

ISSN 1999-5458

# Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 3, т. 10, 2014



# Electrical and data processing facilities and systems

№ 3, v. 10, 2014



Подписной индекс:  
91824 в каталоге «Пресса России»

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭКОНОМИКИ И СЕРВИСА

УГУЭС

№ 3, т. 10, 2014

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

## Учредитель

Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса»

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций» (решение президиума Высшей аттестационной комиссии от 2 марта 2012 года).  
Международный стандартный серийный номер ISSN 1999-5458.

## Редакционная коллегия:

Главный редактор:

С.В. Шапиро – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВПО

«Уфимский государственный университет экономики и сервиса» (Россия, г. Уфа)



Зам. главного редактора:

Ш.З. Валиев – канд. техн. наук, д-р экон. наук, проф.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса» (Россия, г. Уфа)



## Члены редакционной коллегии:

В.М. Артюшенко – д-р техн. наук, проф.

ГБОУ ВПО МО «Финансово-технологическая академия» (Россия, г. Москва)



Б.М. Горшков – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВПО

«Поволжский государственный университет сервиса» (Россия, г. Тольятти)



М.Ю. Доломатов – д-р хим. наук, проф. ФГБОУ ВПО

«Уфимский государственный университет экономики и сервиса» (Россия, г. Уфа)



В.Г. Крымский – д-р техн. наук, проф.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса» (Россия, г. Уфа)



В.Г. Кушнир – д-р техн. наук, проф. Костанайского

государственного университета им. Ахмета Байтурсынова (Казахстан, г. Костанай)



С.В. Павлов – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВПО

«Уфимский государственный авиационный технический университет» (Россия, г. Уфа)



Р.Р. Сафин – д-р техн. наук, проф.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса» (Россия, г. Уфа)



П.С. Серенков – д-р техн. наук, проф. Белорусского национального технического университета



(Белоруссия, г. Минск)

А.Ф. Романченко – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВПО

«Уфимский государственный

университет экономики и сервиса» (Россия, г. Уфа)



М.А. Ураксеев – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВПО

«Уфимский государственный авиационный технический университет» (Россия, г. Уфа)



Н.А. Феоктистов – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет

дизайна и технологии» (Россия, г. Москва)



Ф.Ф. Хизбуллин – д-р хим. наук, проф. ФГБОУ ВПО

«Уфимский государственный университет экономики и сервиса» (Россия, г. Уфа)



П.И. Чердниченко – д-р техн. наук, проф.

Черниговского государственного технологического университета (Украина, г. Чернигов)



В.А. Шабанов – канд. техн. наук, проф. ФГБОУ ВПО

«Уфимский государственный нефтяной технический университет» (Россия, г. Уфа)



Р.Б. Яруллин – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВПО

«Уфимский государственный университет экономики и сервиса» (Россия, г. Уфа)



И. Зицмане – д-р техн. наук, профессор Рижского

технического университета, эксперт научного совета Латвийской академии наук (Латвия, г. Рига)



Г.Д. Георгиев – д-р техн. наук, преподаватель

Технического университета (Болгария, г. Варна)



И.В. Пентегов – д-р техн. наук, профессор, вед. научный

сотр. Института электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины

(Украина, г. Киев)



Б. Брудник – д-р техн. наук, вед. научн. сотр. Тель-Авивского университета (Израиль, г. Тель-Авив)



Ответственный секретарь: А.А. Мухамадиев

Технический редактор: С.С. Некрасова

Подписка во всех отделениях связи: индекс 91824 в объединенном каталоге «Пресса России».

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-56127 от 15.11.2013 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

© Уфимский государственный университет экономики и сервиса, 2014

Адрес редакции: 450078, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Чернышевского, 145.

Тел.: +7 (347) 228-91-38.

Подписано в печать 18.09.2014 г. Формат 60×80 1/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 8,125. Тираж 1000 экз. Заказ № 67.

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.

# ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND SERVICE



№ 3, v. 10, 2014

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

## Founder:

Ministry of Education and Science of the Russian Federation  
Federal government budgetary educational institution of higher professional education  
"Ufa state university of economics and service"

The journal is included in "The list of reviewed scientific journals and editions for publication of the main scientific results of theses" (decision of the Highest certification commission presidium of March 2, 2012).  
International standard serial number ISSN 1999-5458.

## Editorial board:

Editor-in-chief:

S.V. Shapiro – Dr. Sci.Tech., prof. of FSBEI HPE  
Ufa state university of economics and service  
(Russia, Ufa)



Deputy editor-in-chief:

Sh.Z. Valiev – Cand. Sci.Tech., Dr. Sci. Econ., prof. of  
FSBEI HPE Ufa state university of economics and service  
(Russia, Ufa)



## Members of an editorial board:

V.M. Artyushenko – Dr. Sci.Tech., prof. of SBEI  
HPE MR Financial and technological academy  
(Russia, Moscow)



B.M. Gorshkov – Dr. Sci.Tech., prof. of FSBEI  
HPE Volga region state university of service  
(Russia, Tolyatti)



M.Yu. Dolomatov – Dr. Sci.Chem., prof. of  
FSBEI HPE Ufa state university of economics  
and service (Russia, Ufa)



V.G. Krymsky – Dr. Sci.Tech., prof. of FSBEI HPE  
Ufa state university of economics and service  
(Russia, Ufa)



V.G. Kushnir – Dr. Sci.Tech., prof. of Kostanaysky  
state university of Ahmet Baytursynov  
(Kazakhstan, Kostanay)



S.V. Pavlov – Dr. Sci.Tech., prof. of FSBEI HPE  
Ufa state aviation technical university (Russia, Ufa)



R.R. Safin – Dr. Sci.Tech., prof. of FSBEI HPE Ufa  
state university of economics and service  
(Russia, Ufa)



P.S. Serenkov – Dr. Sci.Tech., prof. of Byelorussian  
national technical university (Byelorussia, Minsk)



A.F. Romanchenko – Dr. Sci.Tech., prof. of  
FSBEI HPE Ufa state university of economics  
and service (Russia, Ufa)



M.A. Urakseev – Dr. Sci.Tech., prof. of FSBEI HPE  
Ufa state aviation technical university (Russia, Ufa)



N.A. Feoktistov – Dr. Sci.Tech., prof. of FSBEI HPE  
Moscow state university of design and technology  
(Russia, Moscow)



F.F. Hizbullin – Dr. Sci.Chem., prof. of FSBEI HPE  
Ufa state university of economics and service  
(Russia, Ufa)



P.I. Cherednichenko – Dr. Sci.Tech., prof. of Chernigov  
state technological university (Ukraine, Chernigov)



V.A. Shabanov – Cand. Sci.Tech., prof. of  
FSBEI HPE Ufa state petroleum technological  
university (Russia, Ufa)



R.B. Yarullin – Dr. Sci.Tech., prof. of FSBEI HPE  
Ufa state university of economics and service  
(Russia, Ufa)



I. Zicmane – Dr. Sci.Tech., prof. Riga Technical  
University, expert the Latvian Council  
of Science (Latvia, Riga)



G.D. Georgiev – Dr. Sci.Tech., lecturer Technical  
university (Bulgaria, Varna)



I.V. Pentegov – Dr. Sci.Tech., prof., leading  
researcher the E.O.Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
(Ukraine, Kiev)



B. Brudnik – Dr. Sci.Tech., leading researcher  
of Tel Aviv University (Israel, Tel Aviv)



Assistant editor: A.A. Mukhamadiev  
Technical editor: S.S. Nekrasova

Subscription is available in all post offices: Postal code 91824 in the integrated catalog of the "Russian Press".

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 PI № PHS 77-56127 from 15.11.2013 given by Federal service of supervision in the scope of communication, information technologies and mass media.

© Ufa State University of Economics and Service, 2014

Publisher's address: 145 Chernishevskiy St., 145, Ufa, 450078.

Ph.: +7 (347) 228-91-38.

Signed for printing 18.09.2014. Format 60×80 1/8. Offset printing. 8,125 printed pages. Circulation is 1000 copies. Order №. 67.

The text of journal "Electrical and data processing facilities and systems" may be quoted with written permission of the publisher only.

Content is published as provided by authors.

Publisher's view may be different from that of the authors of the articles.

# СОДЕРЖАНИЕ

## Электротехнические комплексы и системы

<i>Пентегов И.В.</i> К теории метода тепловых источников, используемого при анализе тепловых процессов в электротехнических системах .....	5
<i>Хакимьянов М.И., Гузеев Б.В., Рябишина Л.А.</i> Методические основы расчета потребления электроэнергии электроприводами дожимных и кустовых насосных станций .....	15
<i>Рогинская Л.Э., Горбунов А.С., Ялалова З.И.</i> Улучшение электромагнитной совместимости преобразовательных устройств с сетью и нагрузкой с помощью многофазных трансформаторов .....	21
<i>Яруллин Р.Б., Сафин Р.Р.</i> К вопросу проектирования саморегулируемого инерционного вибратора асинхронного электропривода вибромашин .....	30
<i>Нугаев И.Ф., Байгускаров И.С., Стыскин А.В., Уразбахтина Н.Г.</i> Динамическая модель тепловых процессов в погружном электродвигателе насосной установки нефтедобывающей скважины .....	38
<i>Кушнир В.Г., Поезжалов В.М.</i> Система отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, основанная на использовании природно-климатических факторов .....	45
<i>Зикий А.Н., Зламан П.Н., Власенко Д.В., Гончарова Т.О., Третьяк А.А.</i> Фильтры на поверхностных акустических волнах .....	50

## Информационные комплексы и системы

<i>Новичкова А.В., Бобренева Ю.О., Губайдуллин И.М., Коледина К.Ф.</i> Информационные системы моделирования реакционной способности алкенов в реакции гидроалюминирования олефинов триизобутилалюминием .....	55
<i>Грахова Е.П., Мешков И.К., Багманов В.Х., Виноградова И.Л.</i> Моделирование СШП радиоимпульсов на основе производных Гаусса и Рэлея с учетом спектральной маски ГКРЧ .....	62
<i>Воловач В.И., Будилов В.Н.</i> Определение взаимосвязи порогового напряжения РУО и достоверности обнаружения протяженных объектов .....	69
<i>Павлов С.В., Самойлов А.С.</i> Использование топологических отношений для обеспечения актуальности базы пространственных данных в распределенной геоинформационной системе газоснабжения промышленных предприятий .....	75

## Метрология и информационно-измерительные устройства

<i>Сироткин С.Л., Коньков А.Н.</i> Методы непрерывной обработки информации от частотных датчиков .....	89
<i>Евстафьев А.И., Ураксеев М.А.</i> Применение матриц Джонса для описания состояния поляризации света в магнитооптическом датчике тока .....	96
<i>Романченко А.Ф., Мухамадиев А.А.</i> Формирование информационных характеристик первичных преобразователей при комплексной обработке выходного сигнала .....	102

## Нанoeлектроника и квантовые информационные системы

<i>Рудерман С.Ю., Нургаянова О.С.</i> Набор хромосом как потенциальный источник информации о предстоящем клетке построении последовательности белков (оптимизационная модель картины) .....	107
<i>Доломатов М.Ю., Телин А.Г., Сафуанова Р.М., Борисов Г.К., Бурханова З.И., Кисмерешкин С.В., Докичев В.А.</i> Резонансная колебательная деструкция водородных связей как причина метастабильности эмульсий под действием магнитного поля .....	113

<b>Об авторах</b> .....	123
-------------------------	-----

# CONTENT

## Electrical facilities and systems

<i>Pentegov I.V.</i> On the method of heat sources in the analysis of thermal processes in electrotechnical systems .....	5
<i>Hakimyanov M.I., Guzeev B.V., Ryabishina L.A.</i> Methodological bases calculation of power consumption of electric drives booster and group pumping station .....	15
<i>Roginskaya L.E., Gorbunov A.S., Yalalova Z.I.</i> Improving of electromagnetic compatibility of converter devices with mains and load using multiphase transformers .....	21
<i>Yarullin R.B., Safin R.R.</i> By design issues of self-regulatory inertia vibrator asynchronous electric drive the vibration machine .....	30
<i>Nugaev I.F., Byguskarov I.S., Styskin A.V., Urazbaktina N.G.</i> Dynamic model of thermal processes in the submersible motor oil well pumping unit .....	38
<i>Kushnir V.G., Poezzhalov V.M.</i> Climatic factors-based heating, ventilation and air conditioning system .....	45
<i>Zikiy A.N., Zlaman P.N., Vlasenko D.V., Goncharova T.O., Tretyak A.A.</i> Filters on the surface-acoustic wave .....	50

## Data processing facilities and systems

<i>Novichkova A.V., Bobreneva Y.O., Gubaidullin I.M., Koledina K.F.</i> Information systems for modeling reactivity of alkenes in in olefin hydroalumination reactions with triisobutylaluminum .....	55
<i>Grakhova E.P., Meshkov I.K., Bagmanov V.Kh., Vinogradova I.L.</i> UWB radio pulses design based on the derivative Gaussian and Rayleigh pulses relevant to the spectral mask of radiofrequencies committee .....	62
<i>Volovach V.I., Budilov V.N.</i> Definition of interrelation of threshold tension of REDD and reliability of detection of extended objects .....	69
<i>Pavlov S.V., Samoylov A.S.</i> Topological relations use for spatial database relevance provision in distributed geographic information system of industrial enterprises gas supply system .....	75

## Metrology and information-measuring devices

<i>Sirotkin S.L., Konkov A.N.</i> The methods continuous working of information from frequency sensors .....	89
<i>Evstafev A.I., Urakseev M.A.</i> Application of the Jones matrices for describing polarization state of light in magneto-optical current sensor .....	96
<i>Romanchenko A.F., Mukhamadiev A.A.</i> Formation of information characteristics of primary converters for complex output signal processing .....	102

## Nanoelectronics and quantum data systems

<i>Ruderman S.Yu., Nurgajanova O.S.</i> Set of chromosomes as a potential source of information about the upcoming construction of the cell protein sequences (optimization model) .....	107
<i>Dolomatov M.Yu., Telin A.G., Safuanova R.M., Borisov G.K., Burhanova Z.I., Kismereshkin S.V., Dokichev V.A.</i> Resonant vibrational destruction of hydrogen bonds as a cause meta-stable emulsion under low frequency electromagnetic field .....	113

<b>About the authors</b> .....	126
--------------------------------	-----

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS



**Пентегов И.В.**

**Pentegov I.V.**

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

УДК 536.12:621.78.01

## К ТЕОРИИ МЕТОДА ТЕПЛОВЫХ ИСТОЧНИКОВ, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ПРИ АНАЛИЗЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

При аналитическом определении распределения тепла в нагреваемых объемных телах возникает ряд трудностей, которые приводят к снижению точности температурных расчетов. Так, наиболее применяемый сейчас метод тепловых источников, развитый Н.Н. Рыкалиным, оперирует с конечной величиной импульса энергии. При этом в точке возникновения импульса энергии возникает бесконечно высокая температура. Устранение этого недостатка позволяет сделать существенный шаг в развитии аналитических методов расчета тепла. В настоящей статье разработан универсальный подход к суммированию радиус-векторов в методе тепловых источников при устремлении числа источников к бесконечности, что позволило избавиться от указанной выше проблемы и расширить область применения метода, включив в нее все задачи электротермии и высокочастотного индукционного нагрева объемных тел, используемые в электротехнических комплексах и системах. Метод особенно эффективен и легок в применении при индукторах простых геометрических форм.

Модернизированный метод тепловых источников был проверен при решении ряда задач электротермии и показал высокую точность совпадения результатов расчета с опытными данными, а также с данными расчета прикладных компьютерных программ ведущих мировых фирм, использующих метод конечных элементов.

*Ключевые слова:* тепловые расчеты, метод тепловых источников, тепловая мощность, электротермия, высокочастотный индукционный нагрев.

## ON THE METHOD OF HEAT SOURCES IN THE ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES IN ELECTROTECHNICAL SYSTEMS

Analytical determination of heat distribution in bulk heated bodies meets with a number of difficulties which lead to deterioration of the accuracy of thermal computations. For instance, the method of heat sources, developed by N.N. Rykalin and most widely used nowadays, deals with finite magnitude of the energy burst, causing an infinite temperature at the point of burst. The elimination of this shortcoming would imply a significant step forward in the development of analytical methods of thermal computations. A universal approach to the summation of radius vectors in the method of heat sources with the number of sources approaching infinity is developed in the present paper. This approach is free of the abovementioned problem and expands the method's usability domain with inclusion of all problems in the fields of electrothermy and high-frequency induction heating of bulk bodies

arising in electrotechnical systems. The method is especially effective for the inductors with simple geometry.

The modernized method of heat sources is tested on a number of electrothermy problems and demonstrates high degree of consistency of the calculated results with both the experimental data and the computational results obtained with the use of commercial software utilizing the finite element method.

*Key words:* thermal calculations, method of heat sources, thermal output, electrothermy, high-frequency induction heating.

При аналитическом определении распределения тепла в нагреваемых объемных телах возникает ряд трудностей. Так, в наиболее применяемом методе тепловых источников [1, 2] оперируют с конечной величиной импульса энергии, получая в точке его возникновения бесконечно высокую температуру, что является существенным недостатком данного метода, влияющим на точность определения температуры. Устранение этого недостатка позволяет сделать существенный шаг в развитии аналитических методов расчета тепла и дает возможность расширить область применения метода, включив в нее все задачи электротермии и высокочастотного индукционного нагрева, используемые в электротехнических комплексах и системах, сделать метод более универсальным и легким в применении, что и является целью настоящей работы.

Распространение тепла от сосредоточенного источника в неограниченном однородном трехмерном пространстве описывается уравнением приращения температур [1, 2]:

$$\theta(R,t) = \frac{Q}{c\gamma(4\pi at)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{R^2}{4at}}, \quad (1)$$

где  $R^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2$  – квадрат расстояния от точечного источника тепла в точке с координатами  $(x_0, y_0, z_0)$  до точки тела с координатами  $(x, y, z)$ , в которой определяется температура;  $t$  – время с момента возникновения импульса энергии  $Q$ ;  $c$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  $\lambda$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $a = \lambda/(c\gamma)$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К). В расчете обычно принимают средние значения теплофизических параметров за время нагрева.

Уравнение (1) является основным в методе источников и впервые получено Ж. Б. Фурье [3].

В методе тепловых источников оперируют с конечной величиной импульса энергии  $Q$ , получая в точке его возникновения бесконечно высокую температуру, что является существенным недостатком данного метода. Модернизируем метод источников таким образом, чтобы исключить получение бесконечно высокой температуры в точке возникновения импульса энергии, используя подход, часто применяемый в физике.

Для этого представим источник  $Q$  распределенным в пространстве, а область, в которой находятся распределенные источники, разобьем на элементарные объемы:

$$\Delta V_{i,j,k} = \Delta x_{0i} \Delta y_{0j} \Delta z_{0k}. \quad (3)$$

Причем энергия, выделенная в элементарном объеме за время  $\Delta t$ , равна

$$\Delta Q_{i,j,k} = p_V \Delta t \Delta V_{i,j,k}, \quad (4)$$

здесь  $p_V$  – удельная мощность, выделяемая в элементе объема, Вт/м<sup>3</sup>. Сначала будем считать  $p_V = \text{const}$ . Если же элементарные источники тепла расположены на поверхности, например, на плоскости  $(x, z)$  при каком-то  $y = \text{const}$ , то эту плоскость также разобьем на элементарные площадки:

$$\Delta S_{i,k} = \Delta x_{0i} \Delta z_{0k}, \quad (5)$$

причем энергия, выделенная за время  $\Delta t$ , равна

$$\Delta Q_{i,k} = p_S \Delta t \Delta S_{i,k}, \quad (6)$$

где  $p_S$  – удельная мощность, выделяемая на элементе поверхности, Вт/м<sup>2</sup>. Сначала также будем считать  $p_S = \text{const}$ .

Используя формулу (1) для  $\Delta Q$ , после замены  $t$  на  $t - \tau_q$  получим:

$$\Delta \theta_{i,j,k,q} = \frac{\Delta Q_{i,j,k}}{c\gamma [4\pi a(t - \tau_q)]^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{R_{i,j,k}^2}{4a(t - \tau_q)}}. \quad (7)$$

Здесь

$$R_{i,j,k}^2 = (x - x_{0i})^2 + (y - y_{0j})^2 + (z - z_{0k})^2 \quad (8)$$

– квадрат расстояния от элементарного точечного источника тепла в точке  $(x_{0i}, y_{0j}, z_{0k})$  до точки тела с координатами  $(x, y, z)$ , в которой определяется температура;  $\tau_q$  – время возникновения момента импульса энергии  $\Delta Q_{i,j,k,q}$ , отсчитываемое от начала процесса нагрева;  $t$  – текущее время, отсчитываемое от начала процесса нагрева;  $(t - \tau_q)$  – время распространения тепла от импульса энергии  $\Delta Q_{i,j,k,q}$ .

Здесь уже учитывается, что элементарные дозы энергии  $\Delta Q_{i,j,k,q}$  длительностью  $\Delta t$ , возникают в моменты времени

$$\tau_q = q\Delta t. \quad (9)$$

С учетом формул (4) и (3) получим приращение температуры в точке  $(x, y, z)$  от одного элементарного источника тепла:

$$\Delta \theta_{i,j,k,q} = \frac{p_V \Delta t \Delta x_{0i} \Delta y_{0j} \Delta z_{0k}}{c\gamma [4\pi a(t - q\Delta t)]^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{R_{i,j,k}^2}{4a(t - q\Delta t)}}. \quad (10)$$

Суммируя все приращения по всему пространству с источниками при фиксированном времени  $t$  и всех временах  $\tau_q$  (при одинаковых  $\Delta_{x_0}$ ,  $\Delta_{y_0}$ ,  $\Delta_{z_0}$  и

$\Delta\tau$ ), получим суммарное приращение температуры в точке  $(x, y, z)$ :

$$\Theta_{i,j,k,q} = \sum_{i,j,k,q} \Delta\theta_{i,j,k,q} = \sum_q \left\{ \frac{p_v \Delta\tau \Delta x_0 \Delta y_0 \Delta z_0}{c\gamma [4\pi a (t - q\Delta\tau)]^{\frac{3}{2}}} \sum_{i,j,k} e^{-\frac{R_{i,j,k}^2}{4a(t-q\Delta\tau)}} \right\}. \quad (11)$$

В формуле (11) внутренняя сумма пробегает все значения радиус-вектора  $R$ . Рассмотрим случай трехмерного распределения источников и введем следующие обозначения. Пусть  $(0, X)$ ,  $(0, Y)$  и  $(0, Z)$  – интервалы по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ , в которых находятся элементарные источники тепла  $\Delta\theta$ . Число дискретных временных интервалов  $N$  равно:

$$N = t/\Delta\tau, \quad (12)$$

и, следовательно,  $q = 1, 2, 3, \dots, N$ . Числа ячеек с источниками тепла по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$  будут, соответственно, равны:

$$I = X/\Delta x_0; J = Y/\Delta y_0; K = Z/\Delta z_0, \quad (13)$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots, I; j = 1, 2, 3, \dots, J; k = 1, 2, 3, \dots, K$ . При этом

$$x_{0i} = i\Delta x_0; y_{0j} = j\Delta y_0; z_{0k} = k\Delta z_0; \tau_q = q\Delta\tau. \quad (14)$$

Очевидно, что для любой точки  $(x, y, z)$ :

$$\sum_{i,j,k} e^{-\frac{R_{i,j,k}^2}{4a(t-\tau)}} = \sum_{i=0}^I e^{-\frac{(x-i\Delta x_0)^2}{4a(t-\tau)}} \cdot \sum_{j=0}^J e^{-\frac{(y-j\Delta y_0)^2}{4a(t-\tau)}} \cdot \sum_{k=0}^K e^{-\frac{(z-k\Delta z_0)^2}{4a(t-\tau)}}, \quad (15)$$

так как перекрестные произведения членов трех сумм справа дают сумму «е» в степенях, числитель которых представляет собой неповторяющуюся сумму ровно трех квадратов со всеми сочетаниями  $i, j, k$  без пропусков, и полученная сумма содержит квадраты  $R_{i,j,k}^2$  всех радиус-векторов типа (8) для всех ячеек с источниками тепла. Поэтому уравне-

ние (15) представляет собой тождество.

