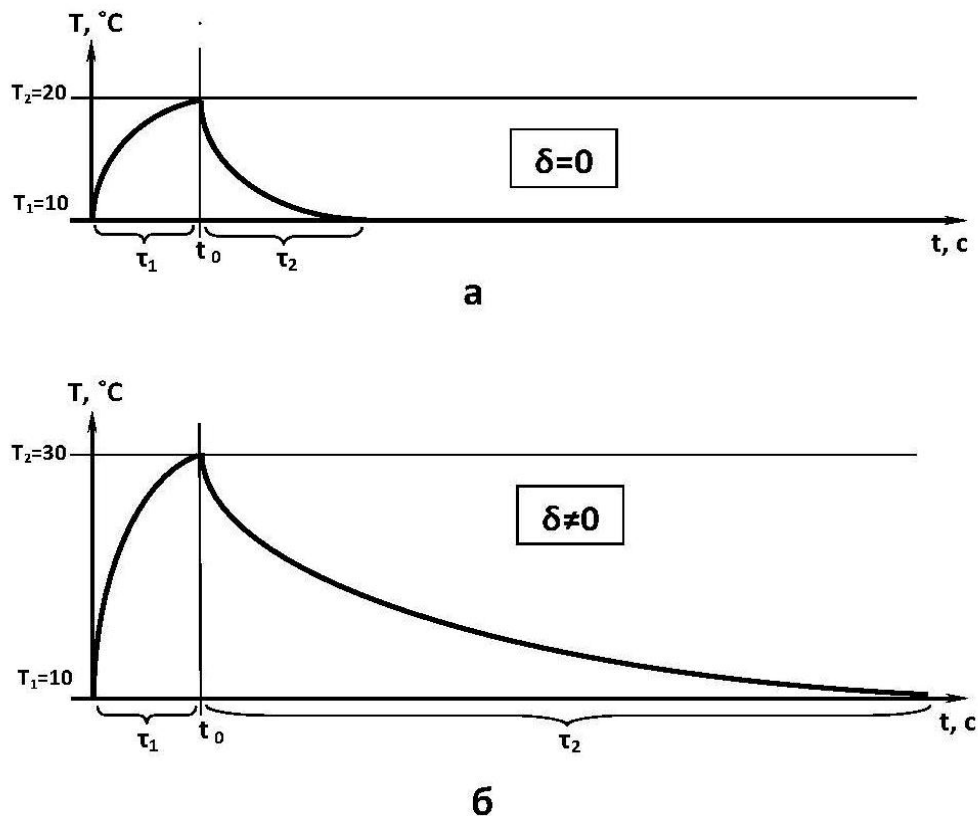


Рисунок 2. Примерные временные диаграммы сигнала на одном из термодатчиков:  
а – для чистого трубопровода; б – для трубопровода с отложениями парафина

Все нагреватели 4, 6 и 7 включают одновременно на определенное время  $\tau_1$  (рис. 2), в течение которого достигается заметное повышение температуры под нагревателями, но еще не достигается термодинамическое равновесие. После отключения всех нагревателей происходит понижение температуры до исходной в течение времени  $\tau_2$ . Все изменения температуры в нескольких точках под основным нагревателем 4 непрерывно регистрируют с помощью соответствующих термодатчиков 5. Для каждого термодатчика по полученным данным строят временную диаграмму (рис. 2), по параметрам которой затем определяют толщину отложений под термодатчиком. Необходимость определения толщины в нескольких точках окружности обусловлена тем, что в поперечном сечении трубы (сечение А-А на рис. 1) толщина отложений в общем случае неодинакова, и одиночный датчик не может дать объективной картины отложений.

Термоизолятор 8 препятствует распространению теплового потока от нагревателя 4 в окружающую среду, а благодаря действию нагревателей-термобарьеров 6, 7, создающих

в стенке трубы по обе стороны от нагревателя 4 эквитермальные кольцевые зоны, градиент температур от нагревателя 4 направляется не вдоль стенки трубы 1, а отклоняется внутрь трубы, в слой отложений 3 и в жидкость 2, что делает характер получаемых временных диаграмм более зависимым от слоя отложений, что в конечном счете повышает точность определения толщины слоя отложений.

Отличие временных диаграмм, показанных на рисунке 2, одна из которых соответствует чистому трубопроводу (рис. 2, а; толщина отложений  $\delta=0$ ), а другая – трубопроводу с отложениями (рис. 2, б;  $\delta \neq 0$ ), объясняется следующим. В случае  $\delta=0$  при включенных нагревателях происходит интенсивный теплообмен стенки трубы с жидкостью, поэтому за фиксированное время  $\tau_1$  она не очень сильно разогревается от исходной температуры  $T_1$  до температуры  $T_2$ , а потом, после отключения нагревателей, она быстро остывает по этой же причине (интервал времени остывания  $\tau_2$  до исходной температуры при этом относительно короткий). В случае наличия отложений ( $\delta \neq 0$ ) за то же самое время нагрева  $\tau_1$  стенка трубы нагреется гораздо

сильнее (температура  $T_2$  будет заметно выше, чем в предыдущем случае), так как теплообмен с жидкостью затруднен – труба отделена от жидкости слоем отложений, и чем толще этот слой, тем сильнее теплоизоляция. После отключения нагревателей по той же самой причине наличия теплоизоляции трубы от жидкости остывание происходит медленно (время остывания  $\tau_2$  относительно велико), причем  $\tau_2$  будет тем больше, чем больше толщина слоя отложений  $\delta$ .

Динамика изменения температуры, регистрируемая разными термодатчиками группы 5, в общем случае может оказаться различной, так как условия теплообмена в разных частях сечения трубы различны вследствие неравномерности толщины слоя отложений. Поэтому конечный результат получают в виде группы значений толщины слоя отложений  $\delta$  для каждого места установки термодатчиков.

Определение числовых значений  $\delta$  производят по заранее снятым градуировочным зависимостям. Такими функциональными зависимостями могут быть, например  $\delta=f(\tau_2)$  или  $\delta=f(T_2-T_1)$ . Возможно также использование сразу двух параметров процесса, т.е. функции  $\delta=f(\tau_2, T_2-T_1)$ . Для эмпирического определения таких зависимостей используют включенный в контур с циркулирующей жидкостью фрагмент трубы из того же материала, такого же диаметра и с такой же толщиной стенки, что и на объекте измерения. На этом фрагменте размещают описанные элементы, имитируют отложения с несколькими разными значениями толщины, и для каждого из них реализуют описанный выше способ измерения и фиксируют интересующие параметры, например,  $\tau_2$  или  $T_2-T_1$ . При этом фрагмент трубы должен заполняться жидкостью, совпадающей по составу с той, что используется на объекте измерения. Скорость движения жидкости также должна соответствовать скорости движения жидкости на объекте измерения. По снятым градуировочным отсчетам строится эмпирическая зависимость заранее выбранного вида путем определения коэффициентов при аргументах (последнее выполняют, например, с помощью метода наименьших квадратов [6, С. 127-133]).

Приведем пример конкретной реализации предлагаемого способа.

Требуется определить толщину слоя парафина в стальном нефтепроводе с наружным диаметром 45 мм и толщиной стенки 2 мм. На трубе располагают основной кольцевой электронагреватель, под которым смонтированы 4 равномерно распределенных по окружности термодатчика типа LM35, каждый из которых подключают к микроконтроллеру или компьютеру, что позволяет непрерывно производить отсчеты температуры. По обе стороны от основного нагревателя на расстоянии 10 мм размещают нагреватели-термобарьеры. Все нагреватели имеют ширину 6 мм и мощность 100 Вт. Все нагреватели подключают одновременно к источнику питания на  $\tau_1=10$  с, при этом термодатчики регистрируют повышение температуры. Затем их отключают. После того, как температура под каждым из датчиков опускается до исходной, цикл измерения может быть повторен.

Вычисление толщины слоя парафина  $\delta$  производят по заранее определенной градуировочной формуле  $\delta=f(\tau_2)$ , которая получена на основе градуировочных операций, в ходе которых в отрезке трубы с описанными элементами искусственно на внутренней поверхности последовательно наращивают слой парафина толщиной 2, 5 и 10 мм, для каждого из этих значений (а также для чистой трубы) измеряют соответствующие значения  $\tau_2$ . При этом в трубопроводном контуре, в который врезают градуировочный образец трубы, поддерживают все те условия, которые должны быть на объекте измерения: сорт нефти, состав парафиновых отложений, скорость течения жидкости (0,5 м/с). Например, для полученных пар значений ( $\delta=0$ ;  $\tau_2=67$  с), ( $\delta=2$  мм;  $\tau_2=84$  с), ( $\delta=5$  мм;  $\tau_2=130$  с), ( $\delta=10$  мм;  $\tau_2=334$  с) с помощью метода наименьших квадратов определены коэффициенты аппроксимирующего степенного многочлена второй степени, который и составляет градуировочную формулу:  $\delta = -6,73 + 0,12 \tau_2 - 0,0002 (\tau_2)^2$ . По данной формуле в процессе измерений на объекте рассчитывают толщину отложений для каждого из четырех термодатчиков.

Предлагаемый способ с использованием двух дополнительных кольцевых нагревате-

лей-термобарьеров по обе стороны от основного нагревателя по сравнению со способом, в котором используется только один кольцевой нагреватель, позволяет сузить область измерений по длине трубы и увеличить чувствительность регистрируемых параметров к толщине слоя отложений, что в конечном счете повышает точность и достоверность

измерений толщины этого слоя. Достоверность измерений толщины отложений повышается также за счет выполнения дополнительных измерений толщины отложений по окружности на внутренней поверхности трубы под кольцевым нагревателем.

### Список литературы

1. Фетисов В.С., Табет Н.К.А. Проблемы измерений толщины асфальто-смоло-парафиновых отложений в нефтепроводах и пути их решения // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. - № 1. – Т. 12. – С. 55-60.
2. US Pat. № 9176044. МПК G01N 25/72. Publ. Nov.3, 2015
3. US Pat. № 6886393. МПК G01N 25/00. Publ. May 3, 2005
4. Патент РФ № 2449207. МПК G01B 17/02. Оpubл. 27.04.2012
5. Патент РФ № 2344338. МПК G01B 17/02. Оpubл. 20.01.2009
6. Алиев Т.А. Экспериментальный анализ. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.

### References

1. Fetisov V.S., Tabet N.K.A. Problemy izmerenij tolshchiny asfal'to-smolo-parafinovyh otlozhenij v nefteprovodah i puti ih reshenija // Elektrotehnicheskije i informacionnyje kompleksy i sistemy. – 2018. - № 1. – Т. 12. – S. 55-60.
2. US Pat. № 9176044. MPK G01N 25/72. Publ. Nov.3, 2015
3. US Pat. № 6886393. MPK G01N 25/00. Publ. May 3, 2005
4. Patent RF № 2449207. MPK G01B 17/02. Opubl. 27.04.2012
5. Patent RF № 2344338. MPK G01B 17/02. Opubl. 20.01.2009
6. Alijev T.A. Eksperimental'nyj analiz. – M.: Mashinostrojenije, 1991. – 272 s.



**Доларчи С.М.**  
**Dolarchi S.M.**

*преподаватель кафедры  
«Информационные, математические и  
естественнонаучные дисциплины»,  
Южно-Уральский институт  
управления и экономики,  
г. Коркино,  
Российская Федерация*



**Денисова О.А.**  
**Denisova O.A.**

*доктор физико-математических наук,  
доцент, профессор кафедры «Физика»,  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет,  
г. Уфа,  
Российская Федерация*

УДК 62-529

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-2-113-121

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СИЛОКСАНОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ**

Изотропия физических свойств и прочность кварцевого стекла делает его хорошим материалом для применения в качестве резонаторов в системах навигации летательных аппаратов, в сложных оптических системах и элементах автоматики. Для образования твёрдой поверхности необходимо создать на ней силоксановые связи, состоящие из соединений кремния с кислородом, образующих структурную единицу кварцевого стекла – тетраэдр  $SiO_4$ , который может присутствовать в пяти своих модификациях  $Q^n$ , где  $n$  – количество мостиковых связей, определяемых методом комбинационного рассеяния света.

В процессе образования силоксановых связей наблюдается полимеризация с формированием линейных и кольцевых структур, что ведёт к упрочнению поверхности изделий из кварцевого стекла, а это достигается термической обработкой – отжигом. Определить прочность поверхности кварцевого стекла можно несколькими методами: Виккерса с алмазным индентором, фрактальной геометрии, а также лежачей капли с помощью дистиллированной воды или глицерина. В данной работе мы остановились на подробном описании метода лежачей капли с помощью дистиллированной воды. Для этой цели была разработана автоматизированная печь сопротивления, работающая под управлением персонального компьютера, а для обработки результатов качества поверхности – компьютерная программа «Метод лежачей капли», написанная на языке Delphi 7.0. По результатам двенадцати измерений для каждой температуры она выдаёт температуру отжига, среднее квадратическое отклонение, среднюю квадратическую ошибку выборки, величину угла смачивания, доверительный интервал, доверительную вероятность, коэффициент Стьюдента. Результаты расчётов можно вывести на экран монитора или в виде файла. Интерфейс программы удобен и понятен.