Подставляя этот результат в (11) и переходя от конечных размеров временных интервалов и ячеек к бесконечно малым  $d\tau$ ,  $dx_0$ ,  $dy_0$  и  $dz_0$ , получим интегральное представление приращения температуры в точке

$$(x, y, z): \Theta(x, y, z, t) = \frac{p_v}{c\gamma (4\pi a)^{\frac{3}{2}}} \int_0^t \frac{1}{(t-\tau)^{\frac{3}{2}}} \int_0^X e^{-\frac{(x_0-x)^2}{4a(t-\tau)}} dx_0 \int_0^Y e^{-\frac{(y_0-y)^2}{4a(t-\tau)}} dy_0 \int_0^Z e^{-\frac{(z_0-z)^2}{4a(t-\tau)}} dz_0 d\tau. \quad (16)$$

Это уравнение дает распределение температур в неограниченном трехмерном пространстве при источниках тепла, равномерно распределенных внутри прямоугольного параллелепипеда со сторо-

нами  $X, Y, Z$  и началом координат в одной из вершин параллелепипеда. При перемещении начала координат в центр параллелепипеда получим:

$$\Theta(x, y, z, t) = \frac{p_v}{c\gamma (4\pi a)^{\frac{3}{2}}} \int_0^t \frac{1}{(t-\tau)^{\frac{3}{2}}} \int_{-X/2}^{X/2} e^{-\frac{(x_0-x)^2}{4a(t-\tau)}} dx_0 \int_{-Y/2}^{Y/2} e^{-\frac{(y_0-y)^2}{4a(t-\tau)}} dy_0 \int_{-Z/2}^{Z/2} e^{-\frac{(z_0-z)^2}{4a(t-\tau)}} dz_0 d\tau. \quad (17)$$

Формулами (16) и (17) уже можно пользоваться при численных расчетах.

Этот результат может быть получен и другими методами, например, базирующимися на свойствах  $n$ -кратных интегралов, но мы остановились на приведенном выше, как наиболее простом и доступном. Здесь внутренние интегралы легко выражаются через встроенные во многие математические

программы (например, MathCAD) интегралы вероятности:

$$\text{erf}(n) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^n e^{-\xi^2} d\xi,$$

что существенно сокращает время счета (более чем на 2 порядка) и делает эти формулы пригодными для аналитических преобразований:



$$\int_{-X/2}^{X/2} e^{-\frac{(x_0-x)^2}{4a(t-\tau)}} dx_0 = \sqrt{\pi a(t-\tau)} \left\{ \operatorname{erf} \left[ \frac{x + \frac{X}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{x - \frac{X}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] \right\}; \quad (18)$$

$$\int_{-Y/2}^{Y/2} e^{-\frac{(y_0-y)^2}{4a(t-\tau)}} dy_0 = \sqrt{\pi a(t-\tau)} \left\{ \operatorname{erf} \left[ \frac{y + \frac{Y}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{y - \frac{Y}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] \right\}; \quad (19)$$

$$\int_{-Z/2}^{Z/2} e^{-\frac{(z_0-z)^2}{4a(t-\tau)}} dz_0 = \sqrt{\pi a(t-\tau)} \left\{ \operatorname{erf} \left[ \frac{z + \frac{Z}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{z - \frac{Z}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] \right\}. \quad (20)$$

В дальнейшем будем применять более краткие обозначения:

$$\operatorname{Erf} ( x, X, a, t, \tau ) = \operatorname{erf} \left[ \frac{x + \frac{X}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{x - \frac{X}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right]; \quad (21)$$

$$\operatorname{Erf} ( y, Y, a, t, \tau ) = \operatorname{erf} \left[ \frac{y + \frac{Y}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{y - \frac{Y}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right]; \quad (22)$$

$$\operatorname{Erf} ( z, Z, a, t, \tau ) = \operatorname{erf} \left[ \frac{z + \frac{Z}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{z - \frac{Z}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right]. \quad (23)$$

Подставив обозначения (21)–(23) в формулы (18)–(20) и затем в формулу (17), после сокращений и преобразований получим приращение температуры в точке  $(x, y, z)$ :

$$\Theta ( x, y, z, t ) = \frac{p_v}{8c\gamma} \int_0^t \operatorname{Erf} ( x, X, a, t, \tau ) \cdot \operatorname{Erf} ( y, Y, a, t, \tau ) \cdot \operatorname{Erf} ( z, Z, a, t, \tau ) d\tau. \quad (24)$$

Это уравнение дает распределение приращений температур в неограниченном трехмерном пространстве при источниках тепла, равномерно распределенных внутри прямоугольного параллелепипеда со сторонами  $X, Y, Z$  и началом координат в центре параллелепипеда.

Рассмотрим простой случай, когда источники тепла занимают все пространство:  $X = \infty, Y = \infty, Z = \infty$ . Используя основные свойства функции  $\operatorname{erf}(n)$ , такие как  $\operatorname{erf}(\infty) = 1$  и  $\operatorname{erf}(-n) = -\operatorname{erf}(n)$  (см. рис. 1), для величин параметров  $\operatorname{Erf}$  в этом случае получим:

$$\operatorname{Erf} ( x, \infty, a, t, \tau ) = \operatorname{Erf} ( y, \infty, a, t, \tau ) =$$

$$\operatorname{Erf} ( z, \infty, a, t, \tau ) = \operatorname{erf} ( \infty ) - \operatorname{erf} ( -\infty ) = 2.$$

Заметим, что условие  $\operatorname{erf}(n) = 1$  и полученное выше соотношение выполняется при всех  $n > 2$ , см.

рис. 1. При этом формула (24) вырождается в

$$\Theta ( t ) = \frac{p_v t}{c\gamma}.$$

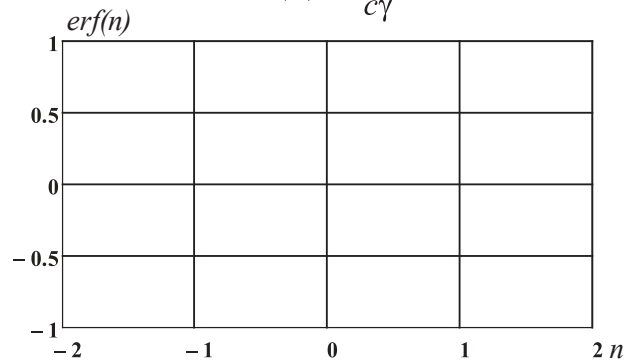


Рис. 1. Функция интеграла вероятности  $\operatorname{erf}(n)$

В этом случае вся энергия, поступающая в любой микрообъем пространства, идет на увеличение теплосодержания тела, и при постоянной удельной мощности температура тела возрастает линейно во времени и от координат не зависит, как и должно быть.

Усложним предыдущую задачу. Оставим  $X$  и  $Z$  прежними, а  $Y$  устремим к некоторому малому значению  $Y_0$ . Это задача одномерного распространения тепла вдоль оси  $y$  от плоского источника энергии, расположенного в плоскости  $y_0 = 0$  и не ограниченного по осям  $x$  и  $z$ . В этом случае интеграл в (19) может быть найден с помощью предельного перехода:

$$\lim_{\substack{Y \rightarrow Y_0 \\ y_0 \rightarrow 0}} \int_{-Y/2}^{Y/2} e^{-\frac{(y_0 - y)^2}{4a(t-\tau)}} dy_0 = Y_0 e^{-\frac{y^2}{4a(t-\tau)}}. \quad (25)$$

Можно, конечно, располагать плоский источник тепла при  $y \neq 0$ , но на практике такие случаи не наблюдаются.

Интегралы (18) и (20) остаются без изменений, и их произведение при  $X = \infty, Z = \infty$  равно  $4\pi a(t - \tau)$ . Подставляя эти результаты в формулы (18)–(20), получим

$$T(y, t) = \Theta(y, t) + T_0 = \frac{p_s \sqrt{a}}{\lambda \sqrt{\pi}} \int_0^t e^{-\frac{y^2}{4a(t-\tau)}} \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}} + T_0. \quad (28)$$

Здесь  $T_0$  – температура нижнего полупространства перед началом нагрева;  $p_s$  – удельная поверхностная мощность, поступающая от индуктора или горелки в нижнее полупространство.

Эта формула одномерного теплового поля дает решение задачи нагрева длинного стержня любого поперечного сечения с торца при боковых поверхностях стержня, покрытых теплоизоляцией (см. пример 1).

Если необходимо рассмотреть эту же задачу при конечной области с источниками тепла, ограниченной размерами  $X, Y, Z$  над неограниченным полупространством, то указанный выше параллелепипед нужно считать состоящим из двух половин: нижней с размерами  $X, -Y/2, Z$  и верхней (зеркально отраженной, которая «запирает» для прохода тепловых потоков верхнюю границу нижнего полупространства и обеспечивает требуемые граничные

$$\Theta(y, t) = \frac{p_v Y_0 \sqrt{a}}{2\lambda \sqrt{\pi}} \int_0^t e^{-\frac{y^2}{4a(t-\tau)}} \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}}. \quad (26)$$

Это уравнение описывает изменение приращения температуры при нагреве верхнего и нижнего полупространства от плоского неограниченного по осям  $X$  и  $Z$  источника нагрева с одномерным тепловым полем, изменяющимся вдоль оси  $y$ . Если рассматривать верхнее полупространство как зеркальное отражение, запирающее тепловой поток поперек поверхности с  $y = 0$ , то величина  $p_v Y_0/2$  будет представлять собой удельную поверхностную мощность  $p_s$ , Вт/м<sup>2</sup>, связанную с удельной объемной мощностью  $p_v$ , Вт/м<sup>3</sup>, соотношением

$$p_s = p_v \frac{Y_0}{2}, \quad (27)$$

поступающей в нижнее полупространство в одномерной задаче.

Истинная температура в любой точке  $y$  нижнего полупространства в процессе нагрева определяется по формуле

условия) с размерами  $X, Y/2, Z$ . Реальная активная мощность, передаваемая от индуктора в нижнее полупространство, при этом будет равна  $p_v XYZ/2$ .

Данный случай уже имеет практическое значение. Это процесс нагрева массивного тела (неограниченного полупространства) сверху плоским прямоугольным высокочастотным индуктором, у которого  $Z$  – длина индуктора,  $X$  – ширина настила тока под индуктором,  $Y/2$  – глубина проникновения тока в массивное тело, при отсутствии потерь тепла с поверхности тела в верхнее полупространство на излучение и конвекцию (например, в случае поверхности тела, покрытого теплоизоляцией). Когда глубина проникновения тока  $Y/2$  мала, то это поверхностный нагрев с мощностью  $p_s$ , определяемой по формуле (27), и в этом случае уравнение (28) может быть записано в виде:

$$T(x, y, z, t) = \frac{p_s \sqrt{a}}{4\lambda \sqrt{\pi}} \int_0^t e^{-\frac{y^2}{4a(t-\tau)}} \frac{\text{Erf}(x, X, a, t, \tau) \cdot \text{Erf}(z, Z, a, t, \tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau + T_0. \quad (29)$$

Здесь при конечных размерах  $X$  и  $Z$  произведение интегралов (18) и (20) в (17) уже не равно  $4\pi a(t - \tau)$ , как в (26) и (28), а равно:

$\pi a(t - \tau) \operatorname{Erf}(x, X, a, t, \tau) \cdot \operatorname{Erf}(z, Z, a, t, \tau)$ , что и учтено в формуле (29). Это решение задачи распределения температуры в трехмерном пространстве при поверхностном нагреве прямоугольным индуктором с размерами  $X$  и  $Z$  и центром прямоугольника в начале координат. Этому решению с использованием формулы (29) посвящен пример 2.

$$\Theta(x, y, z, t) = \frac{p_v}{8c\gamma} \int_0^t \operatorname{Erf}(x, X, a, t, \tau) \cdot \left[ \sum_{\varepsilon=-L}^L \operatorname{Erf}(y - 2\varepsilon\Delta, Y, a, t, \tau) \right] \cdot \operatorname{Erf}(z, Z, a, t, \tau) d\tau. \quad (30)$$

Если удельная мощность не постоянна, а меняется во времени по некоторому закону  $p_v(\tau)$ , то эта

$$\Theta(x, y, z, t) = \int_0^t \frac{p_v(\tau)}{8c\gamma} \cdot \operatorname{Erf}(x, X, a, t, \tau) \cdot \left[ \sum_{\varepsilon=-L}^L \operatorname{Erf}(y - 2\varepsilon\Delta, Y, a, t, \tau) \right] \cdot \operatorname{Erf}(z, Z, a, t, \tau) d\tau. \quad (31)$$

Истинная температура в любой точке  $(x, y, z)$  пластины в процессе нагрева определяется по формуле

$$T(x, y, z, t) = \Theta(x, y, z, t) + T_0. \quad (32)$$

Здесь  $T_0$  – температура пластины перед началом нагрева.

Ограничимся рассмотрением случаев, когда при старте все точки пластины имеют одинаковую температуру. Учет начальных условий при заданном стартовом распределении температур  $T(x, y, z, 0)$  можно найти в работе [5].

Если источник нагрева отключается в момент  $t_n$ , то при  $t > t_n$  уравнение (31) дает закон процесса остывания пластины во всех ее точках.

При  $t > t_n$  мощность  $p_v(\tau)$  отсутствует, и при рассмотрении процессов остывания на этом интервале

$$T(x, y, z, t) = \int_0^{t_n} \frac{p_v(\tau)}{4c\gamma} \cdot \operatorname{Erf}(x, X, a, t, \tau) \cdot \left[ \sum_{\varepsilon=-L}^L \operatorname{Erf}(y - 2\varepsilon\Delta, Y, a, t, \tau) \right] d\tau + T_0, \quad (33)$$

так как последний множитель  $\operatorname{Erf}(z, Z, a, t, \tau)$  в (31) вырождается в  $\operatorname{erf}(\infty) - \operatorname{erf}(-\infty) = 2$ .

При индукционном нагреве токами высокой частоты глубина проникновения  $Y_0/2$  мала, и можно рассматривать процесс поверхностного нагрева с удельной поверхностной мощностью, Вт/м<sup>2</sup>, меняющейся во времени и связанной с удельной объемной мощностью, Вт/м<sup>3</sup>, соотношением

$$p_s(\tau) = p_v(\tau) \frac{Y_0}{2}. \quad (34)$$

Если этот же индуктор с конечными размерами  $X, Y$  и  $Z$  нагревает не полупространство, а неограниченную по осям  $x$  и  $z$  пластину с толщиной  $\Delta \geq Y/2$ , то для выполнения непроводящих тепло граничных условий необходимо ввести по методу Сирла бесконечное число зеркальных отражений вверх и вниз по оси  $y$ , отстоящих друг от друга на расстоянии  $2\Delta$  [4]. На практике достаточно учесть первые  $L$  отражений при  $L = 5 \dots 8$ . При этом выражение (24) приобретает вид:

величина должна подноситься под знак интеграла, и приращение температуры описывается уравнением:

времени верхний предел интегрирования должен быть заменен на  $t_n$ .

Интересен случай, когда осуществляется индукционный нагрев охватывающим индуктором труб большого диаметра с толщиной стенки  $\Delta$ . Мысленно разрезав трубу по образующей (вдоль оси  $x$ ) и распрямив ее, после устремления  $Z$  к бесконечности (таким образом вводится бесконечное число зеркальных отражений справа и слева от развернутой трубы для запираения поперечных тепловых потоков), приводим задачу к случаю нагрева пластины, рассмотренному выше, но неограниченной по оси  $z$  и с бесконечной длиной индуктора  $Z$ .

При этом из формул (31) и (32) получим (кривизной трубы можно пренебречь):

Этого достаточно, чтобы при переходе от объемного распределения источников тепла к приближению с плоским расположением источников тепла не изменялось количество тепла, поступающего в нагреваемое тело. Здесь уже  $p_s(\tau)$  – истинная меняющаяся во времени поверхностная мощность, проходящая через единицу поверхности в трубу. При этом все источники тепла располагаются в плоскости при  $y_0 = 0$ .

При переходе от  $p_v(\tau)$  к  $p_s(\tau)$  необходимо осуществить в (33) предельный переход, аналогичный (25), и сделать замену, указанную ниже:

$$\sum_{\varepsilon=-L}^L \text{Erf}(y - 2\varepsilon\Delta, Y, a, t, \tau) \rightarrow \frac{Y_0}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} \cdot \sum_{\varepsilon=-L}^L e^{-\frac{(y-2\varepsilon\Delta)^2}{4a(t-\tau)}}. \quad (35)$$

После этого, используя выражение (34), получаем решение задачи о распределении теплового поля в пластине с толщиной  $\Delta$  при нагреве плоским прямоугольным высокочастотным индуктором, у которого  $Z = \infty$  – длина индуктора;  $X$  – ширина настила

$$T(x, y, z, t) = \frac{1}{2c\gamma} \int_0^t \frac{p_s(\tau)}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} \text{Erf}(x, X, a, t, \tau) \cdot \sum_{\varepsilon=-L}^L e^{-\frac{(y-2\varepsilon\Delta)^2}{4a(t-\tau)}} d\tau + T_0. \quad (36)$$

Формула справедлива при отсутствии потерь тепла с поверхности пластины.

И, наконец, если в рассматриваемой задаче поверхностная удельная мощность изменяется по ши-

рина настила тока (по  $x_0$ ), то  $p_s(x_0, \tau)$  нужно вставить во внутренний интеграл по  $x_0$ , который также должен быть записан в общем виде, таком, как он записан в (17):

$$T(x, y, z, t) = \frac{1}{2c\gamma} \int_0^t \frac{\sum_{\varepsilon=-L}^L e^{-\frac{(y-2\varepsilon\Delta)^2}{4a(t-\tau)}}}{\pi a(t-\tau)} \int_{-X/2}^{X/2} p_s(x_0, \tau) e^{-\frac{(x_0-x)^2}{4a(t-\tau)}} dx_0 d\tau + T_0, \quad (37)$$

например:

$$p_s(x_0, \tau) = p_{m,s} \cos\left(\pi \frac{x_0}{X}\right) \sin(\omega\tau).$$

Здесь  $p_{m,s}$  – амплитудное значение удельной мощности  $p_s$ ;  $\omega$  – угловая частота.

Когда же индуктор имеет сложную форму, например, область расположения элементарных

источников тепла ограничена в плоскости  $y_0 = 0$  симметричной кривой  $Z = \pm f(x_0)$  и в общем случае, когда  $p_s(x_0, z_0, \tau)$  является функцией  $x_0, z_0, \tau$ , то интегралы уже не выражаются через интегралы вероятности, и решение для неограниченной пластины записывается в общем виде:

$$T(x, y, z, t) = \frac{1}{2c\gamma} \int_0^t \frac{\sum_{\varepsilon=-L}^L e^{-\frac{(y-2\varepsilon\Delta)^2}{4a(t-\tau)}}}{[\pi a(t-\tau)]^{\frac{3}{2}}} \int_{-X/2-f(x_0)}^{X/2} \int_{-f(x_0)}^{f(x_0)} p_s(x_0, z_0, \tau) e^{-\frac{(x_0-x)^2 + (z_0-z)^2}{4a(t-\tau)}} dz_0 dx_0 d\tau + T_0. \quad (38)$$

Например, для круглого индуктора без отверстия с радиусом  $R = X/2$  и центром окружности в начале координат функция  $f(x_0)$  имеет вид:

$$f(x_0) = \sqrt{R^2 - x_0^2}.$$

Если же по центру индуктора имеется отверстие с радиусом  $R_0$ , то внутренние интегралы в (38) приобретают вид:

$$\int_{-X/2}^{X/2} e^{-\frac{(x_0-x)^2}{4a(t-\tau)}} \left[ \int_{-f(x_0)}^{f(x_0)} p_s(x_0, z_0, \tau) e^{-\frac{(z_0-z)^2}{4a(t-\tau)}} dz_0 - \int_{-f_0(x_0)}^{f_0(x_0)} p_s(x_0, z_0, \tau) e^{-\frac{(z_0-z)^2}{4a(t-\tau)}} dz_0 \right] dx_0.$$

Здесь  $f_0(x_0) = \sqrt{R_0^2 - x_0^2}$ . Формально это соответствует введению в области отверстия источ-

ников отрицательного тепла (фиктивных стоков). Метод использования фиктивных стоков тепла

(тепловых черных дыр) подробно будет описан в следующих статьях.

Еще один случай, имеющий практические приложения, можно получить, рассматривая линейный источник нагрева. Этот случай наблюдается при дуговой наплавке ленточным электродом износостойкого слоя на поверхность пластины с толщиной  $\Delta$  (например, лемеха).

Рассмотрим упрощенный случай, когда ширина ленты равна ширине пластины (ширина – по оси  $z$ ). При этом для выполнения граничных условий на краях пластины (отсутствие потоков тепла через боковые торцы пластины) необходимо ввести бесконечное число зеркальных отражений вдоль оси  $z$ , и приходим к случаю бесконечно широких по оси  $z$  ленты и пластины.

Для перехода к линейному источнику нагрева устремим в (17)  $X$  к некоторому малому значению  $X_0$  и будем рассматривать процесс нагрева с удельной линейной мощностью, Вт/м, связанной с удельной поверхностной мощностью, Вт/м<sup>2</sup>, соотношением

$$p_l(\tau) = p_s(\tau) \frac{X_0}{2}. \quad (39)$$

$$T(x, y, z, t) = \frac{1}{c\gamma} \int_0^t \frac{p_l(\tau)}{\pi a(t-\tau)} e^{-\frac{x^2}{4a(t-\tau)}} \sum_{\varepsilon=-L}^L e^{-\frac{(y-2\varepsilon\Delta)^2}{4a(t-\tau)}} d\tau + T_0. \quad (41)$$

Все более сложные случаи решаются подобным образом. Если пластина ограничена с какой-то стороны, то вводятся соответствующие зеркальные отражения источников или стоков.

Следует обратить внимание на то, что, исходя из рассмотрения общего трехмерного случая, получаем упрощенные решения для двухмерных и одномерных задач как частные решения с помощью предельных переходов.

Приведенное здесь изложение теории метода тепловых источников не ставит целью охватить все случаи применения теории, а лишь иллюстрирует возможности модернизированного метода.

**Пример № 1.** Приведем решение задачи нагрева длинного стержня круглого поперечного сечения с торца при боковых поверхностях стержня, покрытых теплоизоляцией, с помощью формулы (28) при средних значениях теплофизических параметров стали  $\lambda = 47,14$  Вт/(м · К),  $a = 1,05 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с и постоянной удельной поверхностной мощности  $p_s = 250$  кВт/м<sup>2</sup>. Начальная температура стержня  $T_0 = 293$  К. Радиус стержня круглой формы  $R = 0,3$  м. Активная мощность высокочастотного индуктора  $P = p_s \pi R^2 = 71$  кВт. Время нагрева  $t_n = 90$  мин. За время

Здесь  $p_l(\tau)$  – истинная линейная мощность при линейном настиле тока. При этом линейный источник тепла располагается вдоль оси  $z_0$  при  $y_0 = 0$  и  $x_0 = 0$ .

В этом случае интеграл в (18) уже не выражается через интегралы вероятности, а может быть найден с помощью предельного перехода, аналогичного (25):

$$\lim_{\substack{X \rightarrow X_0 \\ x_0 \rightarrow 0}} \int_{-X/2}^{X/2} e^{-\frac{(x_0-x)^2}{4a(t-\tau)}} dx_0 = X_0 e^{-\frac{x^2}{4a(t-\tau)}}. \quad (40)$$

Для получения решения задачи нагрева пластины линейным источником тепла воспользуемся формулой (36), справедливой для пластины с  $Z = \infty$ . Для этого осуществим в (36) замену с учетом предельного перехода (40):

$$\text{Erf}(x, X, a, t, \tau) \rightarrow \frac{X_0}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} e^{-\frac{x^2}{4a(t-\tau)}}$$

После этого, используя (39), получаем решение задачи нагрева пластины линейным источником тепла:

нагрева необходимо прогреть стержень на глубине 0,2 м до температуры 950 К, при этом температура поверхности торца стержня не должна достигнуть температуры плавления (выполнение этого условия осуществляется подбором величины  $p_s$ ).

Подставляя эти значения параметров в уравнение (28) и полагая время  $t$  изменяющимся от 0 до  $t_n$ , получаем температурные кривые при нагреве стержня, а положив верхний предел интегрирования равным  $t_n$  и применяя интервал времени равным 90...140 мин, получаем температурные кривые при остывании стержня. Полученные кривые построены на рис. 2–4 для разных глубин  $l$  прогрева стержня на различных интервалах времени его нагрева и остывания (рис. 2 иллюстрирует стыковку решений при нагреве и остывании, рис. 3 – процессы при нагреве, рис. 4 – процессы при остывании после отключения индуктора в момент времени  $t = t_n$ ; на рис. 4 время остывания отсчитывается от момента выключения индуктора, под стартовым распределением температуры при остывании понимается распределение температуры в конце интервала нагрева стержня).