Для формирования качественной связи была составлена компьютерная программа для вычисления радиуса зародыша и свободной энергии Гиббса, необходимой для его формирования. Расчёты методом лежачей капли и фрактальной геометрии показали идентичность результатов. Обе программы запатентованы.

**Ключевые слова:** комбинационное рассеяние света, механический резонатор, силоксановая связь, тетраэдр, кварцевое стекло, отжиг, печь сопротивления, среднее квадратическое отклонение, средняя квадратическая ошибка выборки, угол смачивания, доверительный интервал.

## AUTOMATED INFORMATION-MEASURING COMPLEX FOR OBTAINING A SILOXANE SURFACE OF A SEMISPHERICAL RESONATORS

The isotropy of physical properties and the strength of quartz glass make it a good material for use as resonators in aircraft navigation systems, in complex optical systems and automation elements. To form a solid surface, it is necessary to create siloxane bonds on it, consisting of silicon compounds with oxygen, forming a structural unit of quartz glass – the  $SiO_4$  tetrahedron, which can be present in five of its modifications  $Q^n$ , where  $n$  is the number of bridge bonds that can be determined by Raman scattering.

In the process of formation of siloxane bonds, a polymerization process occurs with the formation of linear and ring structures, which leads to the hardening of the surface of a quartz glass product, and this is achieved by a heat treatment process – annealing. The surface strength of quartz glass can be determined in several ways: by the Vickers method with a diamond indenter, by the method of fractal geometry and by the method of a lying drop using distilled water or glycerin. In this paper, we stopped at a detailed description of the method of the recumbent drop using distilled water. For this purpose, an automated resistance furnace has been developed that runs under the control of a personal computer, and for processing the results of surface quality, the computer program “Laying drop method” written in Delphi 7.0. According to the results of twelve measurements for each temperature, it produces: annealing temperature, standard deviation, standard error of the sample, the value of wetting angle, confidence interval, confidence probability, Student's coefficient. The results of calculations can be displayed on the monitor or in an external file. The program interface is convenient and clear.

To form a quality connection, a computer program was compiled to calculate the radius of the nucleus and the Gibbs free energy necessary for its formation. Calculations using the method of a lying drop and fractal geometry showed the identity of the results. Both programs are patented.

**Key words:** Raman scattering, mechanical resonator, siloxane coupling, tetrahedron, quartz glass, annealing, resistance furnace, standard deviation, standard error of the sample, wetting angle, confidence interval.

### Введение

Большой спрос на изделия из кварцевого стекла в авиационной и ракетно-космических

отраслях в качестве полусферических механических резонаторов (рис. 1) делает его незаменимым материалом.



**Рисунок 1.** Внешний вид резонатора



Одно из важнейших свойств кварцевых стёкол КУ-1 – изотропность физических свойств. Но только этого недостаточно, необходимо упрочнить поверхность изделия, так как в процессе эксплуатации может измениться форма резонатора, что повлечёт за собой изменение индуктивности контура и появление погрешности в гироскопах летательных аппаратов [1].

Добротность изделия из кварцевого стекла является одной из основных его характеристик, указывающих на его качество, которую можно оценить по следующей формуле [2]:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (1)$$

где  $Q$  – добротность изделия;  $R$  – активное сопротивление, Ом;  $L$  – индуктивность изделия, Гн;  $C$  – ёмкость изделия, Ф.

Рассмотрим влияние каждого фактора, входящего в формулу (1), на величину добротности. Кварцевое стекло является плохим проводником электрического тока, так как не имеет достаточного количества свободных носителей электрического заряда, следовательно, активное сопротивление – величина постоянная.

Ёмкость детали – способность накапливать электрический заряд, тоже является величиной постоянной.

Индуктивность будет переменной и зависящей от магнитной проницаемости среды, размеров и формы изделия.

Магнитная проницаемость среды – величина постоянная, повлиять на неё техническими или физическими методами мы не можем. Размеры изделия можно менять, но часто они задаются конструктивно, поэтому будем их считать неизменными.

Форму изделия тоже задаёт конструктор, но мы можем физическими методами повлиять на её качество, используя технологию получения силоксановой связи на поверхности изделия. Это даст не только упрочнение поверхности, что влечёт за собой увеличение прочности, пластичности и хрупкости, но эти параметры обеспечивают и сохранение формы детали в средствах автоматики при многократном переключении или использовании его в качестве гироскопа.

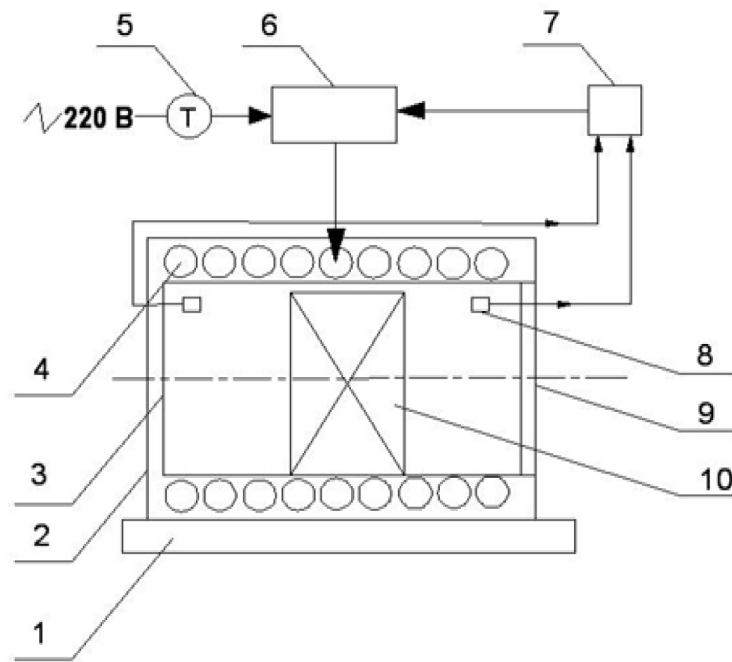
При отжиге, в процессе создания силоксановой связи при большом градиенте температур, поверхность покрывается глобулами малого размера, что делает её ещё более прочной, подобно кольчуге. Малый размер глобул обеспечит хорошую соосность и малое биение детали, что увеличит индуктивность изделия, а следовательно, увеличит и его добротность.

Прочность поверхности на прямую связана со структурным строением стекла, а именно с размером глобул. Чем меньше размер глобул, тем более прочная силоксановая поверхность. Наименьший размер глобул достигается экспериментальным подбором температуры отжига.

#### **Объекты исследования и методика эксперимента**

Объектами исследования стали полусферические резонаторы, имеющие диаметр 30 мм и толщину 2 мм. Технология образования силоксановой поверхности на изделии из кварцевого стекла КУ-1 включает в себя отжиг.

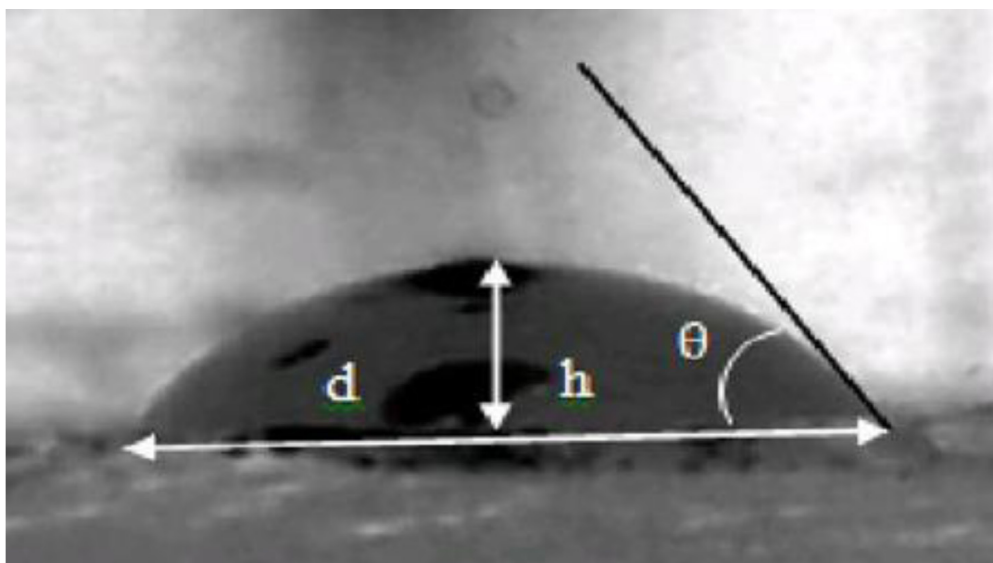
Операция отжига проходила в течение 11 часов: 3 часа разогрев, 5 часов на отжиг и 3 часа на отпуск для медленного снятия напряжений. Для того чтобы избежать растрескивания образцов при прокаливании, образцы помещали в печь и нагревали со скоростью 300 °С/ч до заданной температуры. Для автоматизации и контроля процесса отжига изделий была специально сконструирована печь (рис. 2) таким образом, чтобы градиент температур, охватывающий поверхность изделия, был равномерным со всех сторон. Это обеспечивалось обмоткой нагревательного элемента 4 и корпусом камеры 3, а также большим объёмом рабочего пространства печи по сравнению с габаритами изделия. Рабочая температура поддерживалась термодатчиками 6 и контролировалась термодатчиком 7 с помощью датчиков 8 под управлением персонального компьютера. Время отжига отслеживалось таймером 5. Печь располагалась на основании 1. Изделия 10 в количестве 5 штук загружались в корпус печи 2 через загрузочное окно 9.



**Рисунок 2.** Схема термической печи сопротивления для отжига изделий из кварцевого стекла: 1 – основание печи; 2 – корпус; 3 – камера нагрева; 4 – обмотка нагревательного элемента; 5 – таймер; 6 – терморегулятор; 7 – термопара; 8 – один из двух датчиков термопары; 9 – загрузочное окно; 10 – изделие

По принципу работы печь является печью косвенного действия, так как тепло выделяется в нагревательных элементах, равномерно охватывающих камеру нагрева. Тепло выделяется в соответствии с законом Джоуля – Ленца. Камера нагрева выложена огнеупорной футеровкой и теплоизоляцией, помещенной в металлический кожух. Ни один из отожженных резонаторов в процессе эксперимента не имел дефектов.

Для обработки результатов был применён метод лежачей капли [4]. На рисунке 3 приведена микрофотография капли, полученная при помощи компьютера и микроскопа МИИ-4М, оснащенного видеоокуляр, соединённых USB-шиной. Высоту капли  $h$  и диаметр  $d$  основания измеряли, определяя количество пикселей на полученных микрофотографиях при помощи программы TSview v7.3.1.7.



**Рисунок 3.** Микрофотография капли дистиллированной воды на кварцевом стекле (x 500)

На рисунке 4 изображён интерфейс программы «Метод лежащей капли» [5], а на рисунке 5 – окно ввода исходных данных.



Рисунок 4. Интерфейс программы «Метод лежащей капли»



Рисунок 5. Интерфейс окна ввода данных

На рисунке 6 представлены результаты расчёта.



Рисунок 6. Результаты расчётов при температуре 900 °С

Все расчётные параметры можно записать в электронном виде в виде файла.

### Результаты и их обсуждение

Проанализировав результаты расчётов, можно сделать вывод, что оптимальной тем-

пературой отжига стал диапазон температур 1050 – 1080 °С, что отражено в таблице 1.

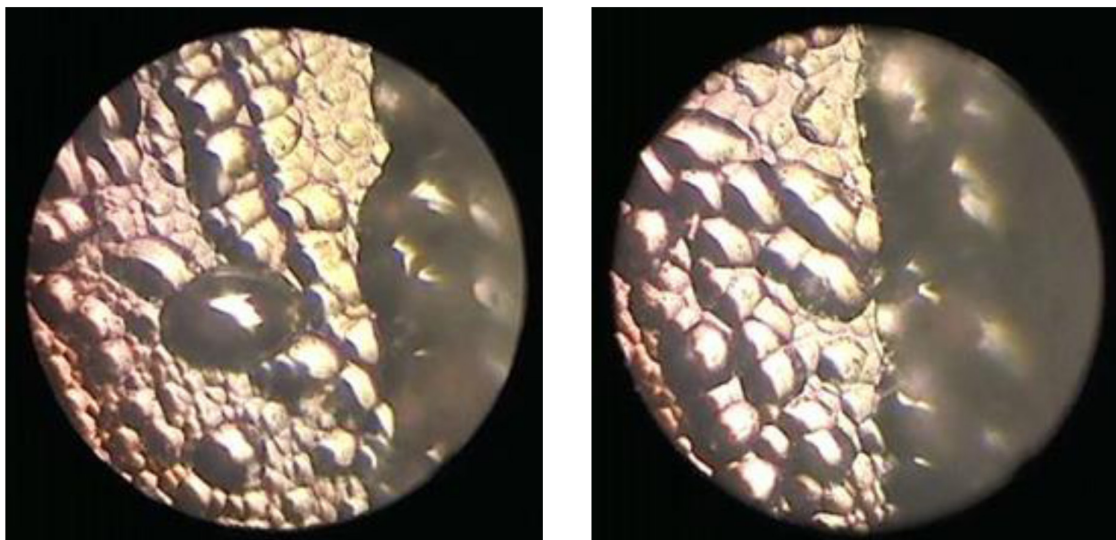
**Таблица 1.** Зависимость угла смачивания поверхности дистиллированной водой от температуры отжига образца кварцевого стекла

Температура отжига, °С	Угол смачивания, градусы
20	39,33
900	32,85
950	35,50
1000	32,32
1025	32,04
1050	31,85
1100	32,78
1125	32,33

Из таблицы видно, что при температуре отжига 1050 °С угол смачивания самый минимальный, а это указывает на то, что поверхность кварцевого стекла имеет максимальную прочность, так как тетраэдры, входящие в состав глобул, растягивают молекулы дистиллированной воды. Образцы высокодобротных механических резонаторов прошли термическую обработку в нашей лаборато-

рии и показали высокий коэффициент добротности.

Существенную роль играет влияние размера глобул на качество механической обработки поверхности кварцевого стекла. С уменьшением размера глобул «рваность» поверхности уменьшается (рис. 7), так как снятие слоя при механической обработке происходит с разрушением связей между ними [6].



**Рисунок 7.** Влияние размера глобул на качество механической обработки. Микроскоп оптический МИИ-4М (x 500)

Теоретическая прочность на разрыв рассчитывается по формуле [7]:

$$\sigma_{\text{теор}} = \sqrt{\frac{\gamma_s E}{a}}, \quad (2)$$

где  $\gamma_s$  – удельная поверхностная энергия;

$E$  – модуль упругости Юнга;  $a$  – расстояние между глобулами.

Нами были составлены компьютерные программы для вычисления радиуса зародыша и свободной энергии Гиббса, необхо-



димой для его формирования [8, 9] (рис. 8). Обе программы запатентованы.

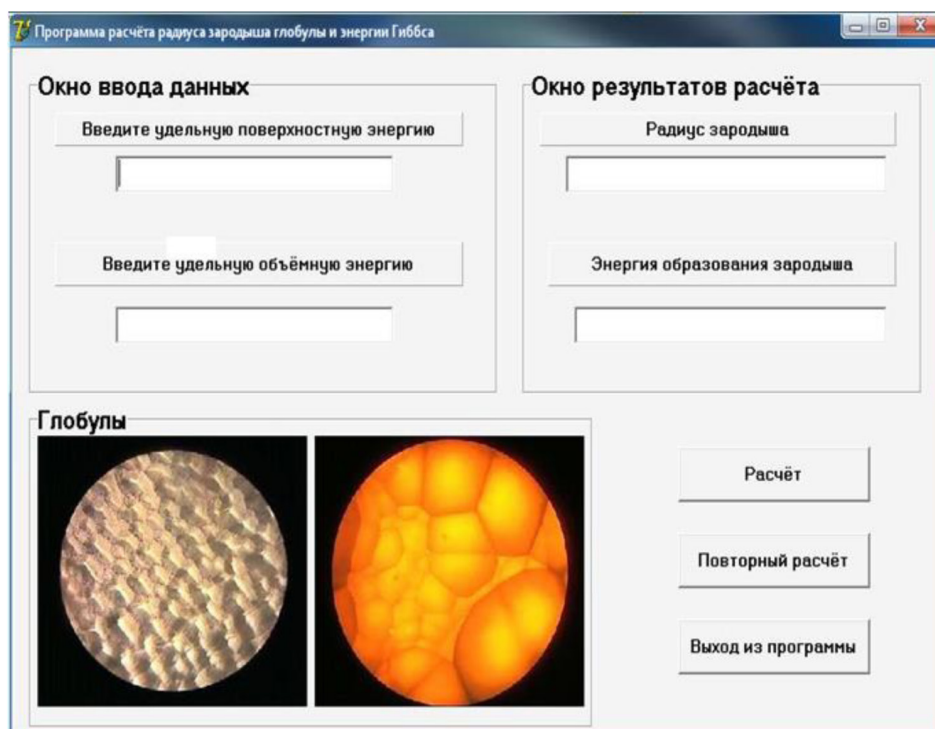


Рисунок 8. Интерфейс «Программы расчёта радиуса зародыша глобулы и энергии Гиббса»

Исходными данными для программы являются удельная поверхностная энергия  $\alpha$  и удельная объёмная энергия  $\gamma$ . Расчёт по формуле (2) для стёкол даёт значение  $\sigma = 8 \cdot 10^9$  Па, однако реальная прочность составляет  $\sigma = 8 \cdot 10^7$  Па [7]. Это связано с тем, что в твёрдом теле существуют микротрещины, которые концентрируют вокруг себя большие напряжения [7].

Одним из эффективных способов проверки качества поверхности является метод фрактальной геометрии, так как даёт хорошие результаты и не требует больших затрат, при этом качество поверхности будет характеризоваться одним числом [10]. Мы воспользовались способом предельной нагрузки. Значения микротвёрдости определяли по формуле [11]:

$$H_V = 1,854 \cdot \frac{P}{d^2}, \quad (3)$$

где  $P$  – нагрузка в г;  $d$  – длина диагонали отпечатка в мкм;  $H_V$  – значение микротвёрдости, кг·с/мм<sup>2</sup>.

Значение микротвёрдости для каждого образца определяли как среднее значение по 10 измерениям. Ошибку измерения длины

диагонали по методу разности двух диагоналей определяли по формуле [12]:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum(d - d_{cp})^2}{n - 1}}, \quad (4)$$

где  $d$  – длина диагонали отпечатка в мкм;  $d_{cp}$  – среднее значение длины диагонали по всем измерениям в мкм;  $n$  – количество измерений.

Полученные результаты метода предельной нагрузки стекла представлены в таблице 2.

Замеры нагрузки проводили по 10 раз для каждой температуры отжига. Среднее квадратическое отклонение составило 0,022. Средняя квадратическая ошибка выборки – 0,005. При доверительной вероятности 95 % коэффициент Стьюдента – 2,21.



**Таблица 2.** Зависимость микротвёрдости поверхности от температуры отжига стеклянного образца, определённой методом фрактальной геометрии

Температура отжига, °С	Микротвёрдость, кг·с/мм <sup>2</sup>
20	890
900	882
950	920
1000	968
1050	1023
1080	1077
1100	996

**Вывод**

Спроектированная нами автоматизированная установка (печь косвенного действия), использованная для отжига полусферических резонаторов, позволила существенно улучшить качество силиконовой поверхности изделий. Применение разработанных компьютерных программ дает возможность оценить физические параметры, характеризующие качество полученных образцов. Анализируя данные таблиц 1 и 2, можно заключить, что в результате математической обработки оптимальным является температурный диапазон отжига от 1050 до 1080 °С. Аналогичные результаты были получены при

определении твёрдости поверхности кварцевого стекла методом Виккерса с алмазным индентором [13].

В научной лаборатории ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет» были отожжены резонаторы, которые в заводских условиях увеличили коэффициент добротности от  $10 \cdot 10^6$  до  $22 \cdot 10^6$ , что отвечает техническим требованиям.

Работа была выполнена по техническому заданию компании «Медикон» (г. Миасс, Челябинская область).

**Список литературы**

1. Долапчи С.М., Денисова О.А. Глобулы и их внутреннее строение // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – Т. 13. - № 2. – С. 106 – 111.
2. Воронков М.Г. Силоксановая связь / М.Г. Воронков. – Новосибирск: Наука, 1976. – С. 413.
3. Быков В.Н., Анфилогов В.Н., Бобылев И.Б., Березикова О.А. Структура щелочно-силикатных стёкол по данным спектроскопии комбинационного рассеяния света // Расплавы. – 1990. - № 2. – С. 31 – 37.
4. Lyklema J., Rovillard S. and Coninck J. De. The Properties of the Stagnant Layer Unraveled // Langmuir. – 1998. – Vol. 14. - № 20. – P. 5659 – 5663.
5. Долапчи С.М., Брызгалов А.Н. Изучение структуры поверхности кварцевого стекла методом капли. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ. № 2016619827 от 31.08.2016 г.
6. Брызгалов А.Н., Долапчи С.М., Пихуля Д.Г., Живулин Д.Е., Зубов М.С. Структурные и фазовые переходы кварцевого КВ кремне-
7. Гриффитц Т. Прочность кварцевого стекла. – М.: Наука, 2008. – С. 127.
8. Долапчи С.М. Расчёт теоретической прочности кварцевого стекла. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ. № 2017661254 от 06.10.2017.
9. Долапчи С.М. Программа расчёта радиуса зародыша глобулы и энергии Гиббса. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ. № 2016613497 от 28.03.2016.
10. Сандитов Д.С., Мантатов В.В., Сандитов Б.Д. Коэффициент Пуассона и пластичность стёкол // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79. - № 4. – С. 150.
11. Владимирова Т.В., Горбань Н.Я., Маслов В.П., Мельник Т.С., Одарич В.А. Исследование оптических свойств и строения поверхностного слоя ситалла // ОМП. – 1979. - № 9. – С. 31 - 34.
12. Глазов В.М., Вигдорович В.Н. Микротвёрдость металлов. – М.: Металлургиздат, 1961. – С. 224.

13. Долопчи С.М., Денисова О.А. Кристаллы кварца, полученные гидротермальным методом, с заданными физическими свойствами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – Т. 13. - № 4. – С. 115 – 122.

### References

1. Dolapchi S.M., Denisova O.A. Globuly i ih vnutrenneje strojenije // Elektrotehnicheskije i informacionnyje komplekсы i sistemy. – 2017. – Т. 13. - № 2. – С. 106 – 111.

2. Voronkov M.G. Siloksanovaja svjaz'. – Novosibirsk: Nauka, 1976. – С. 413.

3. Bykov V.N., Anfilogov V.N., Bobylev I.B., Berezikova O.A. Struktura shelochno-silikatnyh stjokol po dannym spektroskopii kombinacionnogo rassejanija sveta // Rasplavy. – 1990. - № 2. – С. 31 – 37.

4. Lyklema J., Rovillard S. and Coninck J. De. The properties of the stagnant layer unraveled // Langmuir. – 1998. – Vol. 14. - № 20. – P. 5659 -5663.

5. Dolapchi S.M., Bryzgalov A.N. Izuchenije struktury poverhnosti kvartcevogo stekla metodom kapli. Svidetel'stvo o gos. reg. programmy dlja EVM. № 2016619827 ot 31.08.2016 g.

6. Bryzgalov A.N., Dolapchi S.M., Pihulja D.G., Zhivulin D.E., Zubov M.S. Strukturnyje i fazovyje perehody kvartcevogo KV kremnezjoma // Akademija jestestvoznanija,

zhurnal «Sovremennyje naukojomkie tehnologii». – 2016. - № 6. – Ch. 1. – S. 19.

7. Griffiths T. Prochnost' kvartcevogo stekla. – M.: Nauka, 2008. – S. 127.

8. Dolapchi S.M. Raschjot teoreticheskoj prochnosti kvartcevogo stekla. Svidetel'stvo o gos. reg. programmy dlja EVM. № 2017661254 ot 06.10.2017.

9. Dolapchi S.M. Programma raschjota radiusa zarodysha globuly i energii Gibbsa. Svidetel'stvo o gos. reg. programmy dlja EVM. № 2016613497 ot 28.03.2016.

10. Sanditov D.S., Mantatov V.V., Sanditov B.D. Koeffitient Puassona i plastichnost' stjokol // Zhurnal tehnichekoj fiziki. – 2009. – Т. 79. - № 4. – С. 150.

11. Vladimirova T.V., Gorban' N.Ja., Maslov V.P., Mel'nik T.S., Odarich V.A. Issledovanije opticheskikh svojstv i stroenija poverhnostnogo sloja sitalla // OMP. – 1979. - № 9. – С. 31 – 34.

12. Glazov V.M., Vigdorovich V.N. Mikrotverdost' metallov. – M.: Metallurgizdat, 1961. – С. 224.

13. Dolapchi S.M., Denisova O.A. Kristally kvartca, poluchennyje gidrotermal'nym metodom, s zadannymi fizichesкими svojstvami // Elektrotehnicheskije i informacionnyje komplekсы i sistemy. – 2017. – Т. 13. - № 4. – С. 115 – 122.



**Artyushenko V.M.**  
**Артюшенко В.М.**

*doc. sci. tech, professor,  
head of department «Information technology  
and control systems»,  
SBEI HE «Technological university»,  
Korolev MR,  
Russian Federation*



**Volovach V.I.**  
**Воловач В.И.**

*doc. sci. tech, assistant professor,  
head of department «Informational and  
electronic service department»,  
FSBEI HE «Volga region state university  
of service»,  
Togliatti,  
Russian Federation*

УДК 621.391.26:519.2

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-2-122-130

## **ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕКТОРНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПАРАМЕТРА СИГНАЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫХ НЕГАУССОВСКИХ ПОМЕХ**

В статье рассматривается оценка погрешности измерения параметров движения протяженных объектов при воздействии на обрабатываемый сигнал мультипликативных негауссовских помех.

Показано, что на полезный сигнал наряду с аддитивными помехами воздействуют также и мультипликативные помехи. При этом и аддитивные, и мультипликативные помехи могут иметь как гауссовскую, так и негауссовскую плотность распределения вероятности (ПРВ).