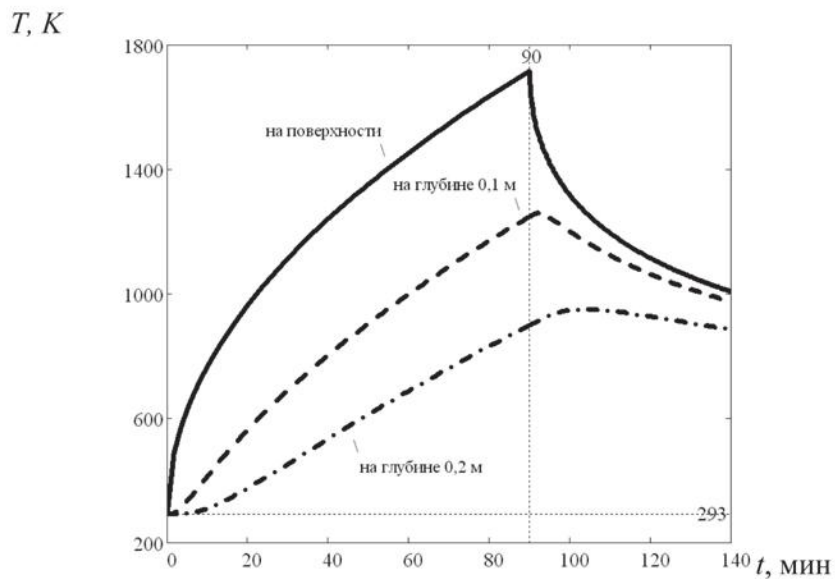


Рис. 2. Распределение температуры  $T$  на различных глубинах во времени  $t$  при нагреве и остывании стержня

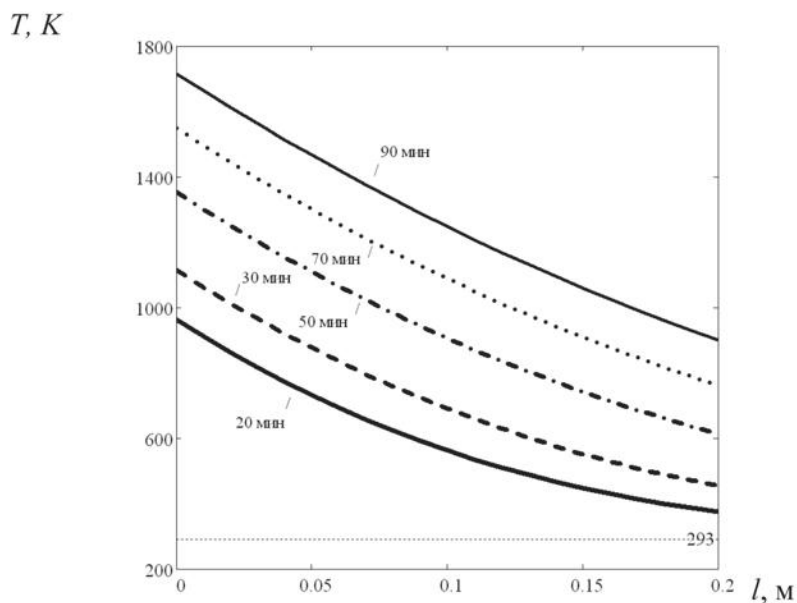


Рис. 3. Распределение температуры  $T$  по глубине  $l$  стержня в разные моменты времени при его нагреве

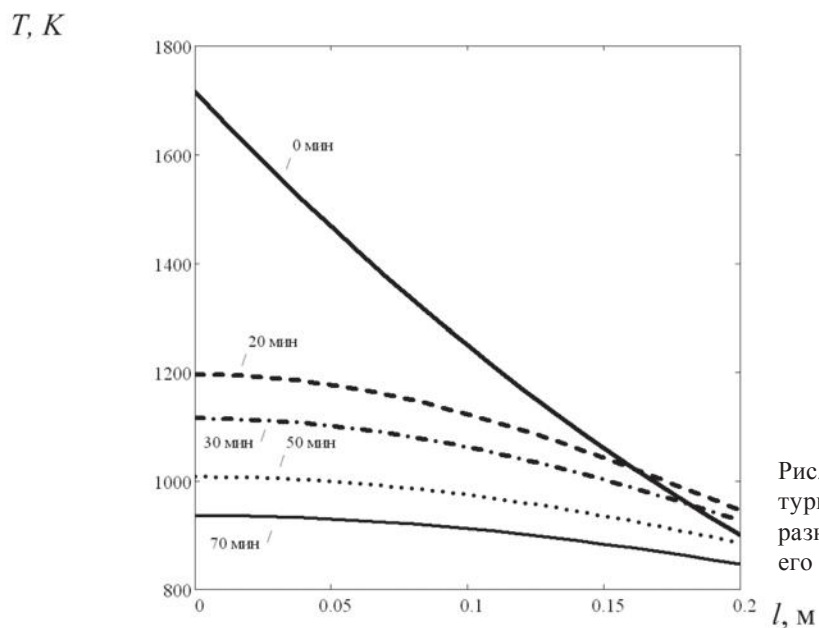


Рис. 4. Распределение температуры  $T$  по глубине  $l$  стержня в разные моменты времени при его остывании

**Пример № 2.** Рассмотрим решение задачи поверхностного нагрева нижнего неограниченного полупространства (сталь) прямоугольным индуктором с площадью  $XZ$  и длиной  $Z$ , расположенного над полупространством с центром в начале координат. Решение может быть получено с помощью формулы (29).

Начальная температура  $T_0$ , время нагрева  $t_n$  и средние значения теплофизических параметров те же, что и в примере 1. Размеры высокочастотного индуктора: ширина настила тока  $X = 0,1$  м, длина  $Z = 0,5$  м. Удельная поверхностная мощность постоянна и равна  $p_s = 600$  кВт/м<sup>2</sup>, активная мощность индуктора  $P = p_s XZ = 30$  кВт.

В этом примере ограничимся построением линий уровня температуры в момент отключения индуктора после нагрева в течение 90 мин. Распределение температур рассмотрим в вертикальной плоскости, проходящей через начало координат перпендикулярно оси  $z$ . Для этого в формуле (29) положим  $t = t_n$  (при этом функция (29) превращается в функцию только координат  $T(x,y,z)$ ) и, используя средства программы MathCAD [3], построим графики линий уровня температуры, см. рис. 5.

Размеры сторон квадратных ячеек на графике по вертикальной и горизонтальной оси  $x$  и  $y - 0,1$  м.

Узлы сетки следуют друг за другом с шагом 0,1 м. Температура в узлах сетки на графике линий уровня в момент отключения индуктора после 90 мин. нагрева приведена в таблице.

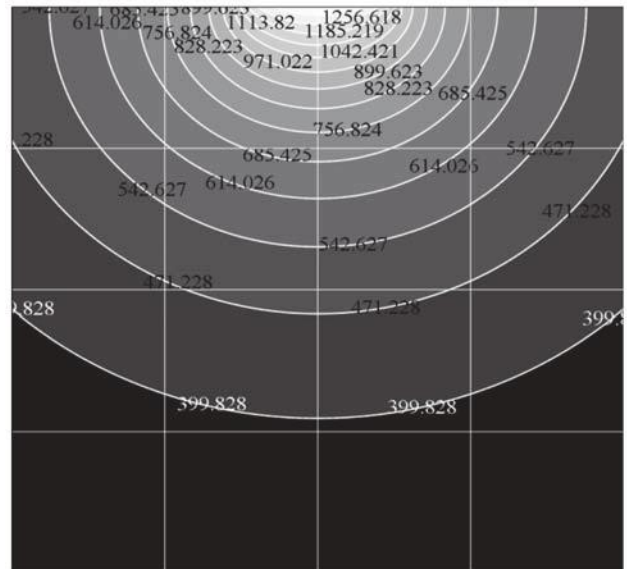


Рис. 5. Распределение температуры  $T$  [K] по глубине и ширине нижнего неограниченного полупространства при  $z = 0$  в момент отключения индуктора

**Температура [K] в узлах сетки на графике линий уровня (рис. 5) в момент отключения индуктора**

$T(0; 0; 0) = 1400$	$T(0,1; 0; 0) = 750$	$T(0,2; 0; 0) = 502$
$T(0; 0,1; 0) = 716$	$T(0,1; 0,1; 0) = 608$	$T(0,2; 0,1; 0) = 468$
$T(0; 0,2; 0) = 494$	$T(0,1; 0,2; 0) = 464$	$T(0,2; 0,2; 0) = 407$
$T(0; 0,3; 0) = 393$	$T(0,1; 0,3; 0) = 383$	$T(0,2; 0,3; 0) = 359$
$T(0; 0,4; 0) = 343$	$T(0,1; 0,4; 0) = 338$	$T(0,2; 0,4; 0) = 328$

**Выводы.** Предложен универсальный метод суммирования радиус-векторов в методе тепловых источников, что позволило расширить области применения метода, включив в нее все задачи электротермии и высокочастотного индукционного нагрева, используемых в электротехнических комплексах и системах, сделать метод более универсальным и легким в применении. Новый метод был проверен при решении ряда задач электротермии и показал высокую точность совпадения результатов расчета с опытными данными, а также с данными расчета прикладных компьютерных программ ведущих мировых фирм, использующих метод конечных элементов.

*Список литературы*

1. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке [Текст] / Н.Н. Рыкалин. – М.: Машгиз, 1951. – 297 с.
2. Фролов В.В. Теоретические основы сварки [Текст] / В.В. Фролов, В.А. Винокуров, В.Н. Волченко и др. Под. ред. В.В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1970. – 592 с.
3. Fourier J.B. Theorie analytique de la chaleur, Chez Firmin Didot, perf et fils / J.B. Fourier. – Paris, 1822. – 638 p.
4. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники: в 3 ч. Ч. 3: Теория электромагнитного поля. [Текст] / К.М. Поливанов. – М.: Энергия, 1969. – 352 с.

5. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности [Текст] / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

*References*

1. *Rykalin N.N.* Raschjoty teplovyh processov pri svarke [Tekst] / N.N. Rykalin. – М.: Mashgiz, 1951. – 297 s.

2. *Frolov V.V.* Teoreticheskie osnovy svarki [Tekst] / V.V. Frolov, V.A. Vinokurov, V.N. Volchenko i dr. / Pod. red. V.V. Frolova. – М.: Vysshaja shkola, 1970. – 592 s.

1970. – 592 s.

3. *Fourier J.B.* Theorie analitique de la chaleur, Chez Firmin Didot, perf et fils / J.B. Fourier. – Paris, 1822. – 638 p.

4. *Polivanov K.M.* Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: v 3 ch. Ch. 3: Teorija elektromagnitnogo polja. [Tekst] / K.M. Polivanov. – М.: Jenergija, 1969. – 352 s.

5. *Lykov A.V.* Teorija teploprovodnosti [Tekst] / A.V. Lykov. – М.: Vysshaja shkola, 1967. – 600 s.



**Хакимянов М.И.**  
**Hakimyanov M.I.**

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



**Гузеев Б.В.**  
**Guzeev B.V.**

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



**Рябишина Л.А.**  
**Ryabishina L.A.**

кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,  
Россия, г. Уфа

УДК 681.5:502:622.276

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ДОЖИМНЫХ И КУСТОВЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

В статье рассматриваются вопросы потребления электроэнергии центробежными насосами дожимных и кустовых насосных станций. Центробежные насосы систем поддержания пластового давления и внутрипромысловой перекачки нефти потребляют свыше 30% всей электроэнергии, расходуемой нефтегазодобывающими предприятиями. Поэтому оптимизация их режимов работы позволит обеспечить значительную экономию электроэнергии и снизить себестоимость добываемой нефти.

Рассмотрены технологические схемы систем поддержания пластового давления и промышленного сбора нефти. В настоящее время широко используются блочные кустовые насосные станции, в которых регулирование потоков воды в нагнетательные скважины осуществляется с использованием штуцеров. Для сбора нефти используются системы с подготовкой нефти в газонасыщенном состоянии на центральном сборном пункте.

Авторы выводят формулы удельного расхода электроэнергии при перекачке жидкостей относительно объемного и массового расходов жидкости, а также относительно расстояния перекачки. Анализируются потери во всех элементах насосной установки: электродвигателе, трансформаторе и центробежном насосе. Приблизительно потери в этих элементах могут быть оценены через их КПД, однако для более точного расчета необходимо иметь дополнительные параметры: полезную мощность, коэффициент загрузки и другие.



На потребляемую мощность влияют такие параметры, как режимный коэффициент, вязкость и плотность жидкости, конфигурация трубопровода, снижение КПД насосов при последовательном и параллельном соединении, а также в результате их износа.

В статье отмечается, что наиболее оптимальным способом повышения эффективности работы насосного оборудования является использование частотно-регулируемого электропривода. Плавное регулирование скорости вращения насосов позволяет исключить такие энергетически неэффективные способы регулирования, как дросселирование и циклическую перекачку, повысить загрузку электродвигателя.

Основной целью расчетов по определению удельного энергопотребления является оценка энергетической эффективности работы насосного оборудования, планирование потребления электроэнергии, а также разработка энергосберегающих мероприятий для внедрения на предприятиях отрасли.

*Ключевые слова:* центробежный насос, насосная станция, электропривод, частотно-регулируемый электропривод, удельное энергопотребление, энергоэффективность.

## METHODOLOGICAL BASES CALCULATION OF POWER CONSUMPTION OF ELECTRIC DRIVES BOOSTER AND GROUP PUMPING STATION

The paper describes the energy consumption of centrifugal pumps of booster pump stations and group pumping stations. Centrifugal pumps systems to maintain reservoir pressure and oil pumping infield consume over 30% of all electricity used by oil and gas companies. Therefore, optimization of their operation modes will provide significant energy savings and reduce the cost of crude oil.

Considered technological schemes of reservoir pressure maintenance and oil field gathering. In currently widely used block booster pump station in which the controlling of water flows into the injection hole is performed using nozzles. Oil recovery systems are used in the preparation of oil gas-saturated state at the central collection point.

The authors derive formulas specific energy consumption for pumping liquids with respect to volume and mass flow rate, as well as on the distance pumping. Analyzed losses in all elements of the pumping unit: electric motors, transformers and a centrifugal pumps. Approximately losses in these elements can be assessed through their performance, but for a more accurate calculation is necessary to have additional parameters: effective power, load factor and others. On the power consumption is affected by such parameters as the modal coefficient, viscosity and density of the fluid, conduit configuration, decreased efficiency of the pumps in series and parallel connection, and as a result of aging.

The article notes that the best way to improve the efficiency of the pumping equipment is the use of variable frequency drive. Smooth speed control of pumps avoids such energy inefficient ways of regulation as choking and cyclic pumping, increase the load of the motor.

The main purpose of the calculations to determine the specific energy consumption is to assess the energy efficiency of the pumping equipment, planning energy consumption, and the development of energy-saving measures for the introduction of the industry enterprises.

*Key words:* centrifugal pump, pump station, electric drive, variable speed drive, specific energy consumption, energy efficiency.

Известно, что свыше 30% всей электроэнергии, потребляемой нефтегазодобывающими предприятиями (НГДП), расходуется на перекачку воды и нефти в системах поддержания пластового давления (ППД) и внутрипромысловой перекачки нефти (ВПН) соответственно [1, 2].

Из этого следует, что в себестоимости добываемых углеводородов значительную часть составляет стоимость электроэнергии, потребляемой электроприводами насосов систем ППД и ВПН. Соответственно, при планировании объемов потребляемой НГДП электроэнергии, а также при разработке энергосберегающих мероприятий требуется с мак-

симальной точностью рассчитывать потребление электроэнергии насосами систем ППД и ВПН.

Типовая технологическая схема системы ППД представлена на рисунке 1. На схеме условно изображена блочная кустовая насосная станция (БКНС) с напорной гребенкой, а также высоконапорный водовод, водораспределительные пункты (ВРП) и нагнетательные скважины. Регулирование потоками воды в нагнетательные скважины осуществляется с использованием штуцеров.

На БКНС применяют высоконапорные насосные агрегаты с многоступенчатыми центробежными насосами типов ЦНС 180, ЦНС 630, НЦС 300,

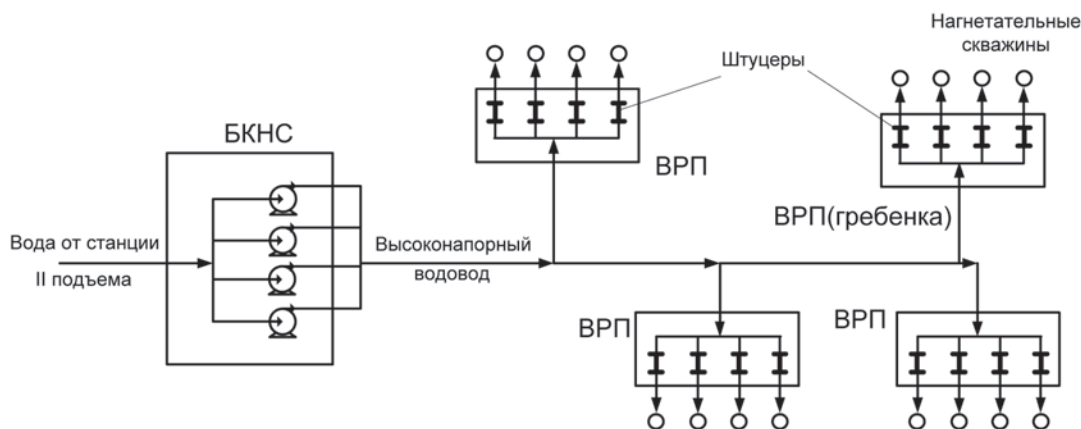


Рис. 1. Типовая технологическая схема системы ППД

ЦНСА63-1400УХЛ4 и другие. Число насосных агрегатов может устанавливаться от 2 до 6 с давлением нагнетания 9; 5 и 19 МПа. Наибольшее применение получили БКНС с четырьмя насосными агрегатами. Центробежные насосы типа ЦНС 180 допускают изменение рабочей характеристики посредством уменьшения числа ступеней (не более 2) с установкой проставочных втулок, без изменения привязочных размеров, с обязательной динамической балансировкой ротора. Электропривод насосов КНС осуществляется с помощью высоковольтных синхронных и асинхронных электродвигателей. Используются синхронные двигатели серий СТД, СТДМ, СТДП, СТД2 с разомкнутым или замкнутым циклом вентиляции. Применяются также высоковольтные асинхронные электродви-

гатели с короткозамкнутым ротором типов 2АРМ, 2АЗМП, 4АЗМ, 4АЗМП, ВАО и другие. Напряжение питания электродвигателей 6 или 10 кВ.

Современная напорная система промышленного сбора нефти изображена на рисунке 2. В данной системе перед сепаратором первой ступени в поток вводят реагент-демульгатор, разрушающий водонефтяную эмульсию. Это позволяет отделить основное количество воды от продукции скважин на дожимной насосной станции (ДНС). На центральном сборном пункте (ЦСП) установка комплексной подготовки нефти (УКПН) расположена перед сепаратором второй ступени. Это связано с тем, что нефть, содержащая растворенный газ, имеет меньшую вязкость, что обеспечивает более полное отделение воды от нее.

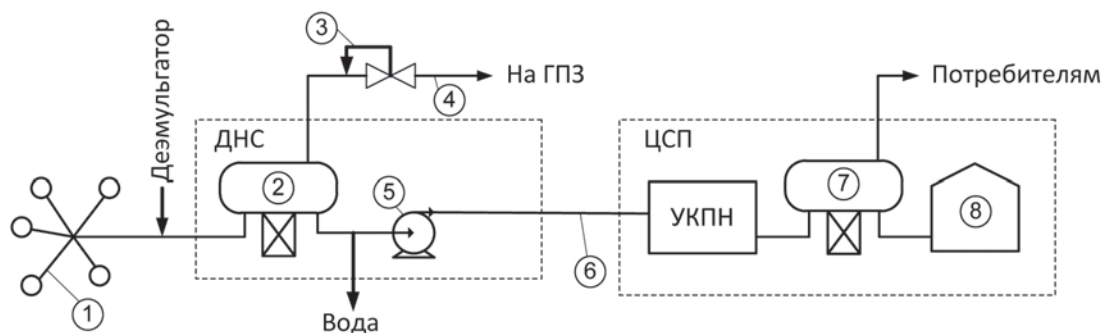


Рис. 2. Схема системы промышленного сбора нефти с подготовкой нефти в газонасыщенном состоянии на ЦСП: 1 – скважины; 2 – сепаратор первой ступени; 3 – регулятор давления типа «до себя»; 4 – газопровод; 5 – насос; 6 – нефтепровод; 7 – сепаратор второй ступени; 8 – резервуар

На ДНС устанавливаются центробежные насосы секционные серии ЦНС, одноступенчатые серий Д, 1Д, 2Д, нефтяные подпорные вертикальные типа НПВ и другие. Для электропривода насосов на ДНС используются в основном низковольтные асинхронные двигатели серий ВАО, ВАО2, АИММ, 4А, 5А и другие.

Таким образом, в системах ВПН и ППД используются, главным образом, многосекционные центробежные насосы с приводом от синхронных и асинхронных электродвигателей различной мощности.

Полезная мощность насоса при перекачке жидкости определяется по формуле:

$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H, \quad (1)$$

где  $P$  – полезная мощность, Вт;  $Q$  – подача насоса, м<sup>3</sup>/с;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>;  $H$  – полный напор с учетом высоты всасывания, м.

Удельный объемный расход энергии при перекачке жидкости определяется как отношение энергии к объему жидкости:

$$W_{уд.об.} = \frac{P \cdot t}{Q \cdot t} = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot t}{Q \cdot t} = \rho \cdot g \cdot H, \quad (2)$$

где  $W_{уд.об.}$  – удельный объемный расход энергии, Дж/м<sup>3</sup>;  $t$  – время перекачки, с.

$$W_{уд.об.} = \rho \cdot g \cdot H = \frac{9,8 \cdot \rho \cdot H}{3600 \cdot 10^3} = \frac{\rho \cdot H}{367,2 \cdot 10^3} = 2,723 \cdot 10^{-6} \cdot \rho \cdot H, \quad (4)$$

$$W_{уд.м.} = g \cdot H = \frac{9,8 \cdot H}{3600 \cdot 10^3} = \frac{H}{367,2 \cdot 10^3} = 2,723 \cdot 10^{-6} \cdot H, \quad (5)$$

где  $W_{уд.об.}$  – удельный объемный расход энергии, кВт·ч/м<sup>3</sup>;  $W_{уд.м.}$  – удельный массовый расход энергии, кВт·ч/кг; 3600 – количество секунд в часе; 10<sup>3</sup> – переход от Вт к кВт; 9,8 – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>; 2,723 – коэффициент, появление ко-

При определении удельного массового расхода энергия приводится к массе перекаченной жидкости:

$$W_{уд.м.} = \frac{P \cdot t}{Q \cdot \rho \cdot t} = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot t}{Q \cdot \rho \cdot t} = g \cdot H, \quad (3)$$

где  $W_{уд.м.}$  – удельный объемный расход энергии, Дж/кг.

При переходе от джоулей к кВт·ч, традиционно используемым в энергетике, а также после подстановки численного значения ускорения свободного падения  $g$  в формулах (2) и (3) появляются переводные коэффициенты:

того обусловлено переходом от секунд к часам и учетом ускорения свободного падения.

При трубопроводном транспорте нефти и жидкости расход энергии приводится не только к количеству перекаченной продукции, но и к расстоянию:

$$W_{уд.об.} = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{L} = \frac{9,8 \cdot \rho \cdot H}{3600 \cdot 10^3 \cdot L} = \frac{\rho \cdot H}{367,2 \cdot 10^3 \cdot L} = 2,723 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\rho \cdot H}{L}, \quad (6)$$

$$W_{уд.м.} = \frac{g \cdot H}{L} = \frac{9,8 \cdot H}{3600 \cdot 10^3 \cdot L} = \frac{H}{367,2 \cdot 10^3 \cdot L} = 2,723 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{H}{L}, \quad (7)$$

где  $W_{уд.об.}$  – удельный объемный расход энергии на перекачку по участку трубопровода длиной один метр, кВт·ч/(м<sup>3</sup>·м);  $W_{уд.м.}$  – удельный массовый расход энергии на перекачку по участку трубопровода длиной один метр, кВт·ч/(кг·м);  $L$  – геометрическая длина трубопровода, м.

При больших объемах перекачки на значительные расстояния могут использоваться другие единицы измерения удельного расхода энергии – кВт·ч/(м<sup>3</sup>·км) и кВт·ч/(т·км) [3].

В формулах (1–7) учитывается только полезная мощность, расходуемая на перекачку жидкости. Однако при определении удельного энергопотребления насосных станций необходимо учитывать еще и потери мощности. Структурная схема потерь в насосных агрегатах КНС и ДНС приведена на рисунке 3. Потери имеют место в следующих структурных элементах насосной станции:

- насос;
- электродвигатель;
- трансформатор.