Для оценки информационных параметров сигнала используются метод максимума апостериорной ПРВ, а также нижние границы неравенства Рао-Крамера. Показано, что воздействие мультипликативной помехи на полезный сигнал в общем случае приводит к смещению оценки измеряемых параметров. Наиболее просто определить смещение, когда оно не зависит от оцениваемого параметра, что позволяет перейти к несмещенной оценке информационного параметра. Показано, что при известных параметрах распределения мультипликативной помехи можно определить вносимую ей величину смещения и перейти к несмещенной оценке.

Рассмотрена оценка точности измерения векторного информационного параметра обрабатываемого сигнала. При этом в качестве векторного информационного параметра рассмотрено изменение частоты, производной частоты и фазы полезного сигнала, которые несут информацию о параметрах движения лоцируемого объекта. Оценка точности измерения информационного параметра сигнала осуществлена при воздействии мультипликативных помех, имеющих как независимый, так и коррелированный характер.

Получены расчетные соотношения для оценки частоты, производной частоты и фазы полезного сигнала для различных условий осуществления оценки, в частности, при движе-

нии лоцируемого протяженного объекта с постоянной скоростью, при известной начальной фазе полезного сигнала, а также для неподвижного протяженного объекта.

Показано, что в общем случае мультипликативная помеха ведет к смещению оцениваемых информационных параметров полезного сигнала; причем чем больше величина смещения, тем точность измерения хуже. Доказано, что точность измерения параметров движения возрастает с увеличением отличия ПРВ оцениваемого параметра и воздействующей мультипликативной помехи от гауссовской. Показано, что погрешность измерения информационных параметров полезного сигнала может быть существенно уменьшена за счет учета Фишеровской дисперсионной информации (динформации) о модулирующей помехе.

**Ключевые слова:** плотность распределения вероятности, негауссовская помеха, мультипликативная помеха, помеха с независимыми значениями, коррелированная помеха.

## ESTIMATION OF MEASUREMENT ACCURACY OF THE VECTOR INFORMATION SIGNAL PARAMETER UNDER INFLUENCE MULTIPLICATIVE NON-GAUSSIAN NOISE

The article considers estimating the measurement error of motion parameters of extended objects when the processed signal is exposed to multiplicative non-Gaussian noise.

It is shown that, in practice, as a rule, the useful signal is influenced by both additive and multiplicative noise. In this case additive and multiplicative noise can have Gaussian as well as non-Gaussian density of probability distribution (PDF).

To estimate information parameters of the signal the method of maximum of posterior PDF and the lower bound of Cramer-Rao inequality are used. It is shown that the influence of multiplicative noise on the useful signal results in a bias of measured parameters estimator. It is easiest to determine a bias of an information parameter when it is not dependent on the estimated parameter. When distribution parameters of multiplicative noise are precisely known it is possible to determine the value of a bias made by this multiplicative noise and go to an unbiased estimate.

Estimating the accuracy of measurement of vector information parameter of the processed signal is considered. In this case, as a vector information parameter, the change in the frequency, derivative frequency and phase of the useful signal, which carry information about the parameters of the movement of the object being located, is considered. The estimation of the accuracy of an information parameter of the signal is carried out under the influence of multiplicative noise that has both independent and correlated nature.

The calculated ratios are obtained to estimate the frequency, its derivative and the phase of the processed signal under various conditions, for example, when a detected object moves with a constant velocity, when the initial phase of the signal is known, and when an extended object is motionless.

It is shown that in the General case the multiplicative noise leads to the displacement of the estimated information parameters of the useful signal; moreover, the greater the value of the displacement, the measurement accuracy is worse. It is proved that the accuracy of measurement of motion parameters increases with the increase in the difference between the PDF of the estimated parameter and the acting multiplicative noise from the Gaussian. It is shown that the measurement error of the information parameters of the useful signal can be significantly reduced by taking into account the Fisher dispersion information (information) about the modulating noise.

**Key words:** probability density function, non-Gaussian noise, multiplicative noise, noise with independent values, correlated noise.

**Introduction**

The issues of measurement (estimation) of signal parameters are very traditional and considered in detail in [1–3, etc.]. In the majority of research works devoted to the issues of estimation of signal parameters, it was thought that the useful signal is affected only by the additive noise, described, usually, by a Gaussian probability density function (PDF). However, as it is shown by the conducted research [4–6, etc.], a signal received by a measuring instrument is affected not only by additive but also by multiplicative noise [7–11, etc.]. This noise has a pronounced non-Gaussian character. For measuring devices it is rather important to estimate the impact of multiplicative noise on informational parameters of signal.

1. Estimation of measurement accuracy of the vector information parameter in multiplicative noise with independent values

Now we analyze the estimation of the vector information parameter  $\lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_m\}$  of the useful signal in multiplicative noise with independent values, using the method described in [12, 13].

As an example, we consider the case of measurement of  $\omega$ ,  $\dot{\omega}$  and  $\varphi$  signal

$$s(\vec{\lambda}, t_h) = U_{m,h} \sin[(\omega + 0,5\dot{\omega}t_h)t_h + \varphi], (1)$$

where  $\lambda_1 = \varphi$ ;  $\lambda_2 = \omega$ ;  $\lambda_3 = 0,5\dot{\omega}$ .

Note that in our case, when we estimate information parameters by the maximum of posterior PDF, there should be three equations:

$$\left. \frac{dW_y(\vec{\lambda})}{d\lambda_1} \right|_{\lambda_1=\hat{\lambda}_1} = 0; \quad \left. \frac{dW_y(\vec{\lambda})}{d\lambda_2} \right|_{\lambda_2=\hat{\lambda}_2} = 0; \\ \left. \frac{dW_y(\vec{\lambda})}{d\lambda_3} \right|_{\lambda_3=\hat{\lambda}_3} = 0.$$

The expression of lower bound of the Cramer-Rao inequality to estimate combined parameters of the useful signal by the maximum posterior PDF will have the form [14]:

$$\sigma_{\lambda_{ij}}^2 \geq |J_{ij}| / |J|; \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

where  $|J_{ij}|$  is the cofactor of the element  $J_{ij}$  of the Fisher information matrix  $\|J\|$ ;  $|J|$  is the determinant of the matrix  $\|J\|$ .

However, the elements of Fisher information matrix in general, taking into account the bias of estimated parameters  $b(\lambda_i) = \lambda_i + \Delta(\lambda_i)$ ,  $i = 1, \dots, m$  will be determined as:

$$J_{ij} = \left\{ \frac{db(\lambda_i)}{d\lambda_i} \times \frac{db(\lambda_j)}{d\lambda_j} \right\} \left\{ \sigma_{k,ij}^2 [I_V^\eta - 1] + I_{F,ij}^\lambda \right\}^{-1}, (3)$$

where

$$\sigma_{k,ij}^2 = \lim_{H \rightarrow \infty} H^{-1} \sum_{h=1}^H \left[ \frac{s'_{\lambda_i}(\vec{\lambda}, t_h) s'_{\lambda_j}(\vec{\lambda}, t_h)}{s^2(\vec{\lambda}, t_h)} \right],$$

$I_{F,ij}^\lambda$  is the component of Fisher information matrix relative to the estimated (measured) information parameters in the PDF of the measured parameters  $W_{\vec{\lambda}}(\vec{\lambda}), I_V^\eta = -m_1 \left\{ \eta_h^2 \frac{\partial^2}{\partial \eta_h^2} W_\eta(\eta) \right\}$ ,

is Fisher variance information [12], concluded relative to multiplicative noise in one-dimensional PDF  $W_\eta(\eta)$ .

Note that if the estimated parameters are not biased  $\Delta(\lambda_i) = 0$ , then (3) will be:

$$J_{ij} = \left\{ \sigma_{k,ij}^2 [I_V^\eta - 1] + I_{F,ij}^\lambda \right\}^{-1}. \quad (4)$$

If the information parameters  $\vec{\lambda}$  are estimated by the maximum likelihood method, then (4) can be written:

$$J_{ij} = \left\{ \sigma_{k,ij}^2 [I_V^\eta - 1] \right\}^{-1}.$$

Note that if the bias from multiplicative noise is known and does not depend on the estimated parameters, then, like when we estimate just one parameter, we can pass to unbiased estimates [1, 13]  $b(\lambda_i) - \Delta = \hat{\lambda}_i$ .

We assume that the useful signal  $s(\vec{\lambda}, t_h)$  is affected by multiplicative noise  $\eta(t_h)$  described by the Nakagami PDF [7]:

$$W(U) = (2/\Gamma(m))(m/\Omega)^m U^{2m-1} \cdot \exp\{-mU^2/\Omega\}, \quad U \geq 0,$$

where  $m = \Omega^2 / \langle (U^2 - \Omega^2)^2 \rangle \geq 0,5$ ,  $\Omega = \langle U^2 \rangle$

are distribution parameters,  $\Gamma(\cdot)$  is a gamma function.



Estimation of parameters is carried out on the observation interval  $[0, T]$ , the beginning and the end of which is accurately known and coincide with the moments of time corresponding to the beginning and end of the desired signal.

We assume that within the measurement interval, the estimated parameters remain unknown, and their value is equal to the values taken at the end of the measurement interval. The number of samples in the observation interval is large  $H \approx T/\Delta_h \gg 1$  (where  $\Delta_k = h - (h - 1)$  is the interval of taking the samples), in this case  $\omega T \gg 1$ .

Using the results of [15], after the necessary mathematical transformations we obtain an expression to define the elements of the Fisher information matrix:

$$J_{ij} = \left\{ \sigma_{k,ij}^2 4m (-1)^{i+j-2} T^{i+j-1} \cdot (i+j-1)^{-1} + I_{F,ij}^\lambda \right\}. \quad (5)$$

The Fisher information matrix would be:

$$\|J\| = \left\{ \sigma_{k,ij}^2 4m \begin{vmatrix} T & -0,5T^2 & \frac{1}{3}T^3 \\ -0,5T^2 & \frac{1}{3}T^3 & -0,25T^4 \\ \frac{1}{3}T^3 & -0,25T^4 & 0,2T^5 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} I_{F,11}^\lambda & I_{F,12}^\lambda & I_{F,13}^\lambda \\ I_{F,21}^\lambda & I_{F,22}^\lambda & I_{F,23}^\lambda \\ I_{F,31}^\lambda & I_{F,32}^\lambda & I_{F,33}^\lambda \end{vmatrix} \right\}.$$

If the estimation of the measured parameters is performed by the maximum likelihood method [12, 16], the correlation matrix of errors is simplified

$$\|J\| = \sigma_{k,ij}^2 4m \begin{vmatrix} T & -0,5T^2 & \frac{1}{3}T^3 \\ -0,5T^2 & \frac{1}{3}T^3 & -0,25T^4 \\ \frac{1}{3}T^3 & -0,25T^4 & 0,2T^5 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

The determinant of this matrix is:

$$|J| = (\sigma_{k,ij}^2 4m)^3 T^9 / 2160. \quad (7)$$

Substituting (5) and (6) into (2) taking into account the rules of operation with matrices, we obtain an expression for finding the lower bounds of Cramer-Rao inequality of the information parameters of the signal (1) in multiplicative noise, described by a one-dimensional Nakagami PDF.

Thus [13], for the estimate of the frequency

$$\sigma_{\hat{\omega},\eta}^2 \geq \left\{ \sigma_{k,22}^2 4m T^3 / 192 \right\}^{-1}; \quad (8a)$$

– for the derivative of the frequency

$$\sigma_{\hat{\omega},\eta}^2 \geq \left\{ \sigma_{k,33}^2 4m T^5 / 720 \right\}^{-1}; \quad (8b)$$

– for the phase

$$\sigma_{\hat{\varphi},\eta}^2 \geq \left\{ \sigma_{k,11}^2 4m T / 9 \right\}^{-1}. \quad (8c)$$

In the case, when the values  $\omega$ ,  $\dot{\omega}$  and  $\varphi$  are equal in the middle of the measurement interval, the expression (5) takes the form:

$$J_{ij} = \left\{ \sigma_{k,ij}^2 4m (-1)^{i+j-2} \cdot \left[ \frac{(0,5T)^{i+j-1} - (-0,5T)^{i+j-1}}{(i+j-1)} \right] + I_{F,ij}^\lambda \right\}.$$

When estimating the parameters by the maximum likelihood method, the Fisher information matrix  $\|J\|$  will be written

$$\|J\| = \sigma_{k,ij}^2 4m \begin{vmatrix} T & 0 & T^3/12 \\ 0 & T^3/12 & 0 \\ T^3/12 & 0 & T^5/80 \end{vmatrix}.$$

Then  $|J|$  is determined from (7) and in this case [10]:

$$\sigma_{\hat{\omega},\eta}^2 \geq \left\{ \sigma_{k,22}^2 4m T^3 / 12 \right\}^{-1}; \quad (9a)$$

$$\sigma_{\hat{\omega},\eta}^2 \geq \left\{ \sigma_{k,33}^2 4m T^5 / 720 \right\}^{-1}; \quad (9b)$$

$$\sigma_{\hat{\varphi},\eta}^2 \geq \left\{ \sigma_{k,11}^2 4m / 9 \right\}^{-1}. \quad (9c)$$

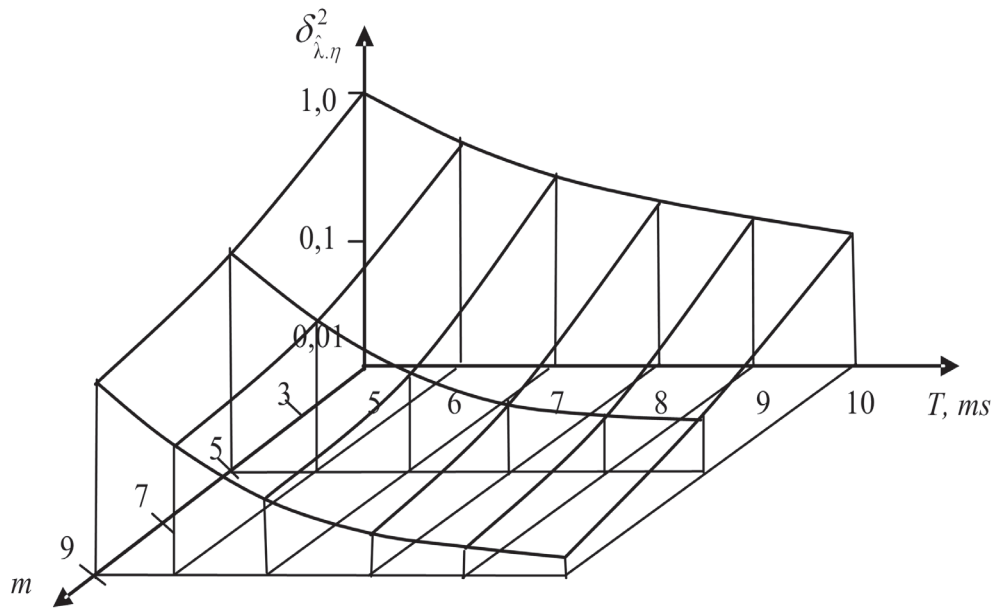
Comparing (8) and (9), we see that, like when estimating information parameters of the signal in additive non-Gaussian noise with independent values [13], due to the fact that, with the exception of  $J_{13}$  and  $J_{31}$  non-diagonal elements equal to zero, the variance of the estimates  $\omega$

and  $\varphi$  is much smaller, if the measurement reference is carried out in the middle of the observation interval. It completely coincides with the results obtained before [14, 17].

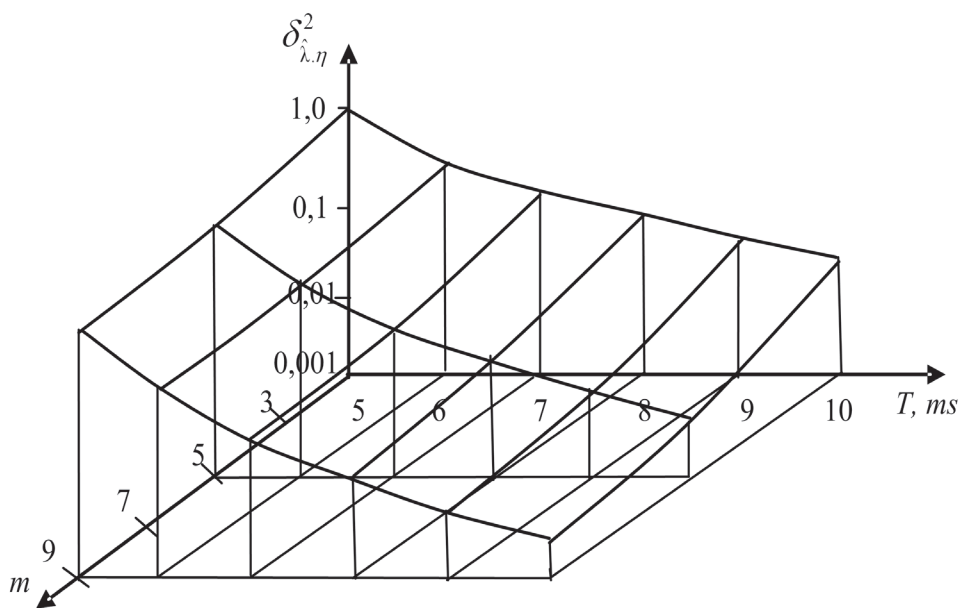
Fig. 1 shows the dependencies  $\delta_{\hat{\lambda},\eta}^2 = f(T, m)$  (where:  $a - \hat{\lambda} = \hat{\omega}$ ;  $b - \hat{\lambda} = \hat{\dot{\omega}}$ ;  $c - \hat{\lambda} = \hat{\varphi}$ ) of the given errors  $\delta_{\hat{\lambda},\eta}^2 = \sigma_{\hat{\lambda},\eta}^2 / \sigma_{\hat{\lambda},m-1}^2$  of measurement  $\hat{\lambda} = \omega, \dot{\omega}, \varphi$  of the processed signal under the

influence of multiplicative noise, described by a one-dimensional Nakagami PDF for different values of distribution parameter  $m$  and the measurement interval  $T$ .

From the expressions (8) and presented graphs it is seen that with increasing  $m$  and  $T$  the reduced error decreases. Therefore, accuracy of estimation of the information parameters  $\omega, \dot{\omega}, \varphi$ , characterizing the parameters of movement of detected objects, increases.



a)



b)

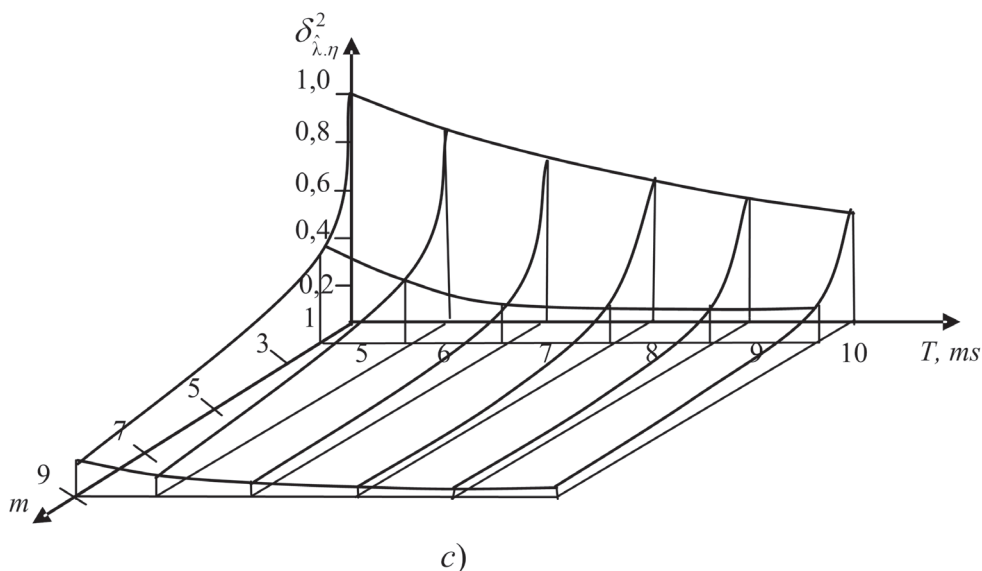


Fig. 1. Dependence of the reduced variance estimation of the signal information parameters  $\delta_{\lambda, \eta}^2$  on the values  $m$  and  $T$

(where:  $a - \hat{\lambda} = \hat{\omega}$ ;  $b - \hat{\lambda} = \hat{\omega}$ ;  $c - \hat{\lambda} = \hat{\phi}$ )

**2. Estimation of measurement accuracy of the information parameters on the background of correlated multiplicative noise**

Let us analyze estimation of the information parameter in correlated multiplicative noise. To simplify the calculations, but still preserving the obtained results we assume that estimation is unbiased. We assume that at the input of measuring instrument we have a multiplicative mixture of the type  $y_h = \eta_h s(\lambda, t_h)$  of the useful signal  $s(\lambda, t_h)$  carrying the information about one of the parameters of useful signal and multiplicative non-Gaussian noise  $\eta_h$ .

We also assume that noise is described by the transition PDF  $W_\eta(\eta_h | \eta_{h-1})$ . Measuring (estimating) the information parameter in the interval  $[0, T]$  is carried out in discrete time, and  $\lambda = \lambda_h = \lambda_{h-1}$ . The logarithm of the likelihood function exists and is determined by:

$$B_\eta(\eta) = \ln W_\eta \left\{ y(t_h) / s(\hat{\lambda}, t_h) \middle| y(t_{h-1}) / s(\hat{\lambda}, t_{h-1}) \right\} \left| s^{-1}(\hat{\lambda}, t_h) \right|,$$

where  $\frac{y(t_{h-i})}{s(\hat{\lambda}, t_{h-i})} = \eta_{h-i}$ ;  $i = 0, 1$ ,  $W_\eta\{\cdot\}$  is the PDF of non-Gaussian multiplicative noise

with independent values.

We believe that the likelihood function meets the conditions of regularity:

$$\left\langle \frac{d}{d\lambda} B_\eta(\eta) \right\rangle = 0;$$

$$\left\langle \frac{d}{d\lambda} B_\eta(\eta) \right\rangle = \left\langle \left[ \frac{d}{d\lambda} B_\eta(\eta) \right]^2 \right\rangle.$$

Using the method described by derivating a posteriori error of measurement of information parameters in additive non-Gaussian correlated noise [18], omitting the cumbersome mathematical calculations, we write:

$$\tilde{B}_\lambda^{n''} = \text{tr}[\text{IP}] = \sum_{\alpha=1}^2 \sum_{\beta=1}^2 I_{\alpha\beta} P_{\alpha\beta};$$

$$\alpha, \beta = 1, 2; \tag{10}$$

where  $I_{\alpha\beta}$  are the components of the information matrix and its elements are equal:

$$\text{when } \alpha = \beta: I_{11} = I_{22} = \left[ I_{V, \alpha\beta}^\eta - 1 \right];$$

$$\text{when } \alpha \neq \beta: I_{12} = I_{21} = I_{V, \alpha\beta}^\eta; \alpha, \beta = 1, 2.$$

Here  $I_{V, \alpha\beta}^\eta$  are the components of the Fisher information matrix relative to the multiplicative noise, in transition PDF  $W_\eta(\eta_h | \eta_{h-1})$ ;  $P_{ij}$  are the elements of the matrix  $\|\text{P}\|$ :

$$\text{when } \alpha = \beta: P_{\alpha\beta} = \sigma_{k,i}^2 = \tilde{K}_i^2 = H^{-1}.$$

$$\sum_{i=1}^H \left[ s'_\lambda(\hat{\lambda}_{h-i}) s^{-1}(\hat{\lambda}_{h-i}) \right]^2;$$

when  $\alpha \neq \beta$ :

$$P_{\alpha\beta} = \sigma_{k,i}^2 = R_k = \tilde{K}_i \tilde{K}_j = \sum_{i=1}^H \cdot s'_\lambda(\hat{\lambda}_h) s^{-1}(\hat{\lambda}_h) s'_\lambda(\hat{\lambda}_{h-1}) s^{-1}(\hat{\lambda}_{h-1}).$$

When estimation is carried out by the maximum likelihood:

$$\sigma_{\lambda,c,\eta}^2 \geq [\text{tr}[\text{IP}]]^{-1}.$$

Since [7]

$$I_{F.nc} \{W_l(\Pi_h) \leq I_{F.c} \{W_l(\Pi_h | \Pi_{h-1}),$$

where  $I_{F.nc}$  and  $I_{F.c}$  is, respectively, the amount of Fisher information in a one-dimensional PDF  $W_l(\Pi_h)$  and transition  $W_l(\Pi_h | \Pi_{h-1})$  PDF of noise, then it can be shown, that

$$\left| \tilde{B}_{\lambda,c}^{\pi''} \right| > \left| \tilde{B}_{\lambda.nc}^{\pi''} \right|.$$

Here  $\tilde{B}_{\lambda,c}^{\pi''}$  and  $\tilde{B}_{\lambda.nc}^{\pi''}$  are, respectively the second derivatives of the LLF in the information parameter under the influence of correlated multiplicative noise and noise with independent values.

Then, taking into account (10) it can be written:

$$\sigma_{\lambda,c,\eta}^2 < \sigma_{\lambda,\eta}^2. \quad (11)$$

As can be seen from (11), taking into account the correlations of multiplicative noise a posteriori error of the measurement of the information parameters is reduced, which leads to an increase in accuracy of their estimation, which coincides with the results of the works [8].

### Список литературы

1. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации: учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1992. – 304 с.
2. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации. – М.: Радио и связь. 1983. – 536 с.
3. Radar handbook / Ed. by M. I. Skolnik. 2nd ed. – New York: McGraw-Hill, 1990. – 1199 p.
4. Kassam S.A. Signal Detection in Non-Gaussian Noise. – New York: Springer Verlag, 1989. – 242 p.
5. Lu N.H. Eisenstein Bruce A. Detection of weak signals in non-Gaussian noise // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – Nov. 1981. – Vol. 27. – No. 6. – P. 755–771.
6. Теория обнаружения сигналов / П.С. Акимов, П.А. Бакут, В.А. Богданович и др.; Под ред. П.А. Бакута. – М.: Радио и связь, 1984. – 440 с.
7. Тихонов В.И. Кульман Н.К. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный приём сигналов. – М.: Сов. радио, 1975. – 704 с.
8. Кремер И.Я., Владимиров В.И., Карпунин В.И. Модулирующие (мультипликативные) помехи и прием радиосигналов / Под ред. И.Я. Кремера. – М.: Сов. радио. 1972. – 480 с.