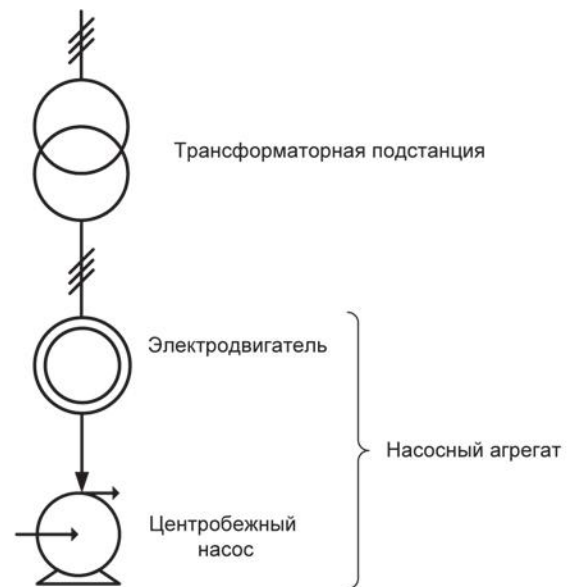


Рис. 3. Структурная схема потерь энергии в насосных станциях

Тогда мощность, потребляемая при перекачке нефти из сети, исходя из формулы (1) составит:

$$P_{\text{ПОТР}} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{\Pi}}{\eta_{\text{НАС}} \cdot \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{ТР}}}, \quad (8)$$

где  $P_{\text{ПОТР}}$  – мощность, потребляемая из сети, Вт;  $H_{\Pi}$  – полные потери напора по трубопроводу, м;  $\eta_{\text{НАС}}$  – КПД насоса;  $\eta_{\text{ЭД}}$  – КПД двигателя;  $\eta_{\text{ТР}}$  – КПД трансформатора.

Следует отметить, что при перекачке нефти учитывают такие параметры, как режимный коэффициент, вязкость и плотность нефти, конфигурацию трубопровода, изменение КПД насосов при последовательном и параллельном соединении, а также в результате их выработки [4].

Потери электроэнергии в двигателе определяют, используя зависимость его КПД от загрузки. Коэффициент загрузки находится как отношение мощности на валу ЭД к номинальной мощности.

Потери активной и реактивной мощностей в трансформаторах разделяются на потери в стали и потери в меди (нагрузочные потери). Потери в стали – это потери в проводимостях трансформаторов. Они зависят от приложенного напряжения. Нагрузочные потери – это потери в сопротивлениях трансформаторов, зависящие от тока нагрузки.

Потери активной мощности в стали трансформаторов – это потери на перемагничивание и вихревые токи. Определяются потерями холостого хода трансформатора, которые приводятся в его паспортных данных.

Таким образом, потери мощности в двухобмоточном трансформаторе равны:

$$\Delta P_{\text{ТР}} = \Delta P_{\text{Х}} + \Delta P_{\text{МД}} = \Delta P_{\text{Х}} + \Delta P_{\text{К}} \left( \frac{S}{S_{\text{НОМ}}} \right)^2, \quad (9)$$

где  $\Delta P_{\text{Х}}$  – потери холостого хода, приведенные в паспортных данных, Вт;  $\Delta P_{\text{К}}$  – потери короткого замыкания, приведенные в паспортных данных, Вт;  $S_{\text{НОМ}}$  – номинальная полная мощность трансформатора, В·А;  $S$  – мощность нагрузки трансформатора, В·А.

Как уже отмечалось выше, удельный расход электроэнергии при трубопроводном транспорте может быть вычислен относительно объемного или массового расхода жидкости, а также относительно расстояния перекачки.

Удельный объемный расход электроэнергии  $W'$  (кВт·ч/м<sup>3</sup>):

$$W'_{\text{ОБ}} = \frac{P_{\text{НАС}} + \Delta P_{\text{ЭД}} + \Delta P_{\text{ТР}}}{Q} \cdot 10^{-3}, \quad (10)$$

где  $P_{\text{НАС}}$ ,  $\Delta P_{\text{ЭД}}$ ,  $\Delta P_{\text{ТР}}$  – потребляемая насосом мощность, потери мощности в электродвигателе и

трансформаторе, Вт;  $Q$  – расход жидкости, м<sup>3</sup>/ч.

Удельный массовый расход электроэнергии  $W'$  (кВт·ч/кг):

$$W'_{\text{ОБ}} = \frac{P_{\text{НАС}} + \Delta P_{\text{ЭД}} + \Delta P_{\text{ТР}}}{\rho \cdot Q} \cdot 10^{-3}. \quad (11)$$

Удельная норма  $W'$  (кВт·ч/(кг·м)) потребления электроэнергии на единицу длины нефтепровода основана на формуле (7):

$$W' = \frac{P_{\text{НАС}} + \Delta P_{\text{ЭД}} + \Delta P_{\text{ТР}}}{\rho \cdot Q \cdot L} \cdot 10^{-3}. \quad (12)$$

Основной целью расчетов по определению удельного энергопотребления является оценка энергетической эффективности работы оборудования КНС и ДНС, планирование потребления электроэнергии ПГДП, а также разработка энергосберегающих мероприятий [5, 6].

Одним из основных способов повышения эффективности работы насосного оборудования является внедрение частотно-регулируемого электропривода [7, 8]. Плавное регулирование скорости вращения насосов позволяет исключить такие энергетически неэффективные способы регулирования, как дросселирование и циклическую перекачку, повысить загрузку электродвигателя.

Таким образом, могут быть сделаны следующие выводы:

1. Технологические процессы трубопроводной перекачки воды и нефти в системах ППД и ВПН на НГДП являются весьма энергоемкими – на них приходится свыше 30% всей потребляемой электроэнергии, следовательно, они обладают значительным потенциалом для энергосбережения.

2. Потери мощности происходят в следующих элементах: в самом центробежном насосе, электродвигателе, трансформаторе. Приблизительно потери в этих элементах могут быть оценены через их КПД, однако для более точного расчета необходимо иметь дополнительные параметры: полезную мощность, коэффициент загрузки и другие.

3. На потребляемую насосом мощность влияют такие параметры, как режимный коэффициент, вязкость и плотность жидкости, конфигурация трубопровода, снижение КПД насосов при последовательном и параллельном соединении, а также в результате их износа.

4. Удельный расход электроэнергии при трубопроводном транспорте воды и нефти может быть вычислен относительно объемного или массового расхода жидкости, а также относительно расстояния перекачки.

5. Наиболее оптимальным способом повыше-

ния эффективности работы насосного оборудования является внедрение частотно-регулируемого электропривода.

#### Список литературы

1. *Ивановский В.Н.* Энергетика добычи нефти: основные направления оптимизации энергопотребления [Текст] / В.Н. Ивановский // Инженерная практика. – 2011. – № 6. – С. 18–26.
2. *Хакимьянов М.И.* Анализ потребления электроэнергии при механизированной добыче нефти электроцентробежными насосами [Текст] / М.И. Хакимьянов, И.Н. Шафиков // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 3. – С. 37–41.
3. *Акбердин А.М.* К определению расхода электроэнергии на объектах магистральных нефтепроводов [Текст] / А.М. Акбердин, А.В. Сазонов, В.И. Еронен, А.С. Рахимов // Нефтегазовое дело. – 2006. – Т. 4. – № 1. – С. 133–142.
4. *РД 39-075-04.* Методики расчета потребления электроэнергии на транспортирование нефти по магистральным нефтепроводам [Текст]. – Уфа: ГУП «ИПТЭР», 2004.
5. *Соколов С.М.* Проблемы энергосбережения в нефтедобыче Западной Сибири [Текст] / С.М. Соколов, В.А. Горбатилов, В.П. Фрайштетер // Нефтяное хозяйство. – 2010. – № 3. – С. 92–95.
6. *Павлов Г.А.* О проблемах энергосбережения и энергоэффективности в системах поддержания пластового давления [Текст] / Г.А. Павлов, В.А. Горбатилов // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 7. – С. 118–119.
7. *Хакимьянов М.И.* Анализ использования частотно-регулируемого электропривода в нефтегазовой промышленности по результатам патентного поиска [Текст] / М.И. Хакимьянов, Б.В. Гузеев // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 4. – С. 30–41. – URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov\\_6.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_6.pdf).
8. *Гузеев Б.В.* Структурные схемы современных высоковольтных преобразователей частоты [Текст] / М.И. Хакимьянов, Б.В. Гузеев // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 2. – С. 4–11. – URL: <http://www.ogbus.ru/authors/Guzeev/>

Guzeev\_2.pdf.

#### References

1. *Ivanovskij V.N.* Jenergetika dobychi nefiti: osnovnye napravlenija optimizacii jenergotreblenija [Tekst] / V.N. Ivanovskij // Inzhenernaja praktika. – 2011. – № 6. – S. 18–26.
2. *Hakim'janov M.I.* Analiz potreblenija jelektrojenergii pri mehanizirovannoj dobyche nefiti jelektrocentrobezhnymi nasosami [Tekst] / M.I. Hakim'janov, I.N. Shafikov // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – T. 9. – № 3. – S. 37–41.
3. *Akberdin A.M.* K opredeleniju rashoda jelektrojenergii na ob#ektah magistral'nyh nefteprovodov [Tekst] / A.M. Akberdin, A.V. Sazonov, V.I. Eronen, A.S. Rahimov // Neftegazovoe delo. – 2006. – T. 4. – № 1. – S. 133–142.
4. *RD 39-075-04.* Metodiki rascheta potreblenija jelektrojenergii na transportirovanie nefiti po magistral'nyh nefteprovodam [Tekst]. – Ufa: GUP «IPTeR», 2004.
5. *Sokolov S.M.* Problemy jenergosberezenija v neftedobyche Zapadnoj Sibiri [Tekst] / S.M. Sokolov, V.A. Gorbatikov, V.P. Frajshteter // Neftjanoe hozjajstvo. – 2010. – № 3. – S. 92–95.
6. *Pavlov G.A.* O problemah jenergosberezenija i jenergojefektivnosti v sistemah podderzhanija plastovogo davlenija [Tekst] / G.A. Pavlov, V.A. Gorbatikov // Neftjanoe hozjajstvo. – 2011. – № 7. – S. 118–119.
7. *Hakim'janov M.I.* Analiz ispol'zovanija chastotno-reguliruemogo jelektroprivoda v neftegazovoj promyshlennosti po rezul'tatam patentnogo poiska [Tekst] / M.I. Hakim'janov, B.V. Guzeev // Jelektronnyj nauchnyj zhurnal "Neftegazovoe delo". – 2011. – № 4. – S. 30–41. – URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov\\_6.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_6.pdf).
8. *Guzeev B.V.* Strukturnye shemy sovremennyh vysokovol'tnyh preobrazovatelej chastoty [Tekst] / M.I. Hakim'janov, B.V. Guzeev // Jelektronnyj nauchnyj zhurnal "Neftegazovoe delo". – 2012. – № 2. – S. 4–11. – URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Guzeev/Guzeev\\_2.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Guzeev/Guzeev_2.pdf).



**Рогинская Л.Э.**  
**Roginskaya L.E.**

*доктор технических наук, профессор  
кафедры «Электромеханика»  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный  
авиационный технический университет»,  
Россия, г. Уфа*



**Горбунов А.С.**  
**Gorbunov A.S.**

*аспирант кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВПО «Уфимский  
государственный авиационный  
технический университет»,  
Россия, г. Уфа*



**Ялалова З.И.**  
**Yalalova Z.I.**

*аспирант кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВПО  
«Уфимский государственный  
авиационный технический университет»,  
Россия, г. Уфа*

УДК 621.314.25

## УЛУЧШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С СЕТЬЮ И НАГРУЗКОЙ С ПОМОЩЬЮ МНОГОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В статье рассмотрено применение многофазных фазопреобразующих трансформаторов для улучшения электромагнитной совместимости полупроводниковых преобразователей с сетью и нагрузкой, т.е. для уменьшения коэффициента гармоник переменного тока и обеспечения малых значений амплитуды пульсаций выпрямленного напряжения. Приведены схемы многофазных трансформаторов, преобразующих, для примера, число фаз  $3 \rightarrow 9$  и  $3 \rightarrow 12$ , даны векторные диаграммы вторичных фазных напряжений. Для исследования электромагнитных процессов, происходящих в подобных трансформаторах, применена математическая модель, представляющая собой систему дифференциальных уравнений первичных и вторичных напряжений и систему уравнений магнитодвижущих сил (МДС). С помощью компьютерного моделирования в пакете Matlab, с использованием библиотек Simulink и SimPowerSystems, на основании систем уравнений напряжений и систем уравнений МДС, при помощи блоков из указанных библиотек пакета Matlab разработаны имитационные модели фазопреобразующих трансформаторов при их совместной работе с многофазными выпрямителями. Созданные модели позволяют определить мгновенные и действующие значения потребляемых токов, токов фазопреобразующих трансформаторов, мгновенные значения напряжений вторичных обмоток, а также мгновенные и средние значения выпрямленных напряжений и токов. При этом моделирование работы трансформаторов проводилось как при идеальной коммутации полупроводниковых приборов, так и при реальной коммутации вентилей, то есть с учетом их времени переключения. Сопоставлены полученные результаты при идеальной и реальной коммутации. С помощью пакета Matlab был произведен гармонический анализ кривой тока, потребляемого многофазными трансформаторами, по итогам которого было определено содержание высших гармоник в кривых потребляемого тока, а также величины высших гармоник. Определены основные показатели качества преобразования электрической энергии, коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения фазопреобразующих трансформаторов. Полученные при моделировании спектры и величины гармонических составляющих совпали с расчетными. Например, коэффициент пульсаций выпрямительного устройства с девятифазным трансформатором не превышает 0,0036.

*Ключевые слова:* электромагнитная совместимость, фазопреобразующий трансформатор, преобразование числа фаз, полупроводниковый преобразователь, выпрямитель, преобразование электрической энергии, математическая модель, компьютерное моделирование, гармонический анализ, коэффициент пульсаций.

## IMPROVING OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF CONVERTER DEVICES WITH MAINS AND LOAD USING MULTIPHASE TRANSFORMERS

In the article use of multi-phase phase-reformative transformers to improve electromagnetic compatibility of semiconductor converters with mains and a load, i.e. to reduce the harmonic factor of alternating current and ensuring small values of amplitude of pulsations of rectified voltage was discussed. We provided diagrams of the multiphase transformers, transforming, for example, number of phases 3→9 and 3→12, and vector diagrams of secondary phase voltages. For research of electromagnetic processes in such transformers, we applied a mathematical model which is system of differential equations of primary and secondary voltages and system of equations of magnetomotive force (MMF). By means of computer modeling Matlab software package, with use of Simulink and SimPowerSystems libraries, based on systems of equations of voltages and systems of equations of MMF, using blocks from the specified libraries of Matlab software package, we developed simulation models of phase-reformative transformers working together with multiphase rectifiers. The created models allow us to define the instantaneous and effective values of consumed currents, currents of phase-reformative transformers, the instantaneous values of voltages of secondary windings, and also the instantaneous and average values of rectified voltages and currents. Modeling of operation of transformers was carried out both in case of ideal switching of semiconductor devices, and in case of real switching of rectifier valves, that is taking into account their switching time. The received results are compared in case of ideal and real switching. By means of a Matlab software package, harmonic analysis of a curve of the current consumed by multiphase transformers was made, following the results of which we defined the presence of the higher harmonics in curves of consumed current, and also values of the higher harmonics. The main figures of merit of conversion of electrical energy, ripple factor of rectified voltage of phase-reformative transformers are defined. Obtained by modeling the spectra and the magnitude of harmonic components coincided with calculated values. For example, ripple factor of rectifying device with the nine-phase transformer doesn't exceed 0,0036.

*Key words:* electromagnetic compatibility, phase-reformative transformer, conversion of number of phases, semiconductor converter, rectifier, conversion of electrical energy, mathematical model, computer modeling, harmonic analysis, ripple factor.

### Введение

В настоящее время в промышленности существенно расширяется применение потребителей постоянного и многофазного переменного тока, в связи с чем увеличивается область применения полупроводниковых преобразователей. Особенностью данных преобразователей является то, что потребляемый переменный ток отличен от синусоидального. При работе полупроводниковых преобразователей в качестве выпрямителей коэффициент пульсаций их выходного напряжения без принятия специальных мер, даже при трехфазном выпрямлении, коэффициент гармоник превышает установленные ГОСТом значения. В качестве мощных потребителей выпрямленного напряжения выступают, например, установки для получения алюминия. Перечисленные недостатки объясняются наличием в преобразователях полупроводниковых вентилях, обладающих нелинейными свойствами. Работа таких преобразователей отрицательно влияет на качество электрической энергии. В связи с этим возникает проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) полупроводниковых преобразователей с сетью и нагрузкой [1].

В качестве одной из мер уменьшения коэффициента гармоник переменного тока и обеспечения

малых значений амплитуды пульсаций выпрямленного напряжения можно использовать многофазные системы преобразования энергии.

Для работы многофазных схем выпрямления необходим источник многофазной системы напряжений. В качестве такого источника целесообразно использовать преобразователи числа фаз трехфазной системы напряжений в многофазную систему с помощью фазопреобразующих трансформаторов.

Применение многофазных трансформаторов позволяет улучшить форму кривой первичного тока, приближая ее к синусоидальной, а при применении полупроводниковых преобразователей – форму выходного напряжения, что позволяет улучшить электромагнитную совместимость нагрузки с сетью или источником питания.

### Исследование фазопреобразующих трансформаторов

Рассмотрим электромагнитные процессы в трансформаторном преобразователе числа фаз (ТПЧФ) на примере преобразования трехфазной системы в девятифазную и двенадцатифазную системы.

Для формирования выходной девятифазной системы напряжений в таком преобразователе необходимо получить фазовый сдвиг  $40^\circ$ , который может быть получен с помощью трех вторичных обмоток с

числом витков  $w$ ,  $0,396w$ ,  $0,743w$ , напряжения обмоток сдвинуты на  $120^\circ$ ,  $w$  – число витков в обмотках исходной трехфазной системы [2]. Принципиальная схема такой системы «сеть – полупроводниковый преобразователь – нагрузка» представлена на рис. 1а. Устройство включает в себя первичную трехфазную обмотку, соединенную в звезду, а также три

вторичные обмотки, напряжения которых образуют девятифазную систему, причем одна вторичная обмотка соединена в звезду, а две другие в зигзаг [3]. На рис. 1б представлена схема расположения обмоток на стержнях магнитопровода. На рис. 1в представлена векторная диаграмма системы напряжений девятифазного ТПЧФ.

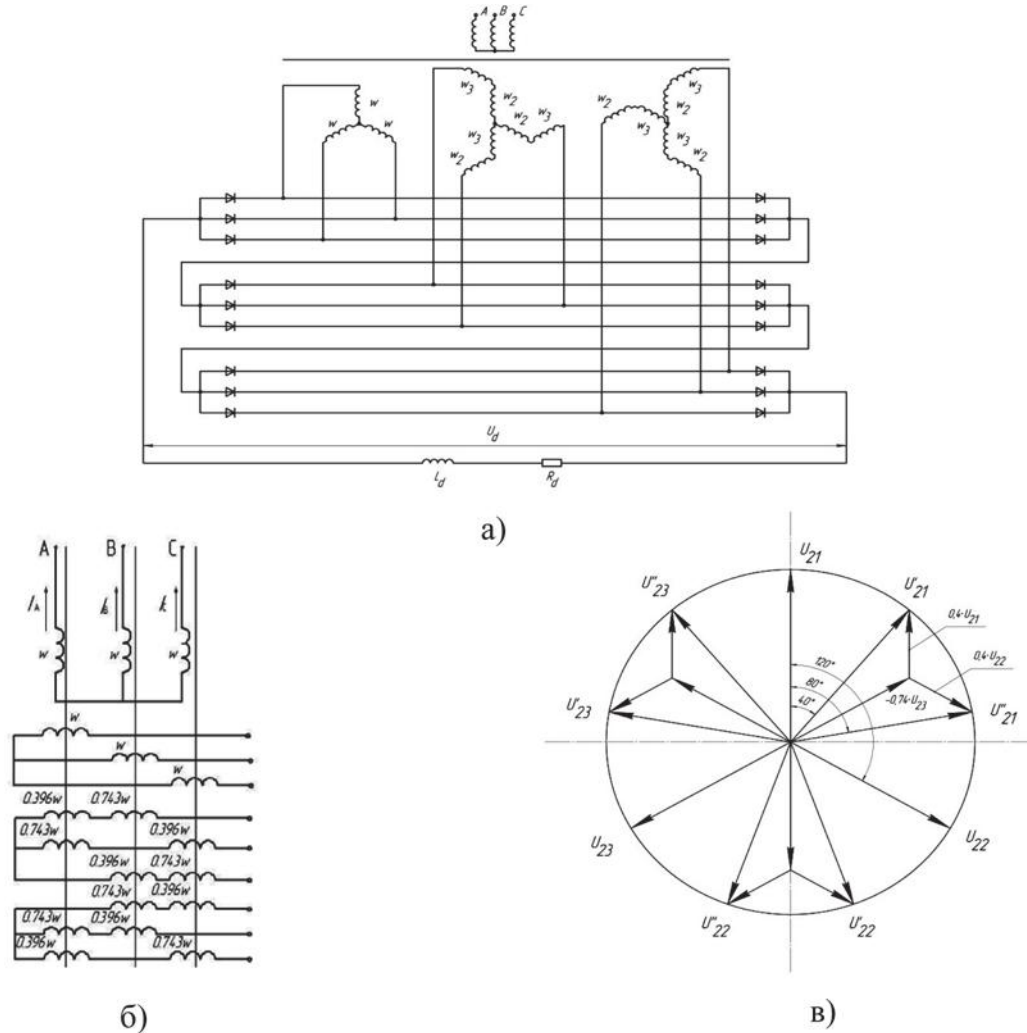


Рис. 1. Схемы трансформаторного преобразователя числа фаз 3→9:

а) принципиальная схема; б) схема расположения обмоток на стержнях магнитопровода; в) векторная диаграмма

Рассмотрим подробнее электромагнитные процессы, происходящие в ТПЧФ. Работа такого устройства описывается системой дифференциальных уравнений напряжений, а также системой уравнения для магнитодвижущих сил (МДС). Уравнения МДС ТПЧФ (3→9):

$$\begin{cases} i_{11}w_1 + i_{21}w_{21} + i'_{21}w_{22} - i''_{22}w_{23} + i''_{23}w_{22} - i''_{22}w_{23} = F_A; \\ i_{12}w_1 + i_{22}w_{21} - i'_{23}w_{23} + i'_{22}w_{22} - i''_{21}w_{22} + i''_{23}w_{22} = F_B; \\ i_{13}w_1 + i_{23}w_{21} - i'_{21}w_{23} + i'_{23}w_{22} + i''_{22}w_{22} - i''_{21}w_{23} = F_C. \end{cases} \quad (1)$$

Уравнения первичной цепи:

$$i_{11} + i_{12} + i_{13} = 0; \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_{12} = i_{11}R_1 + L_{s1} \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_1}{dt} - i_{12}R_1 - L_{s1} \frac{di_{12}}{dt} - w_1 \frac{d\Phi_2}{dt}; \\ u_{23} = i_{12}R_1 + L_{s1} \frac{di_{12}}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_2}{dt} - i_{13}R_1 - L_{s1} \frac{di_{13}}{dt} - w_1 \frac{d\Phi_3}{dt}. \end{cases} \quad (3)$$

Уравнения вторичной цепи:

1-я трехфазная система:

$$\begin{cases} u_{21} = -i_{21}R_2 - L_{s2} \frac{di_{21}}{dt} - w_2 \frac{d\Phi_1}{dt}; \\ u_{22} = -i_{22}R_2 - L_{s2} \frac{di_{22}}{dt} - w_2 \frac{d\Phi_2}{dt}; \\ u_{23} = -i_{23}R_2 - L_{s2} \frac{di_{23}}{dt} - w_2 \frac{d\Phi_3}{dt}. \end{cases} \quad (4)$$



2-я трехфазная система:

$$\begin{cases} -0,4w_2 \frac{d\Phi_1}{dt} + 0,74w_2 \frac{d\Phi_3}{dt} = (0,4 + 0,74)i'_{21}R_2 + (0,4^2 + 0,74^2)L_{s2} \frac{di'_{21}}{dt} + u'_{21}; \\ 0,74w_2 \frac{d\Phi_1}{dt} - 0,4w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = (0,4 + 0,74)i'_{22}R_2 + (0,4^2 + 0,74^2)L_{s2} \frac{di'_{22}}{dt} + u'_{22}; \\ 0,74w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} - 0,4w_2 \frac{d\Phi_3}{dt} = (0,4 + 0,74)i'_{23}R_2 + (0,4^2 + 0,74^2)L_{s2} \frac{di'_{23}}{dt} + u'_{23}. \end{cases} \quad (5)$$

3-я трехфазная система:

$$\begin{cases} -0,4w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} + 0,74w_2 \frac{d\Phi_3}{dt} = (0,4 + 0,74)i''_{21}R_2 + (0,4^2 + 0,74^2)L_{s2} \frac{di''_{21}}{dt} + u''_{21}; \\ 0,74w_2 \frac{d\Phi_1}{dt} - 0,4w_2 \frac{d\Phi_3}{dt} = (0,4 + 0,74)i''_{22}R_2 + (0,4^2 + 0,74^2)L_{s2} \frac{di''_{22}}{dt} + u''_{22}; \\ -0,4w_2 \frac{d\Phi_1}{dt} + 0,74w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = (0,4 + 0,74)i''_{23}R_2 + (0,4^2 + 0,74^2)L_{s2} \frac{di''_{23}}{dt} + u''_{23}. \end{cases} \quad (6)$$

Электромагнитные процессы в рассматриваемом ТПЧФ исследовались с помощью имитационного моделирования в пакете *Matlab*, с использованием библиотек *Simulink* и *SimPowerSystems*. На основании систем уравнений напряжений (1–6)

при помощи блоков из указанных разделов пакета *Matlab* была составлена имитационная модель фазопреобразующего трансформатора 3→9. Данная модель представлена на рис. 2.

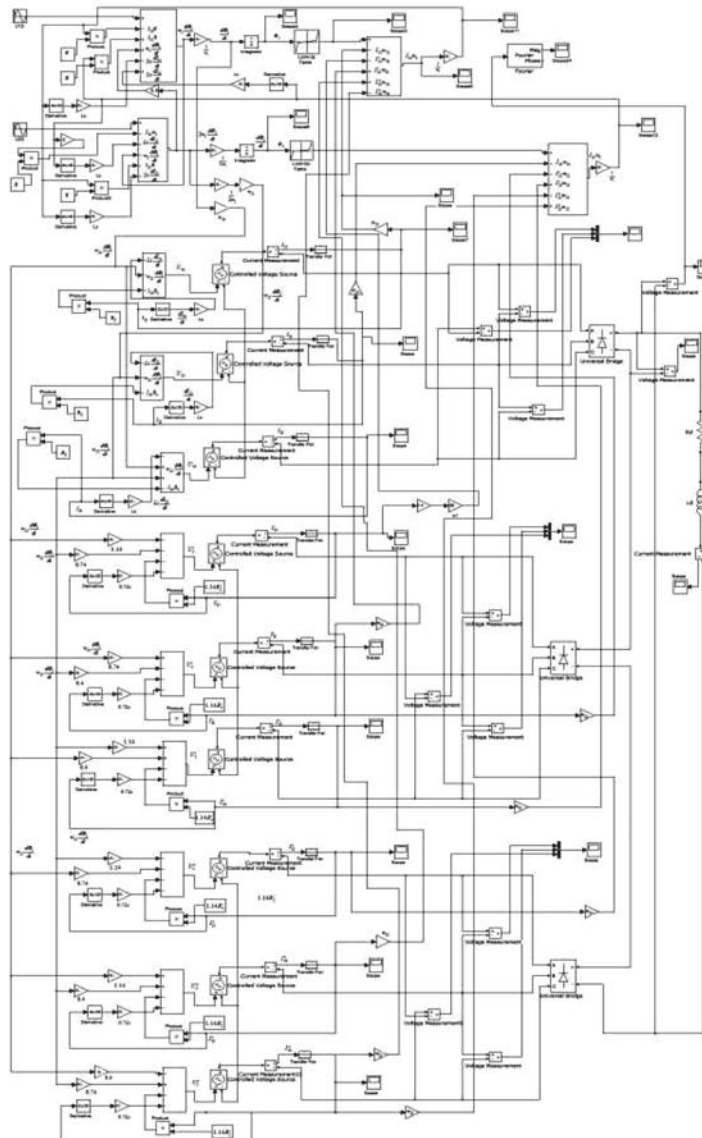


Рис. 2. Имитационная модель девятифазного ТПЧФ

В приведенной модели линейные напряжения питающей сети заданы с помощью блоков источников синусоидальных сигналов  $U_{ab}$  и  $U_{bc}$ . Реальная характеристика намагничивания применяемого материала магнитопровода ТПЧФ, учитывающая насыщение материала магнитопровода, задана в блоке *Lookup Table*. Система уравнений для МДС ТПЧФ (1) реализована с помощью суммирующих блоков *Sum*, посредством которых получены осциллограммы потребляемых токов ТПЧФ. Напряжения вторичных обмоток ТПЧФ получены с помощью суммирующих блоков *Sum*.

Особенностью данной модели также является совместная работа блоков, реализующих системы уравнений (1–6), из двух библиотек – *Simulink* и *SimPowerSystems*. В данном случае первичную обмотку удобнее моделировать при помощи блоков библиотеки *Simulink*, а вторичную обмотку, полупроводниковые выпрямители и нагрузку удобнее моделировать с помощью блоков библиотеки *SimPowerSystems*. При этом сигналы напряжений вторичных обмоток для их сопряжения с блоками библиотеки *SimPowerSystems* подключены к блокам управляемых источников напряжения *Controlled*

*Voltage Source*. Токи вторичных обмоток ТПЧФ измерялись с помощью блоков *Current Measurement*, значения измеренных токов соединялись с суммирующими блоками *Sum*, которые реализовали систему уравнения для МДС, то есть с помощью данных измерителей также была осуществлена связь блоков двух библиотек.

На рис. 3 представлена осциллограмма девятифазной системы напряжений вторичной обмотки ТПЧФ. На рис. 4 представлены осциллограммы выпрямленного напряжения. На рис. 5 представлены осциллограммы тока, потребляемого ТПЧФ.

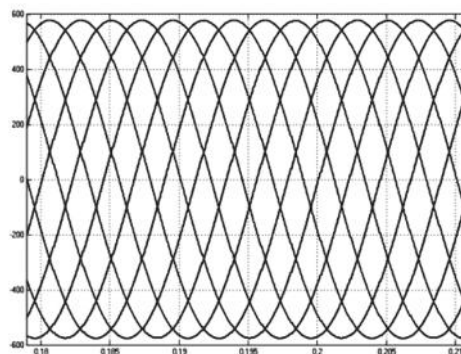


Рис. 3. Девятифазная система напряжений при идеальной коммутации

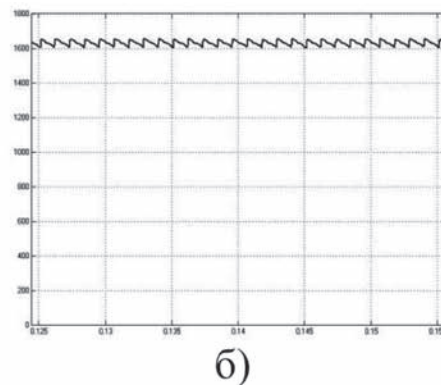
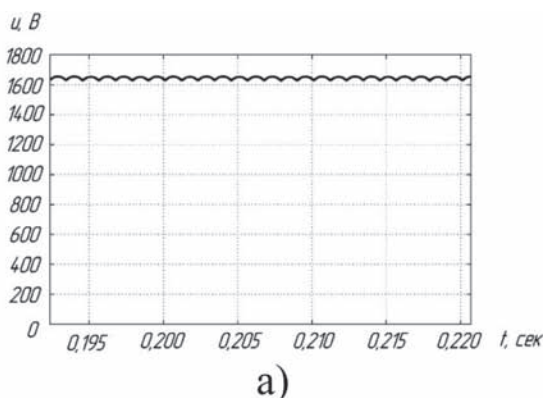


Рис. 4. Выпрямленное напряжение: а) при идеальной коммутации; б) при реальной коммутации

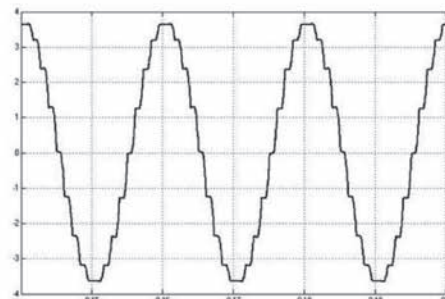
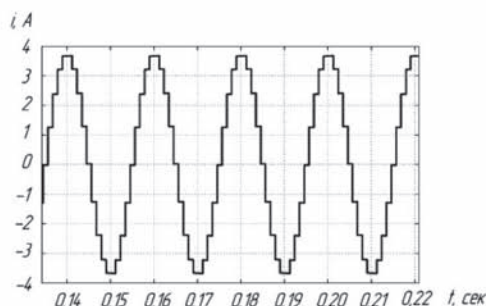
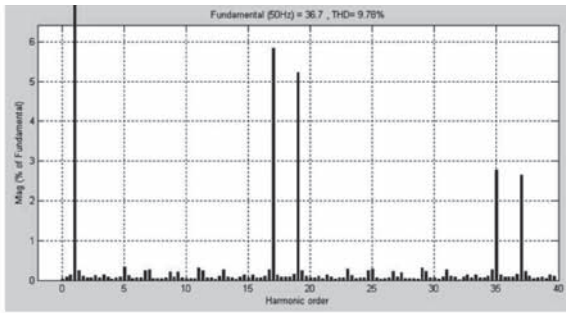


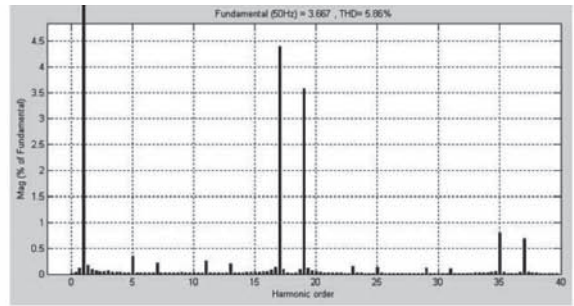
Рис. 5. Ток, потребляемый ТПЧФ: а) при идеальной коммутации; б) при реальной коммутации

С помощью пакета *Matlab* был произведен гармонический анализ кривой тока, потребляемого ТПЧФ. Анализ проводился с помощью блока

*Powergui*, являющегося инструментом графического интерфейса пользователя [4, 5]. Результаты гармонического анализа представлены на рис. 6.



а)



б)

Рис. 6. Гармонический анализ тока, потребляемого ТПЧФ: а) при идеальной коммутации; б) при реальной коммутации

Для девятифазного выпрямителя кривая его потребляемого тока будет содержать высшие гармоники с порядковыми номерами не ниже 17 и 19. Как видно из рис. 6а, в кривой тока, потребляемого девятифазным ТПЧФ, присутствуют гармоники с порядковыми номерами 17, 19, 35, 37 и т.д. При этом 17-я гармоника составляет 5,9% от основной гармоники, 19-я – 5,2% от основной, величины остальных гармоник не превышают 3% от основной. Учет реальной коммутации полупроводниковых приборов (рис. 6б) приводит к появлению в кривой потребляемого тока высших гармоник с порядковыми номерами 5, 7, 11, 13, 23, 25 и др.

Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения – это отношение амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения к среднему значению выпрямленного напряжения.

По данным, полученным в результате моделирования, было получено значение коэффициента пульсаций  $K_{\Pi} = 0,0036$ .

Двенадцатифазная система напряжений формируется при наличии на вторичной стороне четырех трехфазных систем, напряжения которых имеют фазовый сдвиг  $15^\circ$ . Принципиальная схема такой системы «сеть – полупроводниковый преобразователь – нагрузка» представлена на рис. 7а. Трансформатор имеет первичную трехфазную обмотку, соединенную в звезду, и четыре вторичные обмотки, соединенные в звезду, зигзаг и два треугольника. На рис. 7б представлена схема расположения обмоток на стержнях магнитопровода. На рис. 7в представлена векторная диаграмма системы напряжений двенадцатифазного ТПЧФ.

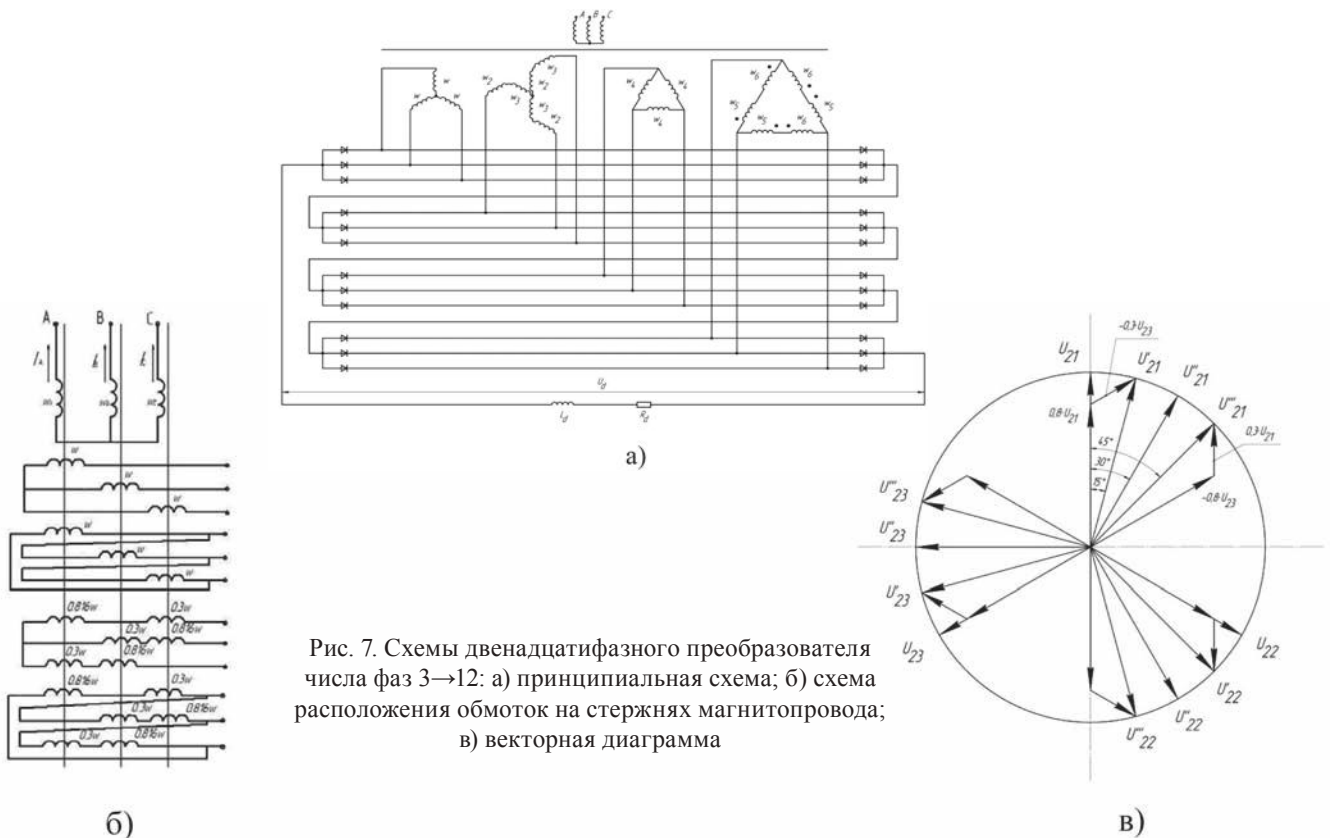


Рис. 7. Схемы двенадцатифазного преобразователя числа фаз 3→12: а) принципиальная схема; б) схема расположения обмоток на стержнях магнитопровода; в) векторная диаграмма

Работа такого устройства описывается системой дифференциальных уравнений напряжений, а также системой уравнения для МДС.

Уравнения МДС двенадцатиразного преобразо-

вателя, соотношение вторичных обмоток которого имеет вид  $w_{21}, w_{22}=1,73w_{21}, w_{23}=0,8w_{21}, w_{24}=0,3w_{21}, w_{25}=1,73w_{23}, w_{26}=1,73w_{24}$ , составляются следующим образом:

$$\begin{cases} i_A w_1 + i_{21} w_{21} + i'_{21} w_{22} + i''_{21} w_{23} - i''_{22} w_{24} - i'''_{22} w_{26} + i'''_{21} w_{25} = F_A ; \\ i_B w_1 + i_{22} w_{21} + i'_{22} w_{22} + i''_{22} w_{23} - i''_{23} w_{24} - i'''_{23} w_{26} + i'''_{22} w_{25} = F_B ; \\ i_C w_1 + i_{23} w_{21} + i'_{23} w_{22} + i''_{23} w_{24} - i''_{21} w_{24} - i'''_{21} w_{26} + i'''_{23} w_{26} = F_C . \end{cases} \quad (7)$$

Уравнения вторичной цепи аналогичны 3→9:

1-я трехфазная система:

$$\begin{cases} u_1 = -i_{21} R_2 - L_{s2} \frac{di_{21}}{dt} - w_2 \frac{d\Phi_1}{dt} ; \\ u_2 = -i_{22} R_2 - L_{s2} \frac{di_{22}}{dt} - w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} ; \\ u_3 = -i_{23} R_2 - L_{s2} \frac{di_{23}}{dt} - w_2 \frac{d\Phi_3}{dt} . \end{cases} \quad (8)$$

2-я трехфазная система:

$$\begin{cases} u_1'' = -1,73i_{21}'' R_2 - 3L_{s2} \frac{di_{21}''}{dt} - 1,73w_2 \frac{d\Phi_1}{dt} ; \\ u_2'' = -1,73i_{22}'' R_2 - 3L_{s2} \frac{di_{22}''}{dt} - 1,73w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} ; \\ u_3'' = -1,73i_{23}'' R_2 - 3L_{s2} \frac{di_{23}''}{dt} - 1,73w_2 \frac{d\Phi_3}{dt} . \end{cases} \quad (9)$$

3-я трехфазная система:

$$\begin{cases} -0,8w_2 \frac{d\Phi_1}{dt} + 0,3w_2 \frac{d\Phi_3}{dt} = (0,8 + 0,3)i'_{21} R_2 - (0,8^2 + 0,3^2)L_{s2} \frac{di'_{21}}{dt} + u_1' ; \\ 0,3w_2 \frac{d\Phi_1}{dt} - 0,8w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = (0,3 + 0,8)i'_{22} R_2 + (0,3^2 + 0,8^2)L_{s2} \frac{di'_{22}}{dt} + u_2' ; \\ -0,8w_2 \frac{d\Phi_3}{dt} + 0,3w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = (0,8 + 0,3)i'_{23} R_2 + (0,8^2 + 0,3^2)L_{s2} \frac{di'_{23}}{dt} + u_3' . \end{cases} \quad (10)$$

4-я трехфазная система:

$$\begin{cases} -1,4w_2 \frac{d\Phi_1}{dt} + 0,5w_2 \frac{d\Phi_3}{dt} = (1,4 + 0,5)i'''_{21} R_2 - (1,4^2 + 0,5^2)L_{s2} \frac{di'''_{21}}{dt} + u_1''' ; \\ 0,5w_2 \frac{d\Phi_1}{dt} - 1,4w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = (0,5 + 1,4)i'''_{22} R_2 + (0,5^2 + 1,4^2)L_{s2} \frac{di'''_{22}}{dt} + u_2''' ; \\ -1,4w_2 \frac{d\Phi_3}{dt} + 0,5w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = (1,4 + 0,5)i'''_{23} R_2 + (1,4^2 + 0,5^2)L_{s2} \frac{di'''_{23}}{dt} + u_3''' . \end{cases} \quad (11)$$

Электромагнитные процессы в рассматриваемом ТПЧФ также исследовались с помощью имитационного моделирования в пакете *Matlab*, с использованием библиотек *Simulink* и *SimPowerSystems*. На основании систем уравнений напряжений (7–11) при помощи блоков из указанных разделов пакета *Matlab* была составлена имитационная модель фазообразующего трансформатора 3→12.

Отличительной особенностью данной модели, по сравнению с девятифазным ТПЧФ, является наличие дополнительных трехфазных систем, соеди-

ненных в треугольник.

На рис. 8 представлена осциллограмма двенадцатиразной системы напряжения ТПЧФ. На рис. 9 представлена осциллограмма тока, потребляемого ТПЧФ.

С помощью пакета *Matlab* был произведен гармонический анализ кривой тока, потребляемого двенадцатиразным ТПЧФ. Анализ проводился с помощью блока *Powergui* аналогично случаю девятиразного ТПЧФ. Результаты гармонического анализа представлены на рис. 10.

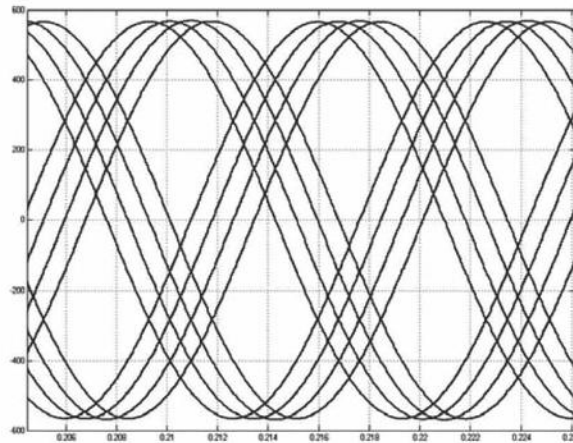
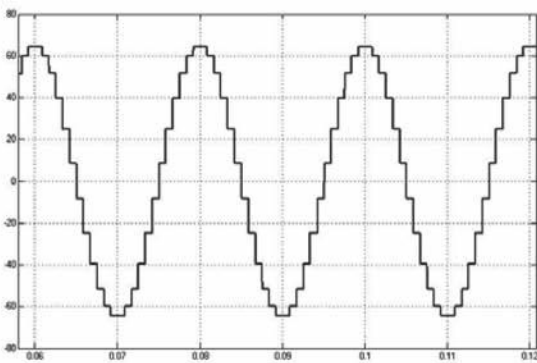
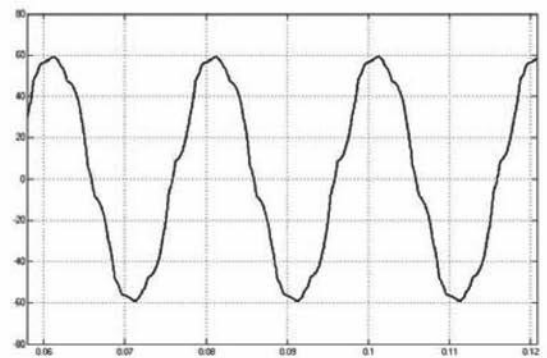


Рис. 8. Двенадцатифазная система напряжений при идеальной коммутации

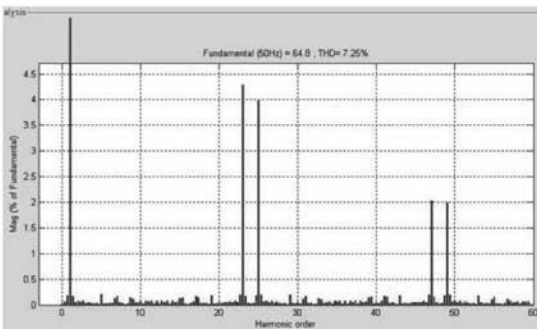


а)

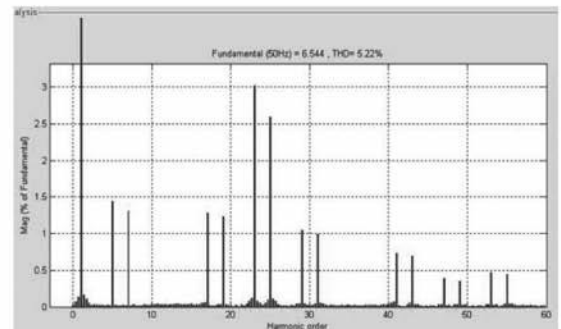


б)

Рис. 9. Ток, потребляемый ТПЧФ: а) при идеальной коммутации; б) при реальной коммутации



а)



б)

Рис. 10. Гармонический анализ тока, потребляемого ТПЧФ: а) при идеальной коммутации; б) при реальной коммутации

Для двенадцатифазного выпрямителя кривая его потребляемого тока будет содержать высшие гармоники, с порядковыми номерами не ниже 23 и 25. Как видно из рис. 10а, в кривой тока, потребляемого двенадцатифазным ТПЧФ, присутствуют гармоники с порядковыми номерами 23, 25, 47, 49 и т.д. При этом 23-я гармоника составляет 4,3% от основ-

ной гармоники, 25-я – 4% от основной, величины остальных гармоник не превышают 2% от основной. Учет реальной коммутации полупроводниковых приборов (рис. 10б) приводит к появлению в кривой потребляемого тока высших гармоник с порядковыми номерами 5, 7, 17, 19, 29, 31 и др.

**Выводы**

1. Применение многофазных ТПЧФ позволяет обеспечить ЭМС полупроводниковых преобразователей с сетью и нагрузкой. При этом обеспечивается приближение кривой потребляемого тока к синусоидальной и уменьшение пульсации выпрямленного напряжения до уровня, установленного ГОСТом.

2. Проведенный гармонический анализ показал отсутствие высших гармоник с порядковыми номерами ниже 17 в кривой тока, потребляемого девятифазным трансформатором, и ниже 23 для двенадцати-фазного ТПЧФ.

3. Пульсации выпрямленного напряжения не превышают 1,5% для девятифазного ТПЧФ и 1% для двенадцати-фазного ТПЧФ.