It is it can be seen that by applying the same procedure for the case of simultaneous estimation of several information parameters in correlated multiplicative noise, we come to the same conclusion that in the presence of a channel of multiplicative noise estimation in a radar measuring device accounting for correlation of modulation noise allows us to increase potential accuracy of measured parameters.

### Conclusion

Thus, estimating the accuracy of measurement of vector information parameters of the processed signal is considered. A change of frequency, its derivative and the phase of the useful signal are considered as a vector parameter. The estimation of the accuracy of an information parameter of the signal is carried out under the influence of multiplicative noise that has both independent and correlated nature.

The calculated ratios are obtained to estimate the frequency, its derivative and the phase of the processed signal under various conditions.

It is shown that in general, multiplicative noise leads to a bias of estimated information parameters of the useful signal; and the bigger is the bias, the worse is the measurement accuracy. It is proved that the measurement accuracy of useful parameters can be significantly improved if the PDF of both information parameters and multiplicative noise affecting them is taken into account. Moreover, the more the PDF of an estimated parameter and multiplicative noise is different from Gaussian, the measurement accuracy will be higher.

9. Васильев К.К. Прием сигналов при мультипликативных помехах. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1983. – 128 с.

10. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Квазиоптимальная обработка сигналов на фоне аддитивной и мультипликативной негауссовских помех // Радиотехника. – 2016. – № 1. – С. 124–130.

11. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Квазиоптимальная дискретная демодуляция сигналов на фоне коррелированных негауссовских флуктуационных мультипликативных помех // Радиотехника. – 2016. – № 6. – С. 106–112.

12. Новоселов О.Н., Фомин А.Ф. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1991. – 336 с.

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

14. Тихонов В.И. Нелинейные преобразования случайных процессов. М.: Радио и связь, 1986. – 296 с.

15. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Идентификация параметров распределения аддитивных и мультипликативных негауссовских помех // Автометрия. – 2017. – Т. 53. – № 3. – С. 36–43. – DOI: 10.15372/AUT20170305

16. Валеев В.Г. Оптимальная оценка параметров сигнала при наличии негауссовских помех // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1974. – № 2. – С. 135–146.

17. Tuzlukov V.P. Signal Processing Noise. – Boca Raton, London, New York, Washington D.C.: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2002. – 635 p.

18. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Измерение информационных параметров сигнала в условиях воздействия аддитивных негауссовских коррелированных помех // Автометрия. – 2016. – Т. 52. – № 6. – С. 22–28. – DOI: 10.15372/AUT20160603

## References

1. Sosulin Ju.G. Teoreticheskie osnovy radiolokacii i radionavigacii: ucheb. posobie dlja vuzov. – M.: Radio i svjaz', 1992. – 304 s.

2. Finkel'shtejn M.I. Osnovy radiolokacii. – M.: Radio i svjaz'. 1983. – 536 s.

3. Radar handbook / Ed. by M. I. Skolnik. 2nd ed. – New York: McGraw-Hill, 1990. – 1199 p.

4. Kassam S.A. Signal Detection in Non-Gaussian Noise. – New York: Springer Verlag, 1989. – 242 p.

5. Lu N.H. Eisenstein Bruce A. Detection of weak signals in non-Gaussian noise // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – Nov. 1981. – Vol. 27. – No. 6. – P. 755–771.

6. Teorija obnaruzhenija signalov / P.S. Akimov, P.A. Bakut, V.A. Bogdanovich i dr.; Pod red. P.A. Bakuta. – M.: Radio i svjaz', 1984. – 440 s.

7. Tihonov V.I., Kul'man N.K. Nelinejnaja fil'tracija i kvazikogerentny'j prijom signalov. – M.: Sov. radio, 1975. – 704 s.

8. Kremer I.Ya., Vladimirov V.I., Karpuhin V.I. Modulirujushchije (mul'tiplikativnye) pomehi i prijom radiosignalov. – M.: Sov. radio. 1972. – 480 s.

9. Vasil'jev K.K. Prijom signalov pri mul'tiplikativnyh pomexah. – Saratov: Izd-vo Saratovskogo un-ta. 1983. – 128 s.

10. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Kvazioptimal'naja obrabotka signalov na fone additivnoj i mul'tiplikativnoj negaussovskih pomex // Radiotekhnika. – 2016. – № 1. – S. 124–130.

11. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Kvazioptimal'naja diskretnaja demoduljacija signalov na fone korrelirovannyh negaussovskih fljuktucionnyh mul'tiplikativnyh pomex // Radiotekhnika. – 2016. – № 6. – S. 106–112.

12. Novosjolov O.N., Fomin A.F. Osnovy teorii i raschjota informacionno-izmeritel'nyh sistem / 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostrojenije, 1991. – 336 s.

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



14. Tihonov V.I. Nelinejnyje preobrazovanija sluchajnyh processov. M.: Radio i svjaz', 1986. – 296 s.

15. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Identifikacija parametrov raspredelenija additivnyh i mul'tiplikativnyh negaussovskih pomeh // Avtometrija. – 2017. – T. 53. – № 3. – S. 36–43. – DOI: 10.15372/AUT20170305

16. Valejev V.G. Optimal'naja ocenka parametrov signala pri nalichii negaussovskih pomeh // Izv. AN SSSR. Texnicheskaya kibernetika. – 1974. – № 2. – S. 135–146.

17. Tuzlukov V.P. Signal Processing Noise. – Boca Raton, London, New York, Washington D.C.: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2002. – 635 p.

18. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Izmerenije informacionnyh parametrov signala v uslovijah vozdeystvija additivnyh negaussovskih korrelirovannyh pomeh // Avtometriya. – 2016. – T. 52. – № 6. – S. 22–28. – DOI: 10.15372/AUT20160603



**Сироткин С.Л.**  
**Sirotkin S.L.**

*кандидат технических наук,  
ведущий инженер-конструктор  
Научно-конструкторского бюро  
моделирующих и управляющих систем,  
Южный федеральный университет,  
г. Таганрог,  
Российская Федерация*



**Коньков А.Н.**  
**Konkov A.N.**

*начальник сектора  
Научно-конструкторского бюро  
моделирующих и управляющих систем,  
Южный федеральный университет,  
г. Таганрог,  
Российская Федерация*

УДК 681.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-2-131-136

## **АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ДИАПАЗОНОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ ИМПУЛЬСОВ**

В данной статье рассматриваются способы повышения точности преобразования средней частоты импульсов в код с помощью введения автоматического переключения диапазонов. Описываются преобразователи частоты в код, построенные на основе использования реверсивного счетчика и линии задержки. Преобразуемая частота поступает на суммирующий вход реверсивного счетчика, и она же, пройдя линию задержки, поступает на вычитающий вход реверсивного счетчика. Таким образом, реверсивный счетчик непрерывно отслеживает среднее значение частоты. Повышение точности преобразования достигается за счет разбиения диапазона изменения входной частоты на поддиапазоны. Рассматриваются предложенные способы автоматического переключения диапазонов, основанные на цифровом способе и на использовании аналоговых компараторов.

На описанные методы повышения точности преобразования получены авторские свидетельства СССР. Описанные методы автоматического переключения диапазонов построены на основе использования дискретных линий задержки (регистров сдвига) с большим числом разрядов. Реализация линий задержки с большим числом разрядов предлагается на основе использования программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Рекомендуется к использованию в системах управления и обработки информации.

**Ключевые слова:** реверсивный счетчик, средняя частота импульсов, дискретная линия задержки, диапазон преобразования, точность преобразования, регистр сдвига, аналоговый компаратор.

## **AUTOMATIC RANG SWITCHING WHEN MEASURING THE AVERAGE FREQUENCY OF THE PULSES**

This article discusses ways to improve the accuracy of the formation of the average pulse frequency in the code by introducing automatic switching ranges. Frequency-to-code converters based on the use of a reversible counter and a delay line are described. The converted frequency is supplied to summing input reversible-intense counter and she, after passing the delay line, is fed to



суммирующий и вычитающий входы реверсивного счетчика. На суммирующий вход реверсивного счетчика импульсы начинают поступать сразу после подачи входной частоты, а на вычитающий вход – спустя время, определяемое элементом задержки. Первым импульсом с выхода третьего синхронизатора устанавливается в единичное состояние триггер, нулевой потенциал с инверсного выхода которого открывает элемент И1, а сигналом с прямого выхода открывается элемент И2. За время, прошедшее между появлением первых импульсов на суммирующем и вычитающем входах реверсивного счетчика, в счетчике накопится число, прямо пропорциональное значению входной частоты. При неизменной входной частоте на шине «Частота» код в реверсивном счетчике будет также неизменным с точностью до младшего разряда. Это объясняется поочередным поступлением импульсов на вычитающий и суммирующий входы реверсивного счетчика. При изменении входной частоты пропорционально изменится содержимое реверсивного счетчика за счет инерционности управляемого элемента задержки. Начальное значение задержки определяется частотой импульсов, поступающих с выхода делителя частоты. При этом коэффициент деления определяется кодом, хранимым в регистре сдвига. Указанное справедливо при отсутствии переполнения реверсивного счетчика и при наличии хотя бы одного из  $m$  старших установленного в единицу разряда реверсивного счетчика, т.е. первая значащая цифра отлична от нуля. При переполнении реверсивного счетчика на его выходе появляется сигнал, который через элемент ИЛИ сбрасывает триггер и сдвигает содержимое регистра сдвига на  $m$  разрядов вправо (в сторону младших разрядов). При этом коэффициент деления делителя частоты уменьшается в  $K=2^m$  раз, а частота импульсов на управляющем входе элемента задержки увеличивается в  $K$  раз. Преобразователь продолжает работать так, как после подачи сигнала «Сброс». Такой итерационный процесс продолжается до тех пор, пока старший разряд не станет равным нулю. При этом сигнал «Готовность» еще не появляется. Если в

результате счета импульсов входной частоты первые значащие ( $m$  разряды) равны нулю, то срабатывает элемент И2, анализирующий равенство нулю  $m$  разрядов реверсивного счетчика. Через элемент ИЛИ сбрасывается триггер, реверсивный счетчик, обнуляется цифровая линия задержки и производится сдвиг содержимого регистра на  $m$  разрядов (в сторону старших разрядов). При этом коэффициент деления делителя частоты увеличивается в  $K$  раз, частота импульсов на управляющем входе линии задержки уменьшается в  $K$  раз, следовательно, в  $K$  раз увеличивается величина задержки.

Такой процесс продолжается до тех пор, пока первая значащая цифра не станет отличной от нуля.

Мантисса кода снимается с шины «мантисса», а код порядка – с выхода шифратора в виде дополнительного двоичного кода. Сигналом об окончании преобразования и возможности считывания кода является сигнал «Готовность» на шине «Готовность», который выдается после окончания всех переходных процессов в преобразователе по импульсу с третьего выхода распределителя импульсов при наличии на первом входе элемента И2 единичного сигнала с выхода триггера.

Для обеспечения заданной точности преобразования частота импульсов на выходах распределителя импульсов равна:

$$f \geq 2 \cdot F_{\text{макс}},$$

где  $F_{\text{макс}}$  – максимальное значение входной частоты на выходной шине.