*Список литературы*

1. Горбунов А.С. Особенности имитационного моделирования трехфазных трансформаторов, работающих на нелинейную (выпрямительную) нагрузку [Текст] / А.С. Горбунов // Электротехнические комплексы и системы: межвузовский научный сборник / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2013.
2. Ялалова З.И. Определение электромагнитной совместимости фазообразующих трансформаторов преобразовательных установок [Текст] / З.И. Ялалова, Л.Э. Рогинская, Ю.В. Рахманова // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2013. – № 2. – С. 16–20.
3. Рогинская Л.Э. Синтез фазообразующих трансформаторов для преобразования числа фаз [Текст] / З.И. Ялалова, Л.Э. Рогинская // Актуальные проблемы в науке и технике / Уфимск. гос. авиац. тех. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2012. – 38–41 с.
4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
5. Блинов И.В. Выпрямительные преобразователи с однофазным питанием [Текст] / И.В. Блинов, С.В. Ваняев // Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. – Москва – Н. Новгород: НГТУ. – 2005. – Т. 15. – С. 188–192.

*References*

1. Gorbunov A.S. Osobennosti imitacionnogo modelirovaniya trehfaznyh transformatorov, rabotajushhih na nelinejnuju (vyprjamitel'nuju) nagruzku [Tekst] / A.S. Gorbunov // Jelektrotehnicheskie komplekсы i sistemy: mezhvuzovskij nauchnyj sbornik / Ufimsk. gos. aviac. tehn. un-t. – Ufa: UGATU, 2013.
2. Jalalova Z.I. Opredelenie jelektromagnitnoj sovместимости fazopreobrazujushhih transformatorov преобразовательных установок [Tekst] / Z.I. Jalalova, L.Je. Roginskaja, Ju.V. Rahmanova // JeLEKTRO. Jelektrotehnika, jelektrojenergetika, elektrotehnicheskaja promyshlennost'. – 2013. – № 2. – S. 16–20.
3. Roginskaja L.Je, Jalalova Z.I.. Sintez fazopreobrazujushhih transformatorov dlja преобразования числа фаз [Tekst] / Z.I. Jalalova, L.Je. Roginskaja // Aktual'nye problemy v nauke i tehnike / Ufimsk. gos. aviac. tehn. un-t. – Ufa: UGATU, 2012. – 38–41 s.
4. Chernyh I.V. Modelirovanie jelektrotehnicheskikh ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Tekst] / I.V. Chernyh. – M.: DMK Press; SPb.: Piter, 2008. – 288 s.
5. Blinov I.V. Vyprjamitel'nye преобразователи s odnofaznym питанием [Tekst] / I.V. Blinov, S.V. Vanjaev // Izvestija akademii inzhenernyh nauk im. A.M. Prohorova. – Moskva – N. Novgorod: NGTU, 2005. T. 15. – S. 188–192.



**Яруллин Р.Б.**  
**Yarullin R.B.**

*доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Машины, аппараты,  
приборы и технологии сервиса» ФГБОУ  
ВПО «Уфимский государственный универси-  
тет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа*



**Сафин Р.Р.**  
**Safin R.R.**

*доктор технических наук, доцент  
заведующий кафедрой «Математика и ма-  
тематическое моделирование» ФГБОУ ВПО  
«Уфимский государственный университет  
экономики и сервиса», Россия, г. Уфа*

УДК 631.3-83:631.362

## **К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ САМОРЕГУЛИРУЕМОГО ИНЕРЦИОННОГО ВИБРАТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВИБРОМАШИН**

Практика показывает, что во многих случаях вибрация в технологических процессах оказывается весьма полезной за счет: высокой производительности технологических машин при минимальных энергозатратах; интенсификации в десятки, сотни раз многих технологических процессов: совмещения в одних и тех же процессах нескольких функций; реализации некоторых процессов, в которых вибрация имеет решающее значение, – без нее процессы либо вообще не осуществимы, либо нерентабельны. Основными параметрами виброобработки материалов считается частота и амплитуда колебаний рабочего органа (РО) вибромашин. В современных машинах вибрационного действия используется вибрация от низких (от 10 мГц) до высоких (до 10 кГц) частот. Причем низким частотам соответствуют большие амплитуды (от нескольких до десятков сантиметров), высоким – малые амплитуды (миллиметры и доли миллиметра). Исследования на вибромашинах агропромышленного назначения показывают, что для каждого технологического процесса, а также с изменением параметров (состояния) материалов, рациональные параметры вибрации имеют свои конкретные значения. Установлено, что рациональные параметры вибрации взаимосвязаны по гиперболическим зависимостям и должны плавно регулироваться. Для таких отраслей АПК, как послеуборочная обработка урожая, животноводство, растениеводство и мелиорация, строительство и дорожное дело, ремонтная техника, и в целом по АПК установлены скоростные факторы гиперболических зависимостей амплитудно-частотных характеристик рациональных режимов, диапазоны и необходимость плавного регулирования частоты и амплитуды колебаний РО вибромашин. Регулирование частоты колебаний РО целесообразно осуществлять электрическим способом приводным асинхронным двигателем за счет изменения частоты тока полупроводниковым преобразователем частоты, регулирование амплитуды колебания РО – саморегулируемым инерционным вибратором с выдвигающимися в зависимости от скорости подпружиненными противовесами. В работе рассмотрена особенность проектирования компактной конструкции инерционного саморегулируемого вибратора и конструкции вибратора с равными массами дебалансов.

*Ключевые слова:* виброобработка, вибромашина, амплитуда, частота, дебаланс, радиус центра масс, скоростной фактор.

### **BY DESIGN ISSUES OF SELF-REGULATORY INERTIA VIBRATOR ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE THE VIBRATION MACHINE**

Experience shows that in many cases the vibration in industrial processes is very useful due to the high

performance production machines with minimal energy consumption; intensification of tens of hundreds of times of many technological processes: alignment in the same process several functions; the implementation of some processes in which the vibration is critical or without processes generally not feasible or is not cost effective. The main parameters vibration treatment materials considered the frequency and amplitude of the oscillations of the working organ (WO) vibrators. In modern machines, vibratory action used vibration from low (10 MHz) to high (up to 10 kHz) frequencies. Moreover, the low frequencies correspond to large amplitude (from a few to tens of centimeters) high – low amplitude (millimeters and fractions of a millimeter). Research on agro-purpose vibrator show that for each process, as well as changes in the parameters (state) materials, rational vibration parameters have specific values. It was established that the rational parameters of vibration interconnected by a hyperbolic relationship and must be continuously adjusted. For agricultural industries as post-harvest crop, livestock, crops and land improvement, building and transportation business, and repair equipment and a whole set speed on AIC factors hyperbolic dependence of the amplitude-frequency characteristics of the sound modes, Ranges and the need for modulating the frequency and amplitude of the oscillations WO vibrators. Regulation of the oscillation frequency of WO it is advisable to electrically driven induction motor by changing the frequency of the current solid-state drive, the vibration amplitude of WO regulation – self-regulating inertial vibrator with retractable depending on the speed of the spring-loaded inverse of the unbalance. This article examines the design feature of the compact design of the inertial vibrator and self-regulatory structures of the vibrator with equal masses unbalances.

*Key words:* vibration treatment, vibrator, amplitude, frequency, unbalance, the radius of the center of mass, the speed factor.

В результате проведенного анализа порядка 190 исследований вибротехнологий в процессах таких отраслей АПК [1], как послеуборочная обработка, животноводство, растениеводство и мелиорация, строительство и дорожное дело, ремонтная техника, и в целом по АПК нами установлены (см. табл.) скоростные факторы гиперболической зависимости амплитуды от частоты колебаний РО рациональных режимов обработки для указанных отраслей и по АПК, диапазоны и необходимость плавного регулирования частоты и амплитуды колебаний РО вибротехнологий (ВМ).

Амплитудно-частотные характеристики по кривым регрессии параметров вибрации для процессов указанных отраслей АПК, а также для трех типов семяочистительных ВМ (центробежные (ЦВМ), с плоскими решетками (ПРВМ), фрикционными (ФВМ) РО), для послеуборочных процессов и в целом по АПК приведены на рис. 1. Анализом выявлено, что:

- наиболее исследованы (57%) процессы вибросепарации семян;
- в известных технологических процессах основным источником вибраций (63%) являются инерционные вибраторы [2], получающие привод в основном (71%) от асинхронных двигателей;
- 95% точек рациональных режимов [1] находятся в диапазоне частот 10÷52 Гц. На практике установка и корректировка амплитуды РО производятся во время остановки ВМ вручную.

Исходя из вышеизложенного, проектирование саморегулируемого вибратора является актуальным. Особенности проектирования рассмотрим на

примере перспективной многорешетной виброзерноочистительной машины (МВЗМ) с винтовым колебанием РО, на которой эффективно разделяется смесь семян более 11 сельхозкультур [4]. У МВЗМ колебания РО могут устанавливаться от простых вертикальных и поворотных колебаний вокруг вертикальной оси до сложных винтовых с углом направленности колебаний соответственно от 0 до 90°. Механическая модель МВЗМ с асинхронным электроприводом и саморегулируемым вибратором приведена на рис. 2.

Вращающий момент со статора на ротор с моментом инерции  $J_1$  передается через связь с жесткостью  $K_d = \frac{1}{\gamma \omega_0 T_э}$  и коэффициентом линейного демпфирования  $C_d = \frac{1}{\gamma \omega_0}$ . Здесь  $\gamma$  – условный коэффициент крутизны рабочей ветви статической механической характеристики асинхронного двигателя, равной  $\frac{S_k}{2M_k}$ , и  $T_э$  – электромагнитная постоянная времени. Вращательное движение ротора через упругую одноярусную лепестковую муфту (контрпривод) и клиноременную передачу с жесткостью  $K_{\Omega 2}$ , приведенным зазором  $\delta_0$  и коэффициентом сопротивления передачи  $C_{\Omega 2}$  передается на вал вибратора моментом инерции  $J_2$ . Вибратор инерционный имеет два горизонтально расположенных вала, установленных в подшипниках. Валы зацеплены между собой парой одинаковых косозубых шестерен и синхронно вращаются в противоположных направлениях. На расстоянии  $a$  от оси  $Z$  на противоположных концах вала установлены



Результаты анализа применения вибрации в АПК

Отрасли АПК и типы ВМ	По отраслям, %	Скоростной фактор $V=Av$ ( $A_{\omega}$ ), $10^{-2} \text{ мс}^{-1}$	Диапазон регулирования оптимальных параметров		Коэффициент плавности $K_{пл}$	
			частоты $D_{\omega}$ , $\text{с}^{-1}$	амплитуды $D_A$ , $10^{-3} \text{ м}$	Частоты, $\omega$	Амплитуды, $A$
Растениеводство и мелиорация	12	13,8(86,7)	$408 \div 25,1 = 16,25:1$	$35 \div 1 = 35:1$	1,11	1,65
Животноводство	7,7	6,14(38,56)	$314 \div 60 = 5,2:1$	$9 \div 0,1 = 90:1$	1,21	1,11
Строительство и дорожное дело	13,6	6,53(41)	$314 \div 11 = 28,5:1$	$32,5 \div 0,5 = 65:1$	1,28	1,01
Ремонт техники	9,7	3,06(19,2)	$314 \div 42,1 = 7,5:1$	$3,5 \div 0,4 = 8,75:1$	1,32	1,37
Послеуборочные процессы	57	Центробежные (ЦВМ)	$304 \div 13,5 = 22,52:1$	$6 \div 1,4 = 4,3:1$	1,17	0,867
		С плоскими-решетками (ПРВМ)	$334,9 \div 60,13 = 5,6:1$	$5 \div 0,5 = 10:1$	1,085	0,988
		Фрикционные (ФВМ)	$314,2 \div 135 = 2,33:1$	$2,3 \div 1 = 2,3:1$	1,03	1,011
Исследованные техпроцессы АПК	100	6,21(39)	$628 \div 12,57 = 50:1$	$35 \div 0,5 = 70:1$	1,11	1,1

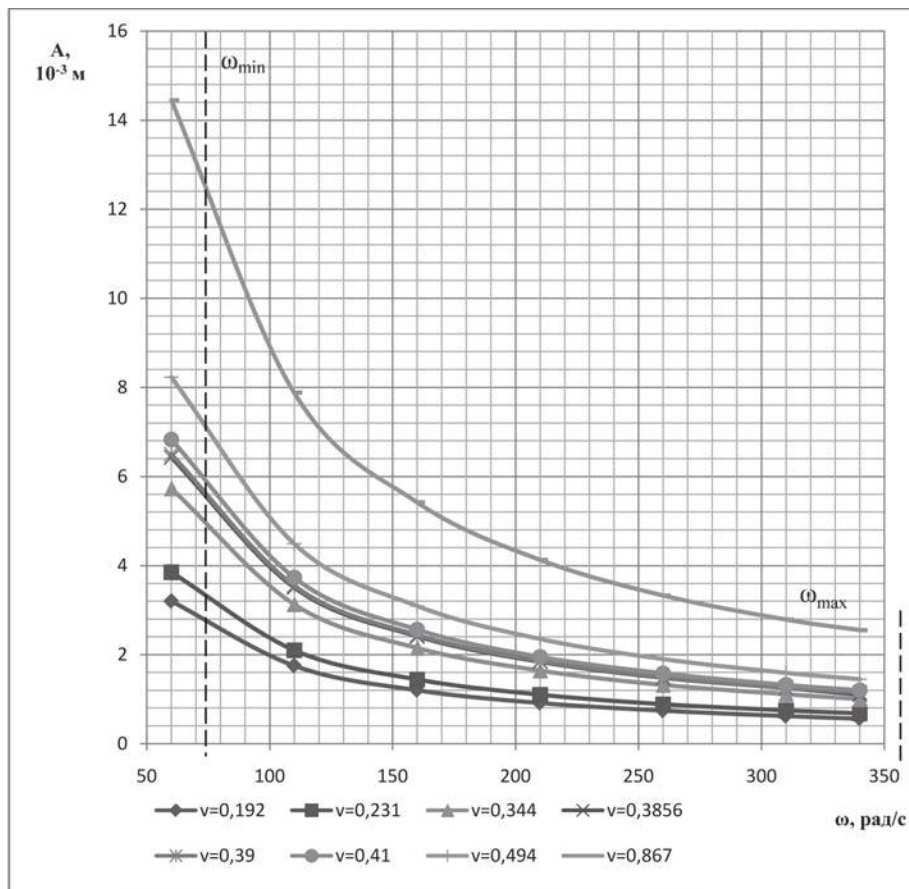


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики вибротехнологий АПК:  $A = 0,192/\omega$  – ремонт техники;  $A = 0,231/\omega$  – фрикционные ВМ (ФВМ);  $A = 0,344/\omega$  – плоскорешетчатые ВМ (ПРВМ);  $A = 0,3856/\omega$  – животноводство;  $A = 0,39/\omega$  – универсальная ВМ;  $A = 0,41/\omega$  – строительство и дорожное дело;  $A = 0,494/\omega$  – центробежные ВМ (ЦВМ);  $A = 0,867/\omega$  – растениеводство и мелиорация

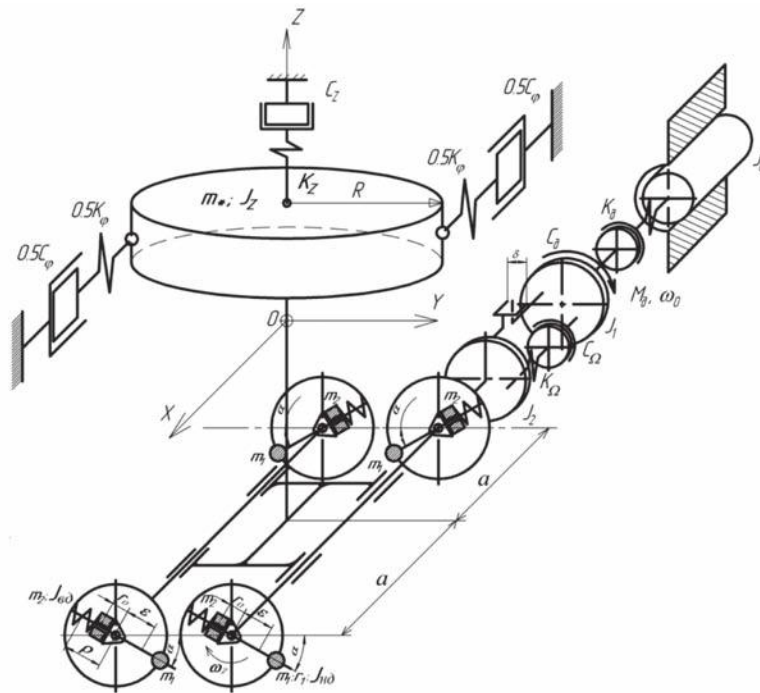


Рис. 2. Механическая модель асинхронного электропривода и многорешетной виброзерноочистительной машины с саморегулируемым вибратором

диаметрально противоположно друг другу, с углом первоначальной установки  $\alpha$ , по два дебаланса массами  $m_1$  и  $m_2$  с радиусом центра масс в состоянии покоя соответственно  $r_1$  и  $r_0$ . Динамика подвижного дебаланса  $m_1$ , применяемого для ограничения резонанса, подробно рассмотрена рядом исследователей. Поэтому первый дебаланс для упрощения анализа принимаем установленным неподвижно, а второй – выдвигающимся за счет центробежной силы, преодолевающей упругость нелинейной пружины.

Пружина имеет нелинейную характеристику жесткости, обеспечивающую гиперболическую зависимость изменения амплитуды от частоты колебания РО. Выдвижение дебаланса начинается при минимальной частоте  $\omega_{\min}$  рабочего диапазона сепарации семян. Для этого пружина имеет предвари-

$$A = \frac{4(m_1 r_1 - m_2 \rho)}{m_*} \sqrt{\sin^2 \alpha + m_*^2 a^2 R^2 J_z^{-2} \cos^2 \alpha} = \frac{4(m_1 r_1 - m_2 \rho)}{m_*} C = \frac{4(mr)_3}{m_*} C, \quad (2)$$

где  $C$  – конструктивный безразмерный параметр МВЗМ,  $\rho$  – радиус центра масс выдвигающегося дебаланса,  $(mr)_3$  – эквивалентный статический момент инерционного вибратора.

Из (1) и (2) соотношений для граничных параметров диапазона регулирования с  $\omega_{\min} = 61,36$  рад/с и  $A_{\max}$  до  $\omega_{\max} = 334,7$  рад/с и  $A_{\min}$  (рис. 1) получим

тельную деформацию  $\varepsilon$ . При вращении дебалансов со скоростью  $\omega$  составляющие их центробежных сил создают одновременно колебательное движение РО совместно с вибратором массой  $m^*$  и моментом инерции  $J_z$ , вдоль и относительно вертикальной оси соответственно с амплитудой  $Z$  и углом поворота  $\varphi$ . Колебание РО происходит на пружинах, имеющих жесткость  $K_z$  и коэффициент сопротивления перемещению  $C_z$  в продольном направлении, а в поперечном направлении жесткость и коэффициент сопротивления перемещению равны соответственно  $K_\varphi$  и  $C_\varphi$ .

Исходя из гиперболического закона изменения амплитуды  $A$  от угловой скорости  $\omega$  дебалансов [1-3]

$$A = \frac{V}{\omega}, \quad (1)$$

получено выражение амплитуды РО с радиусом  $R$  для зарезонансного режима работы [2, 3]

$$(mr)_3^{\max} = \frac{A_{\max} m_*}{C} = \frac{m_* V}{C \omega_{\min}}, \quad (3)$$

$$(mr)_3^{\min} = \frac{A_{\min} m_*}{C} = \frac{m_* V}{C \omega_{\max}}. \quad (4)$$

В то же самое время полученные статические моменты определяются центробежными силами 4-х групп противоположно расположенных дебалансов  $m_1$  и  $m_2$  (рис. 2), которые для соответствующих граничных скоростей  $\omega_{\min}$  и  $\omega_{\max}$  удовлетворяют соотношениям:

$$(mr)_3^{max} \omega_{min}^2 = 4m_1 r_1 \omega_{min}^2 - 4m_2 r_0 \omega_{min}^2, \quad (5)$$

$$(mr)_3^{min} \omega_{max}^2 = 4m_1 r_1 \omega_{max}^2 - 4m_2 \rho_{max} \omega_{max}^2. \quad (6)$$

Преобразовав их, получим систему уравнений:

$$\frac{(mr)_3^{max}}{4} = m_1 r_1 - m_2 r_0, \quad (7)$$

$$\frac{(mr)_3^{min}}{4} = m_1 r_1 - m_2 \rho_{max}. \quad (8)$$

В процессе проектирования вибратора могут быть поставлены требования разработки компактной конструкции ( $r_1 = \rho_{max}$ ) или требования конструкции с равными массами дебалансов ( $m_1 = m_2$ ). Рассмотрим оба случая.

**Случай равенства радиусов дебалансов  $r_1 = \rho_{max}$ .**

Преобразовав систему уравнений (7) и (8), получим

$$m_2^2 r_0 + \frac{(mr)_3^{max}}{4} m_2 = m_1^2 r_1 - \frac{(mr)_3^{min}}{4} m_1 \quad (9)$$

или

$$m_2^2 r_0 + \frac{m_* V}{4C \omega_{min}} m_2 = m_1^2 r_1 - \frac{m_* V}{4C \omega_{max}} m_1. \quad (10)$$

При этом  $r_1 = \rho_{max}$  определяется сочетанием масс  $m_1$  и  $m_2$  по выражению

$$\rho_{max} = \frac{m_1 r_1}{m_2} - \frac{(mr)_3^{min}}{4m_2}. \quad (11)$$

По полученным выражениям были проведены расчеты для параметров МВЗМ  $r_0 = 0,005; 0,01; 0,015; 0,02; 0,025$  м;  $r_1 = 0,1; 0,15; 0,20; 0,25; 0,3$  м;  $m_1 = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$  кг и  $V = 0,192; 0,231; 0,344; 0,3856; 0,39; 0,41; 0,494; 0,867$  м/с и построены гра-

фики (рис. 3–5). Из рисунков следует, что для всего диапазона изменения радиуса покая  $r_0$  подвижного дебаланса (рис. 3) массы дебалансов  $m_1$  и  $m_2$  при условии  $r_1 = \rho_{max}$  возрастают незначительно в пределах 4,1% и 10,3% соответственно. Увеличение радиуса  $r_1$  неподвижного дебаланса (рис. 4) ведет к уменьшению масс дебалансов по нелинейной зависимости с разной интенсивностью: если  $m_2$  уменьшается с 1,95 до 1,4 кг, то  $m_1$  уменьшается с 4,3 до 1,85 кг.

Увеличение скоростного фактора  $V$  (рис. 5) с 0,192 до 0,867 м/с приводит к интенсивному нелинейному росту масс дебалансов. На интервале с  $V = 0,192$  до  $V = 0,231$  м/с  $m_2$  возрастает с 1,0 до 1,5 кг, а  $m_1$  – с 1,5 до 2,0 кг. В дальнейшем значение массы подвижного дебаланса  $m_2$  остается примерно на одном уровне в пределах 1,6–1,8 кг. При этом масса неподвижного дебаланса  $m_1$  возрастет с 2,0 до 4,4 кг.

**Случай равенства масс дебалансов  $m_1 = m_2$ .**

Преобразовав систему уравнений (7) и (8) при условии  $m_1 = m_2$ , получим выражение для максимального радиуса выдвигающегося дебаланса  $m_2$  в виде:

$$\rho_{max} = \left[ \frac{(mr)_3^{max}}{4} - \frac{(mr)_3^{min}}{4} \right] \frac{1}{m_1} + r_0 \quad (12)$$

или

$$\rho_{max} = \frac{m_* V}{4C m_1} \left( \frac{1}{\omega_{min}} - \frac{1}{\omega_{max}} \right) + r_0. \quad (13)$$

Результаты расчетов для указанных выше значений параметров ВМ приведены на рис. 6–8.

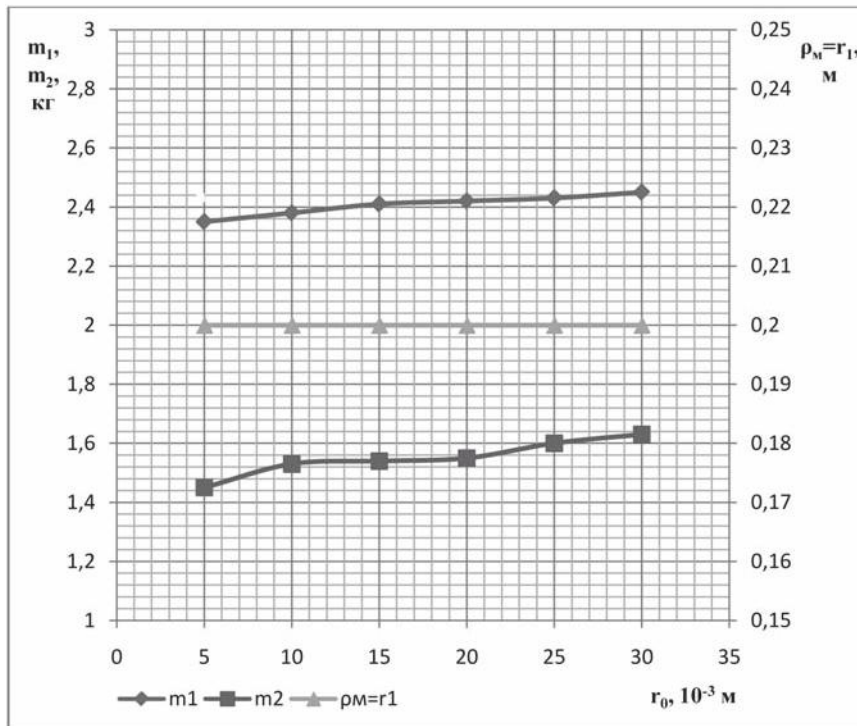


Рис. 3. Зависимость масс дебалансов  $m_1$  и  $m_2$  от радиуса покая подвижного дебаланса  $r_1 = \rho_m = 0,2$  м и  $V = 0,344$  м/с

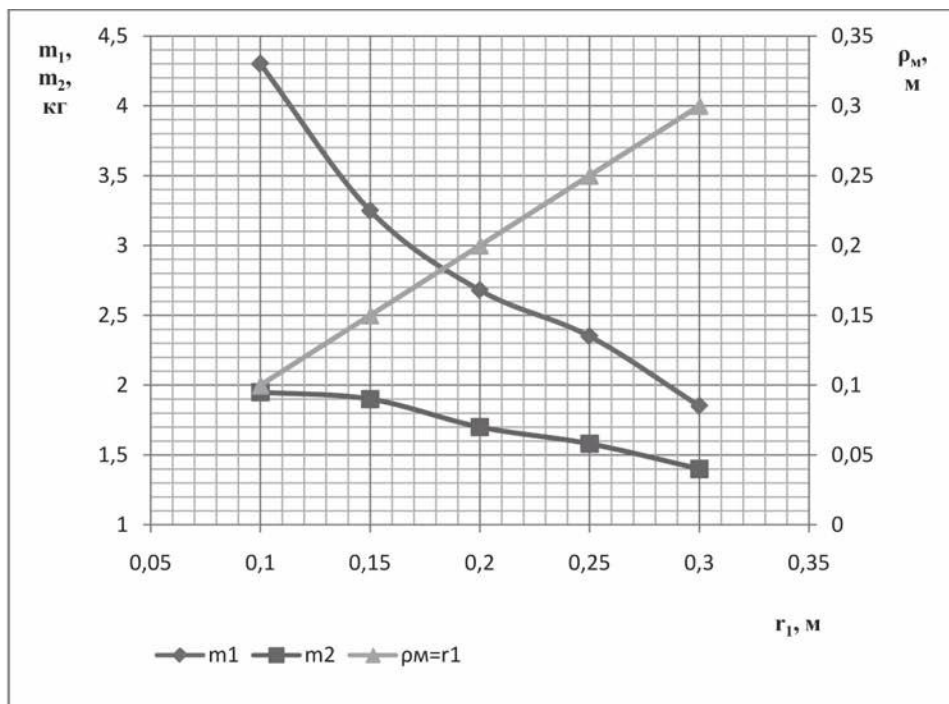


Рис. 4. Зависимость масс дебалансов  $m_1$  и  $m_2$  от радиуса неподвижного дебаланса  $r_1 = \rho_m$  при  $r_0 = 0,02$  м и  $V = 0,39$  м/с

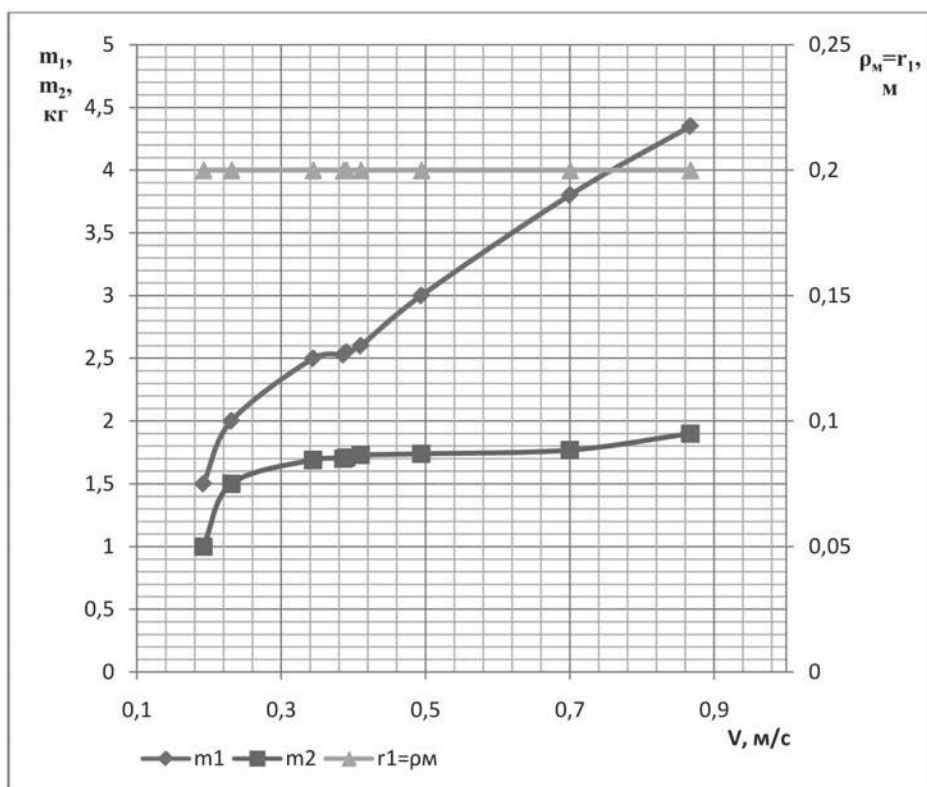


Рис. 5. Зависимость масс дебалансов  $m_1$  и  $m_2$  от скоростного фактора  $V$  при  $r_1 = \rho_m = 0,2$  м и  $r_0 = 0,02$  м

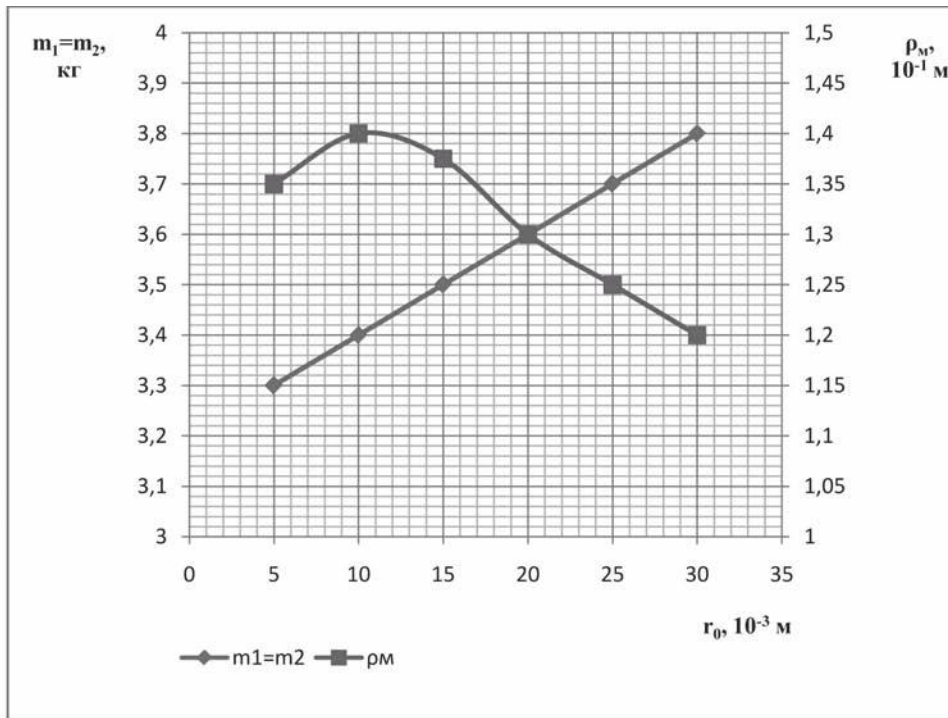


Рис. 6. Влияние радиуса покоя  $r_0$  подвижного дебаланса  $m_2$  на его максимальный радиус  $\rho_m$  и массы дебалансов  $m_1 = m_2$  при  $r_1 = 0,2 \text{ м}$ ,  $V = 0,344 \text{ м/с}$

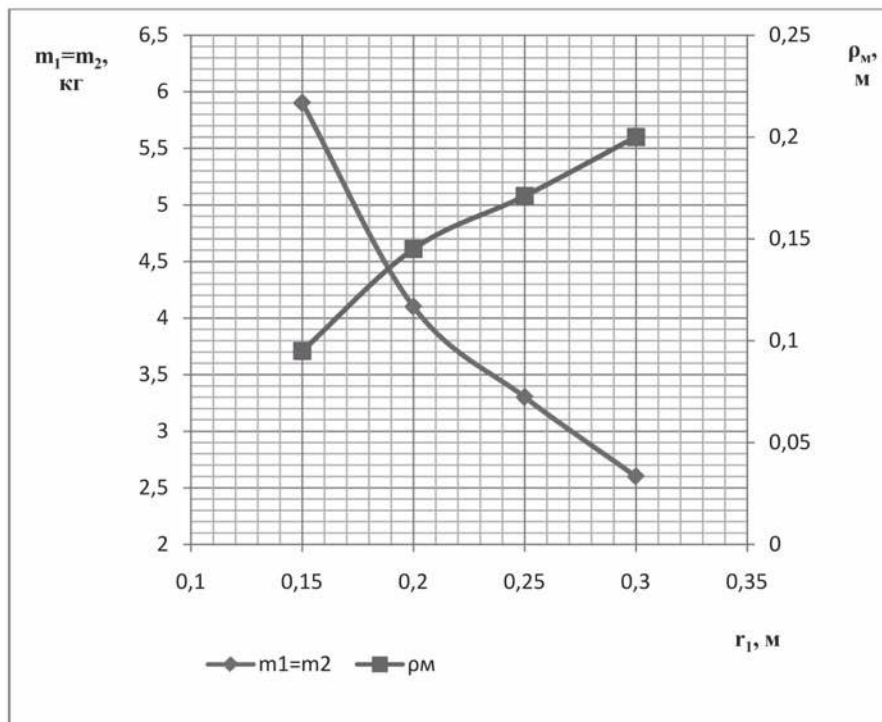


Рис. 7. Влияние радиуса неподвижного дебаланса  $r_1$  на максимальный радиус выдвигения  $\rho_m$  дебаланса  $m_2$  и массы дебалансов  $m_1 = m_2$  при  $r_0 = 0,02 \text{ м}$ ,  $V = 0,39 \text{ м/с}$

Влияние радиуса покоя  $r_0$  подвижного дебаланса  $m_2$  (рис. 6) на массы дебалансов также незначительно, как и в случае  $r_1 = \rho_{\max}$ . При этом  $\rho_{\max}$  сначала, в диапазоне  $r_0$  от 0,005 до 0,01 м, возрастает с 0,135 до 0,14 м, а затем снижается до 0,12 м при  $r_0 =$

0,03 м. При этом массы дебалансов  $m_1 = m_2$  должны увеличиваться с 3,3 до 3,8 кг. Увеличение радиуса  $r_1$  неподвижного дебаланса (рис. 7) с 0,15 до 0,3 м вызывает интенсивный рост  $\rho_{\max}$  с 0,095 до 0,2 м с необходимостью уменьшения масс дебалансов

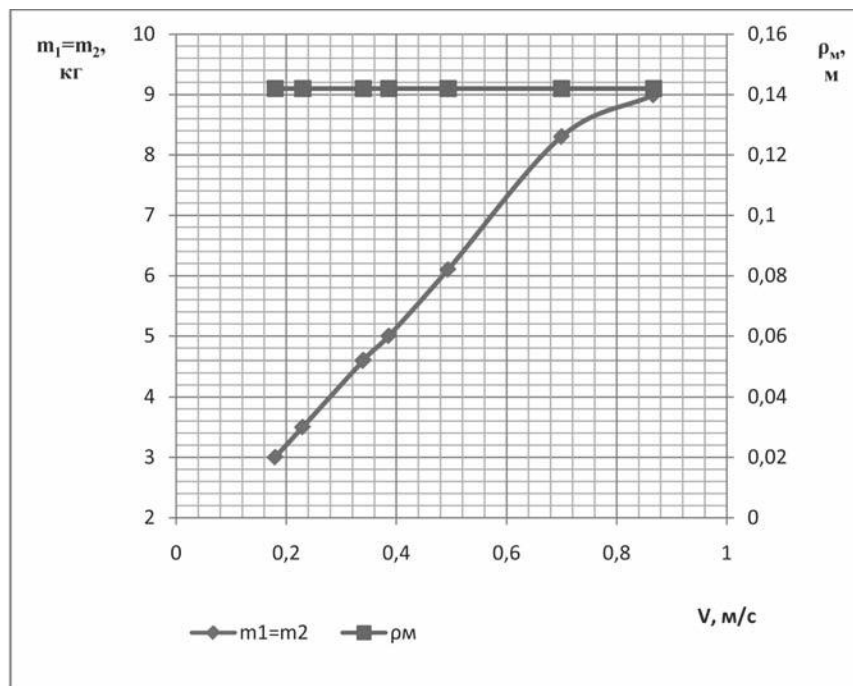


Рис. 8. Влияние скоростного фактора  $V$  на максимальный радиус выдвигения  $\rho_{max}$  дебаланса  $m_2$  и массы дебалансов  $m_1 = m_2$  при  $r_1 = 0,2$  м и  $r_0 = 0,02$  м

$m_1 = m_2$  с 6,0 до 2,5 кг. С ростом скоростного фактора  $V$  (рис. 8) постоянство максимального радиуса  $\rho_{max} = 0,144$  м обеспечивается при условии интенсивности роста масс дебалансов  $m_1 = m_2$  с 2,0 до 8,99 кг.

Из изложенного выше следует, что результаты проведенных исследований позволяют спроектировать саморегулируемый инерционный вибратор с минимальными массогабаритными характеристиками. Выявлено, что разработка варианта вибратора при равенстве радиусов дебалансов  $r_1 = \rho_{max}$  имеет лучшие массогабаритные показатели. При этом наибольшее влияние на показатели имеют радиус  $r_1$  неподвижного дебаланса  $m_1$  и скоростной фактор  $V$ .

#### Список литературы

1. Яруллин Р.Б. Амплитудно-частотные характеристики вибропроцессов в технологиях АПК [Текст] / Р.Б. Яруллин // Научные исследования: информация, анализ, прогноз: 33-я книга коллективной монографии; гл. 17 / Воронеж. гос. пед. ун-т. – Воронеж, 2011. – С. 267–288.

2. Яруллин Р.Б. Повышение эффективности асинхронного электропривода с регулируемыми параметрами в технологических процессах АПК (на примере виброзерноочистительных машин) [Текст] / Р.Б. Яруллин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Челябинск, 2011. – 45 с.

3. Возмилов А.Г. Определение закона и параметров регулирования инерционного электропривода зерноочистительной машины [Текст] / А.Г. Возми-

лов, Р.Б. Яруллин // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Энергетика». – 2011. – Вып. 15. – № 15 – С. 16–17.

4. Яруллин Р.Б. Асинхронный электропривод многорешетной виброзерноочистительной машины с регулируемыми параметрами [Текст] / Р.Б. Яруллин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 1. – С. 52–60.

#### References

1. Yarullin R.B. Amplitudno-chastotnye harakteristiki vibroprocessov v tehnologijah APK [Tekst] / R.B. Yarullin // Nauchnye issledovaniya: informacija, analiz, prognoz: 33-ja kniga kolektivnoj monografii; gl. 17 / Voronezh. gos. ped. un-t. – Voronezh, 2011. – S. 267–288.

2. Yarullin R.B. Povyshenie effektivnosti asinhronnogo elektrovibroprivoda s reguliruemymi parametrami v tehnologicheskix processah APK (na primere vibrozernoochistitel'nyh mashin) [Tekst] / R.B. Yarullin: avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk. – Cheljabinsk, 2011. – 45 s.

3. Vozmilov A.G. Opredelenie zakona i parametrov regulirovanija inercionnogo vibroprivoda zernoochistitel'noj mashiny [Tekst] / A.G. Vozmilov, R.B. Yarullin // Vestnik JuUrGU. Ser. «Energetika». – 2011. – Vyp. 15. – № 15 – S. 16–17.

4. Yarullin R.B. Asinhronnyj elektrovibroprivod mnogoreshetnoj vibrozernoochistitel'noj mashiny s reguliruemymi parametrami [Tekst] / R.B. Yarullin // Elektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – Т. 9. – № 1. – S. 52–60.



**Нугаев И.Ф.**  
**Nugayev I.F.**

доктор технических наук, профессор кафедры «Электроника и биомедицинские технологии» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа



**Байгускаров И.С.**  
**Bayguskarov I.S.**

научный сотрудник ООО «Научно-исследовательский институт технических систем «ПИЛОТ»



**Стыскин А.В.**  
**Styskin A.V.**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа



**Уразбахтина Н.Г.**  
**Urazbakhtina N.G.**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа

УДК 621.313

## ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОГРУЖНОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ

Одной из основных причин отказов погружных асинхронных электродвигателей (ПЭД) установок электропогружных насосов нефтедобывающих скважин является перегрев обмоток статора, который вызывается как повышенными нагрузками, так и снижением интенсивности охлаждения двигателя. Для предотвращения перегрева ПЭД сегодня применяются специальные методы, основанные, как правило, на релейном принципе защиты. Существенным недостатком такой защиты является то, что ее применение значительно снижает ресурс погружных асинхронных электродвигателей, что связано с необходимостью его частых остановов и повторных пусков. Одним из подходов к устранению данного недостатка, по мнению авторов, является построение систем защиты, основанных на принципе плавного регулирования температуры ПЭД без его полного останова. Очевидно, что синтез эффективных алгоритмов регулирования режимов ПЭД возможен только при питании его от преобразователя частоты и на основе динамических моделей регулируемых процессов, учитывающих методы современной теории автоматического управления. При этом ПЭД должен рассматриваться как объект управления. Основой для построения динамической модели теплового поля было принято дифференциальное уравнение теплообмена Фурье – Кирхгофа, которое отражает все виды тепловых потоков (конвективный, диффузионный, источников). В качестве выходного управляемого параметра здесь выступает температурное поле ПЭД. В качестве входного управляющего параметра температурой ПЭД принята полная активная мощность, потребляемая ПЭД. В качестве входных возмущающих параметров, влияющих на температуру ПЭД и носящих случайный характер, приняты температура добываемой жидкости перед ПЭД; температуропроводность добываемой жидкости; скорость движения добываемой жидкости в кольцевом зазоре между ПЭД и обсадной колонной. Для оценки адекватности модели выполнялось сравнение результатов вычислительных экспериментов с имеющимися промышленными данными. Разработанная авторами динамическая модель тепловых процессов в ПЭД позволяет повысить ресурс установки, исключая частые остановки и повторные пуски, тем самым значительно повысить производительность нефтяной скважины.

*Ключевые слова:* погружной асинхронный двигатель, температурное поле, динамическая модель.

## DYNAMIC MODEL OF THERMAL PROCESSES IN THE SUBMERSIBLE MOTOR OIL WELL PUMPING UNIT

One of the major causes of failures of submersible asynchronous motors (SAM) pumps submersible installations oil wells is the overheating of the stator windings, which is called as high stress and a reduction of engine cooling. To prevent overheating, the SAM today use special methods based usually on the principle of the protection relay. A significant drawback of such protection is that it significantly reduces resource use submersible induction motors, due to the necessity of his frequent shutdowns and restarts. One approach to overcome this problem, according to the authors, is the construction of security systems based on the principle of modulating temperature SAM without a stop. Obviously, the synthesis of effective control algorithms SAM mode is possible only when its power from the inverter and on the basis of dynamic models of controlled processes, taking into account the methods of modern control theory. In this SAM should be regarded as an object of management. The basis for the construction of a dynamic model of the thermal field was accepted differential equation of heat transfer Fourier Kirchhoff, which reflects all kinds of heat flow (convection, diffusion, sources) as the output of the controlled parameter here is the temperature field, the SAM. As an input control parameter temperature SEM adopted the total active power consumed by the SAM. As disturbing input parameters affecting the temperature of motor and bearing the random nature of the produced fluid temperature taken before the SAM; thermal diffusivity of the produced fluid; extracted liquid velocity in the annular gap between the motor and the casing. To assess the adequacy of the model was performed comparing the results of computational experiments with the available field data. Model developed by the authors dynamic model thermal processes in the SAM can increase the deployment share, excluding frequent stop and restart, thus greatly improving the productivity of oil wells.

*Key word:* submersible induction motor, temperature field, the dynamic model.

### Введение

Одной из основных причин отказов погружных асинхронных электродвигателей (ПЭД) установок электропогружных насосов (УЭЦН) нефтедобывающих скважин является перегрев обмоток статора, который вызывается как повышенными нагрузками, так и снижением интенсивности охлаждения двигателя [1, 2]. Для предотвращения перегрева ПЭД сегодня применяются специальные методики и системы автоматической защиты, основанные, как правило, на релейном принципе. Принцип состоит в контроле температуры обмоток или токов статора; остановки ПЭД при достижении предельно допустимой температуры; выдерживании временного интервала для охлаждения ПЭД; повторном запуске ПЭД. Реализация данного принципа выполняется с применением систем погружной телеметрии и станций наземной аварийной защиты. Существенным недостатком указанного релейного принципа защиты является то, что его применение значительно снижает ресурс ПЭД, что связано с необходимостью его частых остановов и повторных пусков.

Одним из подходов к устранению данного недостатка, по мнению авторов, является построение систем защиты, основанных на принципе плавного регулирования температуры ПЭД без его полного останова путем соответствующего изменения режима работы УЭЦН. Возможность изменения режима современных УЭЦН в процессе работы

обеспечивается контроллерами частотных преобразователей напряжения питания ПЭД [3]. Таким образом, реализация данного принципа связана с модификацией алгоритмов и соответствующего программного обеспечения контроллеров частотных преобразователей.

Очевидно, что синтез эффективных алгоритмов регулирования с применением методов современной теории автоматического управления возможен только на основе динамических моделей регулируемых процессов [4]. В данном случае этой моделью является динамическая модель температурных процессов в ПЭД. При этом ПЭД должен рассматриваться как объект управления.

Известны различные подходы к построению моделей тепловых процессов в ПЭД. В частности, это модели, основанные на теории подобия и дифференциальных уравнениях теплопроводности [1, 2]. Целью построения данных моделей являлось исследование тепловых процессов и выработка рекомендаций по безопасной эксплуатации ПЭД. В связи с этим данные модели, как правило, не удовлетворяют требованиям к моделям, применяемым в теории автоматического управления, таким как отражение динамики процессов, выделенные управляемые, управляющие и возмущающие параметры, адаптивность и др.

В статье рассматривается подход к построению модели тепловых процессов в ПЭД, на основе которой возможно эффективное применение методов



теории автоматического управления для синтеза алгоритмов регулирования температуры.

**Схема тепловых потоков в ПЭД**

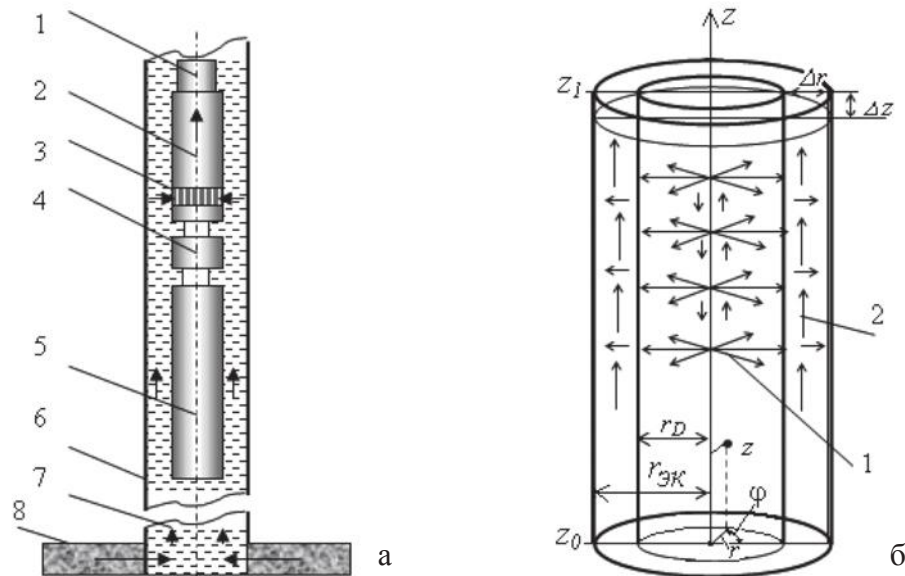


Рис. 1. Структура УЭЦН (а) и схема движения тепловых потоков в ПЭД (б): 1 – насосно-компрессорные трубы; 2 – центробежный насос; 3 – вход насоса; 4 – гидрозашита ПЭД; 5 – ПЭД; 6 – эксплуатационная колонна; 7 – область забоя скважины; 8 – продуктивный пласт

При этом добываемая жидкость, двигаясь в кольцевом зазоре ( $\Delta r$ ) между ПЭД и эксплуатационной колонной в сторону входа центробежного насоса, обеспечивает охлаждение двигателя.