Разрядность управляемого элемента задержки определяется выражением:

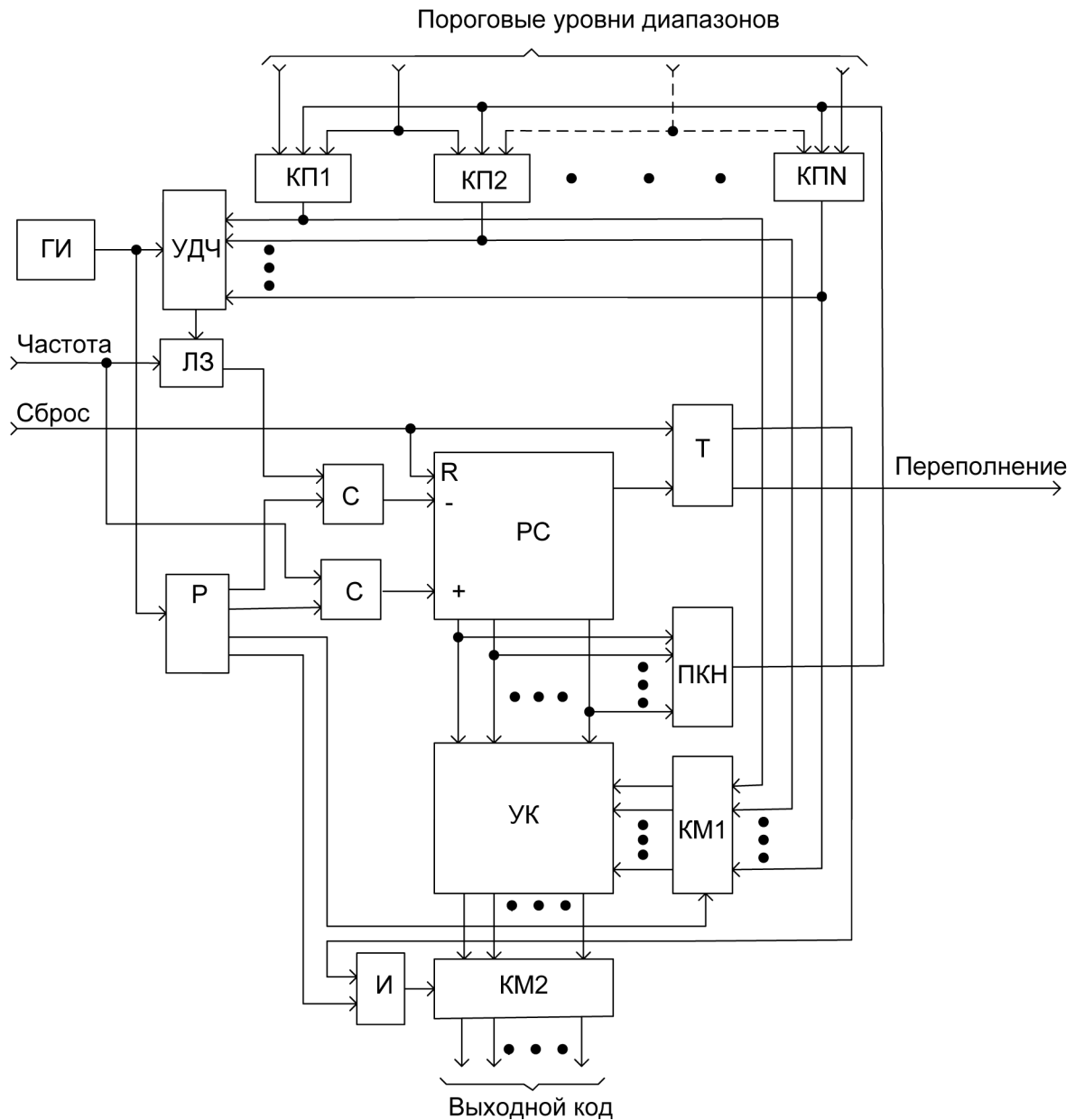
$$L_p = (2^n - 1) \cdot F_r / 2 \cdot F_{\text{макс}} - 1,$$

где  $n$  – разрядность мантиссы входного кода, бит;

$P$  – разрядность порядка выходного кода, бит;

$F_r$  – частота импульсов генератора, Гц.

В [5] предложен преобразователь частоты импульсов в код с автоматическим переключением диапазонов преобразования на базе использования аналоговых компараторов. Структура такого преобразователя представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Структура устройства измерения частоты импульсов с автоматическим переключением диапазонов с аналоговым определением зон измерения

Преобразователь работает следующим образом.

В начальный момент времени по сигналу «Сброс» по шине «Сброс» устанавливается в нулевое состояние триггер переполнения и обнуляется реверсивный счетчик, причем длительность сброса должна быть не меньше времени задержки в линии задержки для ее полной очистки. После снятия сигнала «Сброс» начинается преобразование частоты импульсов в код.

Входная последовательность импульсов с шины «Частота» через первый синхронизатор поступает на суммирующий вход реверсивного счетчика, который начинает сумми-

ровать входные импульсы. Так как первоначально на выходе реверсивного счетчика стоит нулевой код и, следовательно, на выходе преобразователя «код – нулевое напряжение», то это напряжение попадает в зону первого компаратора, определяющего первый диапазон преобразования. У этого компаратора нижний порог равен нулевому напряжению, а верхний является нижним порогом для следующего компаратора, определяющего второй диапазон преобразования. Сигнал с выхода первого компаратора включает первый коэффициент умножения на умножителе кода на один из  $N$  коэффициентов и поступает на первый управляющий



вход управляемого делителя частот, который формирует минимальную тактовую частоту, что обеспечивает максимальное время задержки в линии задержки. Таким образом, в начальный момент времени автоматически устанавливается нижний диапазон преобразования в код самой низкой частоты.

Через время задержки на линии задержки входные импульсы через второй синхронизатор начинают поступать на вычитающий вход реверсивного счетчика, и на нем складывается и вычитается одинаковое число импульсов, показания реверсивного счетчика перестают изменяться и соответствуют значению входной частоты.

Одновременно с поступлением входных импульсов начинает возрастать напряжение на выходе преобразователя «код – напряжение», т.к. возрастает код на выходе реверсивного счетчика. Если через время задержки напряжение на выходе преобразователя «код – напряжение» не превышает первого порогового уровня, то преобразователь работает в самом нижнем диапазоне, когда входная частота наименьшая.

Если же входная частота возрастает или же сразу через время задержки код на выходе реверсивного счетчика превышает значение нижнего предела преобразования, то напряжение на выходе преобразователя «код – напряжение» попадает в зону второго компаратора, и происходит переключение преобразователя на второй диапазон преобразования, т.е. управляемый делитель частоты вырабатывает вторую по величине тактовую частоту для линии задержки, величина задержки которой уменьшается на один шаг, при этом выходной код реверсивного счетчика умножается на второй коэффициент.

Если напряжение на выходе преобразователя «код – напряжение» попадает в зону третьего компаратора, то автоматически устанавливается третий диапазон преобразования,

и выходной код реверсивного счетчика умножается на третий коэффициент умножения и т.д.

При превышении входной частотой максимально допустимого значения происходит переполнение реверсивного счетчика, и сигнал с его выхода переполнения устанавливает триггер переполнения в единичное состояние, сигнал с выхода триггера переполнения поступает на шину «переполнение» и сигнализирует о том, что входная частота превышает максимальное значение, и одновременно с этим сигнал с выхода триггера переполнения закрывает элемент И1 для того, чтобы запретить в этом случае считывание информации с преобразователя.

Таким образом, при наличии сигнала на шине переполнения преобразователь не функционирует, и для его пуска необходимо снова осуществить «Сброс» описанным способом. Распределитель импульсов с помощью двух синхронизаторов и двух коммутаторов осуществляет разнесение во времени импульсов, поступающих на счетные входы реверсивного счетчика, моментов умножения выходного кода на один из коэффициентов и моментов считывания выходного кода.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Предложены преобразователи частоты импульсов в код с автоматическим переключением диапазонов, позволяющие разными способами повысить точность преобразования и расширить диапазон преобразования при сохранении непрерывности преобразования частоты в код.

2. Описанные способы автоматического переключения диапазонов можно использовать во всех известных преобразователях, построенных на основе линии задержки и реверсивного счетчика [1].

3. Можно использовать в измерительных системах, в системах обработки сигналов от частотных датчиков.

3. Сироткин С.Л., Коньков А.Н. Методы непрерывной обработки информации от частотных датчиков // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – № 3. – С. 90-97.

4. Авторское свидетельство СССР № 1305857, МПК Н03К 1/60 Преобразователь

### Список литературы

1. Авторское свидетельство СССР № 161417, МПК Н03К 13/20 Способ измерения частоты / С.С. Бруфман. – БИ № 7. – 1984.

2. Новицкий П.В., Кнорринг Е.Г., Гутников В.С. Цифровые приборы с частотными датчиками. – Л.: Энергия, 1970. – 230 с.

частоты в код / С.Л. Сироткин, А.Н. Коньков, Ю.А. Куликов, В.В. Клименко. – БИ № 15. – 1987.

5. Авторское свидетельство СССР № 1515368, МПК Н03М 1/60, 1/64 Преобразователь частота – код А.Н. / Коньков, С.Л. Сироткин, А.В. Бойченко, В.В. Клименко. – БИ № 38. – 1989.

### References

1. Avtorskoje svidetel`stvo SSSR № 161417. MPK N03K 13/20 Sposob izmerenija chastoty / S.S. Brufman. – БИ № 7. – 1984.

2. Novitskiy P.V., Knorring E.G. Gutnikov V.S. Cifrovye pribory s chastotnymi datchikami. – L.: Energija. 1970. – 230 s.

3. Sirotkin S.L., Konkov A.N. Metody nepreryvnoj obrabotki informacii ot chastotnyh datchikov // Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyje kompleksy i sistemy. – 2014. – № 3. – S. 90-97.

4. Avtorskoje svidetel`stvo SSSR № 1305857. MPK N03K 1/60 Preobrazovatel` chastoty v kod / S.L. Sirotkin. A.N. Konkov. Yu.A. Kulikov. V.V. Klimenko. – БИ № 15. – 1987.

5. Avtorskoje svidetel`stvo SSSR № 1515368. MPK N03M 1/60. 1/64 Preobrazovatel` chastota – kod A.N. / Konkov. S.L. Sirotkin. A.V. Bojchenko. V.V. Klimenko. – БИ № 38. – 1989.

---

## ОБ АВТОРАХ

### **Артюшенко Владимир Михайлович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и управляющие системы», Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет», e-mail: artuschenko@mail.ru, г. Королев, Российская Федерация

### **Ахунова Диля Азатовна**

аспирант кафедры телекоммуникационных систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: d.akhunova@bk.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Бондаренко Александр Михайлович**

заместитель главного энергетика АО «СУЭК-Кузбасс», e-mail: reshetniak@inbox.ru, г. Ленинск-Кузнецкий, Российская Федерация

### **Васильев Богдан Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетики и электромеханики», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», e-mail: levantungdkt@gmail.com, г. Санкт – Петербург, Российская Федерация

### **Васильев Петр Игоревич**

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: aleksandputince@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Воловач Владимир Иванович**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет сервиса», e-mail: ssunrise@mail.ru, г. Тольятти, Российская Федерация

### **Гиниятуллин Вахит Мансурович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: fentazer@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Грахова Елизавета Павловна**

кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: eorlingsbest@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Губатюк Руслан Сергеевич**

младший научный сотрудник лаборатории электротермии отдела физико-металлургических процессов сварки и электротермии высокопрочных сталей, Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина

### **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

**Дмитриев Алексей Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт, строительные и дорожные машины», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», e-mail: alextmn86@mail.ru, г. Тюмень, Российская Федерация

**Долапчи Сергей Михайлович**

преподаватель кафедры «Физика», Частное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский институт управления и экономики», e-mail: denisovaolga@bk.ru, г. Коркино, Российская Федерация

**Зайцева Алина Александровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: jenekap41@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Клименко Ольга Витальевна**

студент кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: jenekap41@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Коньков Александр Николаевич**

начальник сектора Научно-конструкторского бюро моделирующих и управляющих систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», e-mail: ssirotkin1950@mail.ru, г. Таганрог, Российская Федерация

**Кривоногов Сергей Вячеславович**

старший преподаватель кафедры «Информационные системы и технологии», Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», e-mail: ksvkn@mail.ru, г. Княгинино, 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, профессор кафедры «Автоматизированные системы управления», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», e-mail: s\_kubrin@mail.ru, г. Москва, Российская Федерация

**Ле Ван Тунг**

аспирант кафедры «Электроэнергетики и электромеханики», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», e-mail: levantungdktd@gmail.com, г. Санкт – Петербург, Российская Федерация

**Лихачев Евгений Александрович**

старший преподаватель кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский

---

государственный авиационный технический университет», e-mail: jenekap41@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Мешков Иван Константинович**

кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: mik.ivan@bk.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Мурлин Алексей Георгиевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы и программирование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет», e-mail: ksvkn@mail.ru, г. Краснодар, Российская Федерация

**Мурлина Владислава Анатольевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы и программирование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет», e-mail: ksvkn@mail.ru, г. Краснодар, Российская Федерация

**Овсянкин Алексей Константинович**

студент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», e-mail: dikoti1994@yandex.ru, г. Красноярск, Российская Федерация

**Пентегов Игорь Владимирович**

доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела физики газового разряда и техники плазмы, Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, e-mail: elmag@paton.kiev.ua, г. Киев, Украина

**Попов Анатолий Анатольевич**

кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», e-mail: dikoti1994@yandex.ru, г. Красноярск, Российская Федерация

**Поспелов Артём Сергеевич**

студент кафедры «Автомобильного транспорта, строительных и дорожных машин», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», e-mail: artyompospeloff@yandex.ru, г. Тюмень, Российская Федерация

**Путинцева Александра Андреевна**

аспирант, старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: aleksandputince@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Резник Елена Сергеевна**

аспирант, ассистент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: reznikes@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация



---

**Решетняк Сергей Николаевич**

старший научный сотрудник лаборатории геотехнологических рисков освоения недр, 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, заведующий лабораторией электротермии в составе отдела физико-металлургических процессов сварки и электротермии высокопрочных сталей, Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, e-mail: cantata@voliacable.com, г. Киев, Украина

**Самаров Евгений Кимович**

кандидат технических наук, декан факультета инфокоммуникационных систем и технологий, Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет», e-mail: samarov.ek@ut-mo.ru, г. Королев, Российская Федерация

**Сироткин Сергей Леонидович**

кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор Научно-конструкторского бюро моделирующих и управляющих систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», e-mail: ssirotkin1950@mail.ru, г. Таганрог, Российская Федерация

**Султанов Альберт Ханович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: mik.ivan@bk.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Табет Наиф Кайед Абдулла**

преподаватель Аденского университета, e-mail: fet777@mail.ru, г. Аден, Республика Йемен

**Татевосян Андрей Александрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», e-mail: karo1@mail.ru, г. Омск, Российская Федерация

**Фетисов Владимир Станиславович**

доктор технических наук, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: fet777@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Шабанов Виталий Алексеевич**

кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

---

**Шабанов Эдуард Вадимович**

магистрант кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: fentazer@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Юринский Юрий Александрович**

студент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», e-mail: dikoti1994@yandex.ru, г. Красноярск, Российская Федерация

**Янаева Марина Викторовна**

кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Информационные системы и программирования», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет», e-mail: ksvkpn@mail.ru, г. Краснодар, Российская Федерация

---

## ABOUT THE AUTHORS

### **Akhunova Dilya A.**

Postgraduate of Telecommunication Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: d.akhunova@bk.ru, Ufa, Russian Federation

### **Artyushenko Vladimir M.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Department «Information Technology and Control Systems», State Budgetary Educational Institution of Higher Education of Moscow Region «University of Technology», e-mail: artuschenko@mail.ru, Korolev, Russian Federation

### **Bondarenko Alexander M.**

Deputy Chief Power Engineer of SUEK-Kuzbass JSC, e-mail: reshetniak@inbox.ru, Leninsk-Kuznetsky, Russian Federation

### **Denisova Olga A.**

Dr. Sci. Phys.-Math., Associate Professor, Professor of Physics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: denisovaolga@bk.ru, Ufa, Russian Federation

### **Dmitriev Alexey A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Road Transport, Construction and Road Machines Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tyumen Industrial University», e-mail: s2\_88@mail.ru, Tyumen, Russian Federation

### **Dolapchi Sergey M.**

Lecture of Chair «Physics», Private Educational Institution of Higher Education «South Ural Institute of Management and Economics», e-mail: denisovaolga@bk.ru, Korkino, Russian Federation

### **Fetisov Vladimir S.**

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: fet777@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Giniyatullin Vakhit M.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Computer Science and Engineering Cybernetics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: fentazer@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Grahova Elizaveta P.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Telecommunication Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: eorlingsbest@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Gubatyuk Ruslan S.**

Junior Researcher of the Laboratory of Electrothermy of Physical and Metallurgical Processes of Welding and Electrothermy of High-Strength Steels Department, the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: cantata@voliacable.com, Kiev, Ukraine

### **Klimenko Olga V.**

Student of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: jenekap41@mail.ru, Ufa, Russian Federation

---

**Konkov Aleksandr N.**

Head of Sector «Scientific Design Bureau Modeling and Control Systems», Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», e-mail: ssirotkin1950@mail.ru, Taganrog, Russian Federation,

**Krivosnogov Sergey V.**

Senior Lecturer of Information Systems and Technologies Chair, State budgetary educational institution of higher education «Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics», e-mail: ksvkn@mail.ru, Knyaginino, Russian Federation

**Kubrin Sergey S.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Laboratory Geotechnological Risks of Subsoil Development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Professor of the Department «Automated Control Systems», Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National University of Science and Technology «MISiS», e-mail: s\_kubrin@mail.ru, Moscow, Russian Federation

**Le Van Tung**

Postgraduate of Electricity and Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint-Petersburg Mining University», e-mail: levantungdktd@gmail.com, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Likhachev Evgeny A.**

Senior Lecturer of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: jenekap41@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Meshkov Ivan K.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Telecommunication Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: mik.ivan@bk.ru, Ufa, Russian Federation

**Murlin Alexey G.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Information Systems and Programming Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kuban state technological university», e-mail: ksvkn@mail.ru, Krasnodar, Russian Federation

**Murlina Vladislava A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Information Systems and Programming Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kuban state technological university», e-mail: ksvkn@mail.ru, Krasnodar, Russian Federation

**Ovsyankin Alexey K.**

Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Reshetnev Siberian State University of Science and Technology», e-mail: dikoti1994@yandex.ru, Krasnoyarsk, Russian Federation

**Pentegov Igor V.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Leading Researcher of Gas Discharge Physics and Plasma Engineering Department, the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: elmag@paton.kiev.ua, Kiev, Ukraine

**Popov Anatoly A.**

Cand. Sci. Tech., Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Reshetnev Siberian State University of Science and Technology», e-mail: dikoti1994@yandex.ru, Krasnoyarsk, Russian Federation

---

**Pospelov Artem S.**

Student of Road Transport, Construction and Road Machines Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tyumen Industrial University», e-mail: artyompospeloff@yandex.ru, Tyumen, Russian Federation

**Putintseva Alexandra A.**

Postgraduate, Senior Lecturer of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: aleksandputince@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

**Reshetnyak Sergey N.**

Cand. Sci. Tech., Senior Researcher of Laboratory Geotechnological Risks of Subsoil Development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 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, Moscow, Russian Federation

**Reznik Elena S.**

Postgraduate, Assistant of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: reznikes@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

**Rymar Sergey V.**

Dr. Sci. Tech., Senior Researcher, Head of the Laboratory of Electrothermy of Physical and Metallurgical Processes of Welding and Electrothermy of High-Strength Steels Department, the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: cantata@voliacable.com, Kiev, Ukraine

**Samarov Evgeny K.**

Cand. Sci. Tech., Dean of the Faculty of Information and Communication Systems and Technologies, State Budgetary Educational Institution of Higher Education of Moscow Region «University of Technology», e-mail: samarov.ek@ut-mo.ru, Korolev, Russian Federation

**Shabanov Eduard V.**

Undergraduate of Computer Science and Engineering Cybernetics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: fentazer@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Shabanov Vitaliy A.**

Cand. Sci. Tech., Professor, Head of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: shabanovva1@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Sirotkin Sergey L.**

Cand. Sci. Tech., Leading Design Engineer of Scientific Design Bureau Modeling and Control Systems, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», e-mail: ssirotkin1950@mail.ru, Taganrog, Russian Federation

**Sultanov Albert Kh.**

Dr. Sci. Tech., Prof., Head of Telecommunication Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: mik.ivan@bk.ru, Ufa, Russian Federation

**Tatevosyan Andrey A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electrical Engineering Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Omsk State Technical University»,



---

e-mail: karo1@mail.ru, Omsk, Russian Federation

**Thabet Nayef Kayed Abdulla Lecturer**

University of Aden, e-mail: fet777@mail.ru, Aden, Republic of Yemen

**Vasiliev Bogdan Yu.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electricity and Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint-Petersburg Mining University», e-mail: levantungdkt@gmail.com, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Vasilyev Petr I.**

Student of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: reznikes@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

**Volovach Vladimir I.**

Dr. Sci. Tech., Associate Professor, Head of Department «Information and Electronic Service», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volga Region State University of Service», e-mail: ssunrise@mail.ru, Togliatti, Russian Federation

**Yanayeva Marina V.**

Cand. Sci. Tech., Head of Information Systems and Programming Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kuban state technological university», e-mail: ksvkn@mail.ru, Krasnodar, Russian Federation

**Yurinski Yuri A.**

Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Reshetnev Siberian State University of Science and Technology», e-mail: dikoti1994@yandex.ru, Krasnoyarsk, Russian Federation

**Zaytseva Alina A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: jenekap41@mail.ru, Ufa, Russian Federation

## Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале:

1. Статьи, предоставляемые авторами в журнал, должны соответствовать профилю журнала, обладать новизной, интересовать широкий круг научной общественности.
2. Редакция принимает к публикации только открытые материалы на русском и английском языках (для иностранных авторов).
3. Поля — 2,5 см с каждой стороны; шрифт — Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал — полуторный; ссылки на литературу — в квадратных скобках. При наличии ссылок список литературы обязателен (в порядке цитирования, в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008).
4. В правом верхнем углу жирным курсивом: фамилия, имя, отчество авторов (обязательно полностью), ученая степень, ученое звание, должность, структурное подразделение (обязательно полностью), наименование организации (полностью), город, страна.
5. По центру, жирным шрифтом, заглавными буквами: название статьи, УДК в правом верхнем углу.
6. В конце статьи укажите почтовый адрес с указанием индекса, фамилию и инициалы получателя (по этому адресу будет выслан журнал), телефон (сотовый), e-mail контактного лица. Файл со статьей оформить: Фамилия И.О.doc (или docx). Отправлять по адресу: uor-ugaes@mail.ru.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельными файлами.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (240 слов, определяющих теоретическую ценность и практическую новизну статьи), ключевые слова (не менее 10), список литературы обязателен (не менее 5 источников) на русском и английском языках.
9. Автор дает согласие на воспроизведение на безвозмездной основе в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВО «УГНТУ» электронной версии своей статьи, опубликованной в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы».
10. Графический и табличный материал должен быть представлен в черно-белом варианте в приложении к WORD, например, Microsoft Graph, без использования сканирования; для диаграмм применять различную штриховку, размер шрифта 10 или 11 pt, математические формулы оформляются через редактор формул Microsoft Equation, а их нумерация проставляется с правой стороны. Таблицы, диаграммы, рисунки подписываются 12 шрифтом в правом верхнем углу.
11. Сокращение слов, имен и названий, как правило, не допускается. Разрешаются лишь общепринятые сокращения мер физических, химических и математических величин и терминов и т.д.
12. Поступившие в редакцию статьи в обязательном порядке будут проходить рецензирование. Рецензии отклоненных работ высылаются авторам и содержат аргументированный отказ от публикации. В рецензиях работы, отправленных на доработку, указываются замечания к статье.
13. Все статьи, поступившие в редакцию, в обязательном порядке проходят проверку в системе «Антиплагиат».
14. С аспирантов плата за публикацию не взимается. При отправлении статьи на электронный адрес также необходимо отправить отсканированную справку из аспирантуры, заверенную отделом кадров.

### Памятка авторам

В статье настоятельно рекомендуется:

- НЕ использовать табуляцию (клавиша Tab);
- НЕ устанавливать свои стили абзацев (кроме принятых по умолчанию);
- НЕ расставлять автоматические списки (при нумерации строк и абзацев);
- НЕ ставить двойные, тройные и т.д. пробелы между словами.

Рекомендуется применять в статье только один тип кавычек («»).

Помнить о том, что необходимо различать дефис и тире. Тире выставляется сочетанием двух клавиш («Ctrl» + «-»).

**Все цитаты в статье должны быть соотнесены со списком литературы, при прямом цитировании обязательно указывать номера страниц.** Список литературы не следует смешивать с примечаниями, которые должны располагаться перед списком литературы.

**Статьи, не соответствующие требованиям, отклоняются для доработки.**

---

## **Requirements for the materials, provided for publication in the journal:**

1. Articles provided by the authors in the Journal should match the profile of the magazine, be new, be interesting for a wide range of scientific community.
2. Revision accepted for publication only open materials in Russian and English (for foreign authors).
3. Fields — 2.5 cm on each side; font — Times New Roman, font size — 14, line spacing — one and a half; References in square brackets. If there is a list of literature references is required (in order of citation in accordance with GOST R 7.05-2008).
4. In the upper right corner in bold italics: surname, name, patronymic of the author (certainly in full), academic degree, academic rank, position, name of organization (in full), country, city.
5. Centered, bold capital letters: title of the article. UDC — in the upper right corner.
6. At the end of the article specify the e-mail address with ZIP code, name and initials of the recipient (the address will be sent to the magazine), telephone (mobile), e-mail of the contact person. Article File Contents: Surname N.P.doc (or docx). Send to the address: uop-ugaes@mail.ru.
7. Be sure to send color photos of the authors in separate files (at least 1 MB and not more than 5 MB).
8. To the article must be accompanied by the Russian and English languages: the article title, abstract (240 words, determine the theoretical value and practical novelty of the article), keywords (at least 10), references required (at least 5 sources).
9. Author agrees to play free of charge on the Internet at the website FSBEI HE «USPTU» electronic version of his article published in the journal «Electrical and data processing facilities and systems».
10. Graphical and table material should be presented in the annex to the WORD. For example, Microsoft Graph, without scanning; diagrams for applying a different shading, font size 10 or 11 pt, mathematical formulas should be made through the formula editor Microsoft Equation, and their numbers stamped on the right side. Table signed by the 12th print in the upper right corner, diagrams, drawings — at the bottom center.
11. Reductions of words of names usually are not permitted. Allowed only standard abbreviations measures, physical, chemical and mathematical quantities and terms, etc.
12. Received articles will necessarily be reviewed. Reviews of rejected papers are sent to the authors and contain a reasoned rejection of the publication. In reviews of works sent for revision, specify comments on the article.
13. All articles received by the editorial compulsorily tested in the «Anti-plagiarism».
14. Article volume with the summary and the list of references shouldn't exceed 12 pages.

### **Memo to authors**

The article is highly recommended:

- NOT TO use the tab key (Tab);
- NOT TO place your paragraph styles (other than the defaults);
- NOT TO set automatic lists (with line numbers and paragraphs);
- NOT TO put double, triple and so. D. The spaces between words.

Recommended in the article is only one type of quotes («») or ("").

Remember that it is necessary to distinguish hyphens and dashes. Dash is exhibited by a combination of two keys («Ctrl» + «-»).

**All quotations in the article should be correlated with the list of literature, with direct quotations necessarily indicate page numbers.** References should not be confused with the notes that must be placed before the bibliography.

**Articles that do not meet the requirements will be rejected for revision.**