Источниками тепла в ПЭД являются потери энергии, мощность которых определяется КПД двигателя. Тепловые потоки в ПЭД *1* движутся в радиальном и вертикальном направлениях в сторону охлаждающей жидкости вследствие эффекта диффузионного теплообмена, вызванного градиентом температур (рис. 1, б). В добываемой жидкости тепловой поток движется в радиальном и вертикальном направлениях *2* вследствие соответственно диффузионного и конвективного эффектов, вызванных градиентом температур и течением жидкости.

**Постановка задачи построения модели ПЭД как объекта управления**

Для эффективного применения модели для синтеза алгоритмов управления необходимо выполнение следующих условий:

- 1) модель должна иметь явно выраженные управляемые, управляющие и возмущающие параметры;
- 2) модель должна отражать динамику температурных процессов в зависимости от функций изменения управляющих и возмущающих параметров;
- 3) модель должна быть адаптивной к характеристикам реальных ПЭД и окружающей среды.

Для обеспечения возможности применения модели для управления температурой ПЭД приняты

ПЭД располагается в колонне обсадных труб, заполненной добываемой жидкостью, и обеспечивает вращение центробежного насоса (рис. 1, а).

следующие входные и выходные параметры.

В качестве выходного управляемого параметра здесь выступает температурное поле ПЭД, которое несет в себе информацию о температуре в каждой точке объема ПЭД в заданный момент времени; для цилиндрической системы координат температурное поле выражается функцией:

$$T_D(r, \varphi, z), r \in [0, r_D], \varphi \in [0, 360], z \in [0, z_1],$$

где  $r, \varphi, z$  – полярные координаты, соответственно радиус, полярный угол и аппликата.

В качестве входного управляющего параметра температурой ПЭД принята полная активная мощность  $N_D$ , потребляемая ПЭД; данный параметр может изменяться по заданному закону посредством управляемых преобразователей частоты, которые обеспечивают произвольные значения частоты и амплитуды питающего напряжения ПЭД.

В качестве входных возмущающих параметров, влияющих на температуру ПЭД и носящих неуправляемый (случайный) характер приняты следующие величины:

- температура добываемой жидкости  $T_{F0}$  перед ПЭД;
- температуропроводность  $a_F$  добываемой жидкости;
- дебит (поток) добываемой жидкости  $Q$ , зависящий от скорости движения  $v_F$  добываемой жидкости в кольцевом зазоре между ПЭД и эксплуатационной колонной.

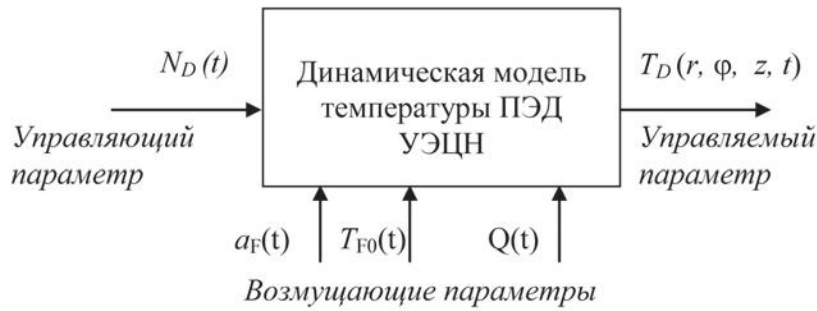


Рис. 2. Входные и выходные параметры температурной модели ПЭД

### Уравнение модели

В качестве основы для построения динамической модели теплового поля принято дифференциальное уравнение теплообмена Фурье – Кирхгофа, которое отражает все виды тепловых потоков (кон-

$$\frac{\partial T_D}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( ar \frac{\partial T_D}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( a \frac{\partial T_D}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( a \frac{\partial T_D}{\partial z} \right) + v_z \frac{\partial T_D}{\partial z} + v_r \frac{\partial T_D}{\partial r} + v_\varphi \frac{\partial T_D}{\partial \varphi} + \frac{1}{C\rho} q, \quad (1)$$

где  $a = \frac{\lambda}{C\rho}$  – коэффициент температуропроводности,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $C$  – коэффициент теплоемкости,  $\rho$  – плотность;  $v_z, v_r, v_\varphi$  – составляющие скорости движения;  $q = \frac{N}{V}$  – удельный

вективный, диффузионный, источников), представленных на схеме рис. 1. Обобщенная форма уравнения для цилиндрической системы координат имеет вид:

источник теплоты, отнесенный к единице объема, где  $N$  – мощность источника,  $V$  – объем.

Уравнение, приведенное в соответствии с принятой схемой движения тепловых потоков, имеет вид:

$$\frac{\partial T_D}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( a(r)r \frac{\partial T_D}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( a(r) \frac{\partial T_D}{\partial z} \right) + v_F \frac{\partial T_D}{\partial z} + \frac{1}{C\rho} q. \quad (2)$$

Здесь из исходного уравнения (1) исключены ряд членов, которые согласно схеме тепловых потоков равны нулю:

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left( a \frac{\partial T_D}{\partial \varphi} \right) = 0, v_r = \frac{\partial T_D}{\partial r} = 0; v_\varphi \frac{\partial T_D}{\partial \varphi} = 0.$$

$$a(r) = \begin{cases} a_D, 0 < r < r_D; \\ a_F, r_D < r < r_K. \end{cases} \quad v_Z(r) = \begin{cases} 0, 0 < r < r_D; \\ v_F, r_D < r < r_K. \end{cases} \quad q(r) = \begin{cases} q_D, 0 < r < r_D \\ 0, r_D < r < r_K. \end{cases} \quad (3)$$

где  $a_D = \frac{\lambda_D}{C_D \rho_D}$ ,  $a_F = \frac{\lambda_F}{C_F \rho_F}$  – соответственно коэффициенты температуропроводности ПЭД и добываемой жидкости;  $\lambda_D, \lambda_F, C_D, C_F, \rho_D, \rho_F$  – соответственно коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и плотности ПЭД и добываемой жидкости;  $v_z = v_F$  – скорость движения добываемой жидкости в кольцевом зазоре между ПЭД и эксплуатационной колонной;  $q = \frac{N}{V_D}$  – объемная плотность мощности источника тепла в ПЭД;  $N$  – мощность источника

Значения коэффициентов уравнения (2) отражают свойства слоев схемы движения тепловых потоков и определяются кусочными функциями:

тепла в ПЭД,  $V_D$  – объем ПЭД.

### Входные и выходные параметры модели

Рассмотрим способ введения в уравнение (2) принятых входных и выходных параметров модели (см. рис. 2).

Выходной параметр модели – поле температур в ПЭД – является решением уравнения (2) в виде функции времени его изменения:  $T_D(r, \varphi, z, t)$ .

Входной управляющий параметр модели – полная активная мощность  $N_D$ , потребляемая ПЭД. Данный параметр вводится в модель посредством

объемной плотности мощности источника тепла в ПЭД:  $q = \frac{\Delta N}{V_D}$ , где  $\Delta N$  – потери полезной мощности в ПЭД,  $V_D$  – объем ПЭД. Потери можно выразить с помощью КПД ПЭД ( $\eta_D$ ):  $\Delta N = N_D(1 - \eta_D)$ , тогда иско-мое соотношение, связывающее модель и входной управляющий параметр  $N_D$  имеет вид:

$$q_D(N_D, r) = N_D \frac{(1 - \eta_D)}{V_D}. \quad (4)$$

Рассмотрим способы введения в модель пара-метров, отражающих возмущающие воздействия:

- температуропроводность жидкости входит в модель явно в виде коэффициента  $a_F$ ;
- дебит (поток)  $Q$  добываемой жидкости вво-дится в модель посредством скорости движения жидкости  $v_F$  в кольцевом зазоре между ПЭД и ОК, которая определяется соотношением:  $v_F = \frac{Q}{S \cdot 86400}$ ,

$$\frac{\partial T_D}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( a(r)r \frac{\partial T_D}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( a(r) \frac{\partial T_D}{\partial z} \right) + \frac{Q}{S \cdot 86400} \frac{\partial T_D}{\partial z} + \frac{1}{C_p} N_D \frac{(1 - \eta_D)}{V_D}. \quad (5)$$

#### Алгоритм применения модели

Применение модели при анализе и синте-зе алгоритмов регулирования температуры ПЭД связано с оценкой динамики теплового поля ПЭД  $T_D(r, z, t), t \in [t_0, t_1], r \in [0, r_D], z \in [0, z_1]$  для за-данных функций изменения управляющего  $N_D(t)$  и возмущающих параметров  $T_{F0}(t), P_{CNI}(t)$ . Для выпол-нения указанных оценок необходимо построение временных характеристик теплового поля путем решения уравнения модели с заданными функция-ми изменения значений управляющего и возму-щающих параметров, а также заданных начальных и граничных условий. Для решения дифференци-ального уравнения (2) применен численный метод, основанный на его конечно-разностной аппрокси-мации.

#### Результаты вычислительных экспериментов

Для оценки адекватности модели выполнялось сравнение результатов вычислительных экспери-ментов с имеющимися промысловыми данными [1, 2]. Рассмотрим результаты одного из проведен-ных экспериментов.

Исходные данные:

*Параметры ПЭД:*

- диаметр ПЭД  $d_D = 0,117$  м; длина ПЭД  $L_D = 3$  м;
- диаметр эксплуатационной колонны  $d_{ЭК} = 0,146$  м;
- теплопроводность ПЭД:  $\lambda_{D0} = 70$  Вт/(м °С);
- теплоемкость ПЭД:  $C_{D0} = 500$  Дж/(кг °С);
- плотность ПЭД:  $\rho_{D0} = 7,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;
- КПД ПЭД  $\eta_D = 0,83$ .

где  $S$  – площадь кольцевого зазора между ПЭД и эксплуатационной колонной;

– температура добываемой жидкости перед ПЭД  $T_{F0}$  вводится в модель посредством граничных условий уравнения (2);

– граничные условия первого рода – темпера-тура ПЭД на глубине  $z_0$  нижнего торца ПЭД равна температуре жидкости на входе ПЭД;

$$T(r, z_0, t) = T_{F0}, t \in [t_0, t], r \in [0, r_{OK}];$$

– граничные условия второго рода – производ-ная температуры по глубине на глубине  $z_1$  верхнего торца ПЭД  $\left. \frac{\partial T_D}{\partial z} \right|_{z=z_1} = 0$ .

В результате динамическая модель тепловых процессов ПЭД, включающая в себя управляемый, управляющий и возмущающие параметры, принима-ет вид:

*Параметры добываемой жидкости:*

- теплопроводность жидкости:  $\lambda_{F0} = 0,136$  Вт/(м °С);
- теплоемкость жидкости:  $C_{F0} = 2000$  Дж/(кг °С);
- плотность жидкости:  $\rho_{F0} = 825$  кг/м<sup>3</sup>.

*Параметры номинального режима скважины:*

- номинальный дебит:  $Q_0 = 75$  м<sup>3</sup>/сут.;
- номинальная мощность ПЭД:  $N_{D0} = 100$  кВт;
- номинальная температура жидкости перед ПЭД:  $T_{F0} = 90$  °С;
- номинальное давление на входе ЦН: 4 МПа;
- номинальное давление на выходе ЦН: 15 МПа.

На рис. 3–5 представлены результаты модели-рования тепловых процессов ПЭД. На рис. 3 пока-заны временные характеристики, отражающие ди-намику температурного поля ПЭД при его выводе в номинальный режим.

На рис. 4 показаны временные характеристики, отражающие динамику температур в различных точках ПЭД при ступенчатых изменениях управ-ляющего параметра  $N_D$ .

На рис. 5 показаны временные характеристики, отражающие динамику температурного поля ПЭД при ступенчатых изменениях возмущающих воз-действий  $T_{F0}$  (рис. 4, а) и  $Q$  (рис. 4, б). Была проведе-на серия машинных экспериментов для различных ПЭД и исходных данных скважин. Сравнение полу-ченных результатов с характеристиками, приведен-ными для промышленных установок [1, 2], позво-ляет сделать вывод об адекватности разработанной динамической модели.

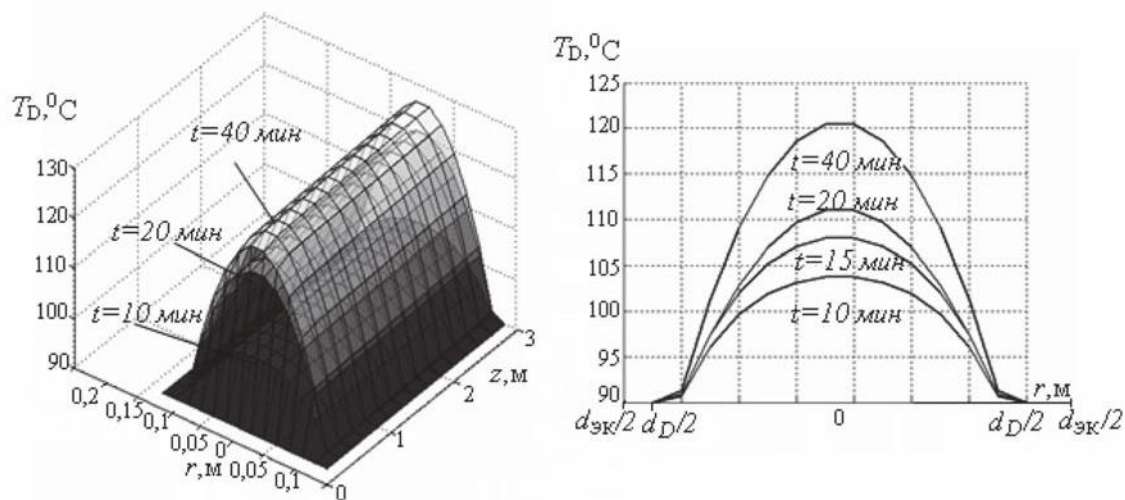
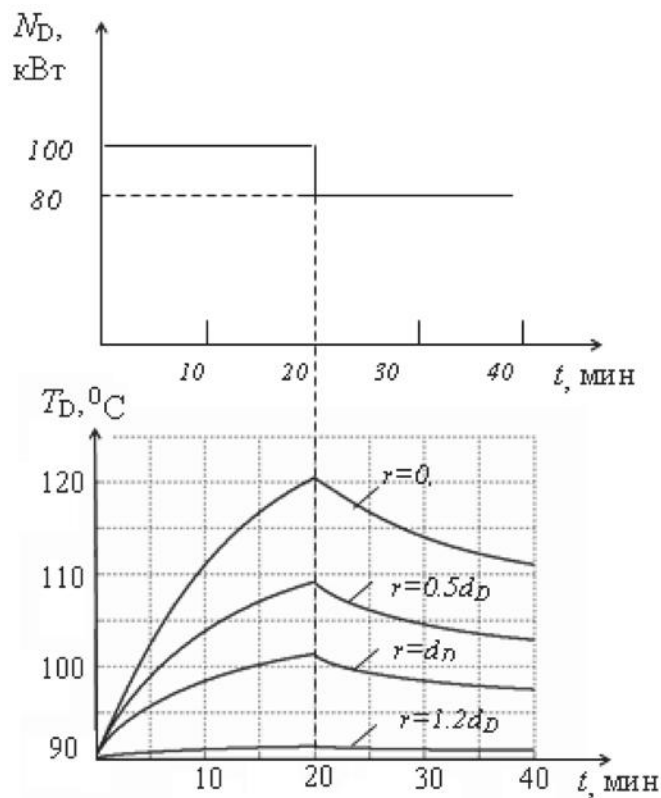


Рис. 3. Динамика теплового поля при выводе ПЭД в номинальный режим


 Рис. 4. Динамика температур в различных точках ПЭД ( $r = 0$  м,  $z = 3$  м), ( $r = 0,5d_D$  м,  $z = 3$  м), ( $r = d_D$  м,  $z = 3$  м), ( $r = 1,2d_D$  м,  $z = 3$  м) при ступенчатых изменениях управляющего воздействия  $N_D$ 

### Заключение

В результате проведенных исследований разработана динамическая модель температурных процессов в ПЭД, основанная на дифференциальном уравнении теплопроводности Фурье – Кирхгофа, отличающаяся тем, что в нее введены управляемые, управляющие и возмущающие параметры, что позволяет рассматривать температурное поле двигателя как динамический управляемый параметр и выполнять синтез алгоритмов его непрерывного регулирования. Адекватность модели подтвержда-

ется результатами вычислительных экспериментов, моделирующих процессы регулирования температуры ПЭД.

### Список литературы

1. Купцов С.М. Температурное поле погружного электродвигателя скважинных насосных установок [Текст] / С.М. Купцов // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2010. – № 4. – С. 36–38.
2. Язьков А.В. Исследование влияния изменения технологических параметров на охлаждение по-

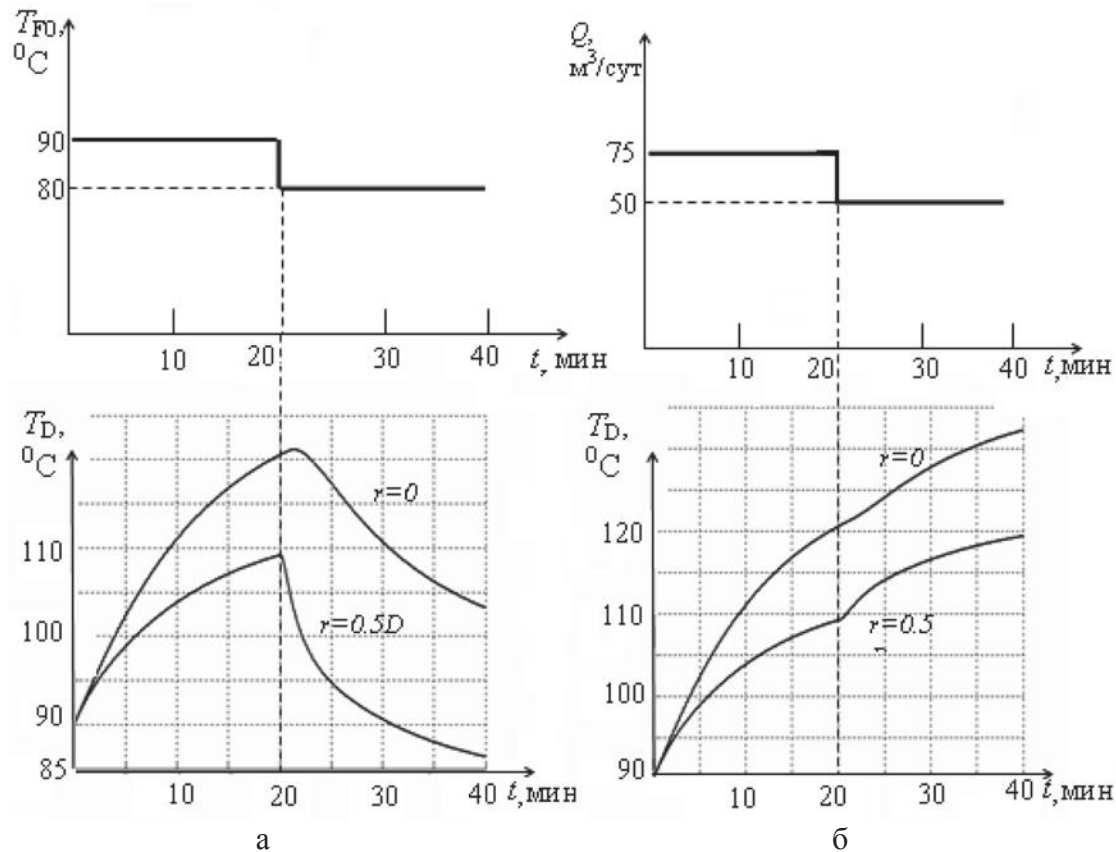


Рис. 5. Динамика температурного поля ПЭД в точках ( $r = 0, z = 3$ ) и ( $r = 0,5d_p, z = 3$ ) при ступенчатых изменениях возмущающих воздействий  $T_{F0}$  (а),  $Q$  (б)

грузного электродвигателя [Текст] / А.В. Язьков // Нефтепромысловое оборудование. – 2007. – № 11. – С. 125–125.

3. *Гареев А.А.* О влиянии частоты тока на тепловое состояние электроцентробежного насоса [Текст] / А.А. Гареев, Р.И. Вахитова, Д.А. Сарачева // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 3. – С. 113–118.

4. *Нугаев И.Ф.* Динамическая модель нефтедобывающей скважины на базе УЭЦН как объекта управления [Текст] / И.Ф. Нугаев, Р.В. Искужин // Нефтегазовое дело. – 2012. – № 5. – С. 31–46.

#### References

1. *Kupcov S.M.* Temperaturnoe pole pogruzhnogo elektrodvigatelja skvazhinnyh nasosnyh ustanovok

[Текст] / S.M. Kupcov // Territorija «NEFTEGAZ». – 2010. – № 4. – С. 36–38.

2. *Jaz'kov A.V.* Issledovanie vlijanija izmenenija tehnologicheskikh parametrov na ohlazhdenie pogruzhnogo elektrodvigatelja [Текст] / A.V. Jaz'kov // Neftepromyslovoe oborudovanie. – 2007. – № 11. – С. 125–125.

3. *Gareev A.A.* O vlijanii chastoty toka na teplovoe sostojanie elektrocentrobezhnogo nasosa [Текст] / A.A. Gareev, R.I. Vahitova, D.A. Saracheva // Neftegazovoe delo. – 2011. – № 3. – С. 113–118.

4. *Nugaev I.F.* Dinamicheskaja model' nefteobuvajushhej skvazhiny na baze UJeCN kak ob#ekta upravlenija [Текст] / I.F. Nugaev, R.V. Iskuzhin // Neftegazovoe delo. – 2012. – № 5. – С. 31–46.



**Кушнир В.Г.**  
**Kushnir V.G.**

*доктор технических наук, профессор,  
заведующая кафедрой «Машины, тракторы  
и автомобили» Костанайского государственного  
университета имени А. Байтурсынова,  
Республика Казахстан, г. Костанай*



**Поезжалов В.М.**  
**Poyezhalov V.M.**

*кандидат физико-математических наук, до-  
цент кафедры «Электроэнергетика и физика»  
Костанайского государственного университе-  
та имени А. Байтурсынова,  
Республика Казахстан, г. Костанай*

УДК 697.972+697.978+697.975

## **СИСТЕМА ОТОПЛЕНИЯ, ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА, ОСНОВАННАЯ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ**

Рассмотрены температурные особенности природно-климатической зоны Северного Казахстана и прилегающих районов России. Показано, что эти территории обладают значительным потенциалом естественного холода. Предложена схема отопительно-вентиляционной системы с кондиционированием, основанная на использовании температурно-климатических особенностей данной местности. Предложена технологическая схема отопления, вентиляции и кондиционирования, обладающая достаточной гибкостью. Схема включает в себя как традиционные источники тепловой энергии (газовый нагреватель) так и нетрадиционные (солнечный водонагреватель и тепловой аккумулятор). Основное отличие системы заключается в том, что она не зависит от центрального теплоснабжения. Охлаждение воздуха в системе кондиционирования происходит за счет аккумулированного в зимнее время холода. Аккумуляция происходит за счет замораживания и охлаждения льда. Энергия для этого процесса черпается из окружающего пространства, низкая температура которого обусловлена климатом данной местности. Описан режим работы схемы в различные времена года и указано, что при реализации подобной схемы, возможно повышение коэффициента полезного действия как за счет использования зимнего холода, так и за счет летнего тепла. Определены основные особенности системы и перспективы ее автоматизации и развития. Показано, что использование аккумулятора холода, заряжаемого с использованием зимнего воздуха, позволяет повысить эффективность системы отопления и кондиционирования, снизить стоимость и энергоемкость.

*Ключевые слова:* отопление, вентиляция, кондиционирование, аккумулятор холода, применение льда в системе кондиционирования, автономная система теплоснабжения и кондиционирования, энергоэффективность, зеленые технологии.

## **CLIMATIC FACTORS-BASED HEATING, VENTILATION AND AIR CONDITIONING SYSTEM**

This article considers natural and climatic features of North Kazakhstan and the adjacent regions of Russia. It is shown that these territories have considerable potential of natural cold. A project of heating and ventilation system with air conditioning which uses the temperature and climatic features of the considered region. A technological scheme of flexible heating, ventilation and air conditioning is discussed. The concept includes

traditional heat energy sources (gas heater) and some non-traditional (solar water heater, heat accumulator). The main distinction of the system is that it doesn't depend on district heating. Air cooling in the conditioning system is done by accumulated in winter cold. The cold accumulates by freezing and cooling ice. The energy needed to freeze the ice is obtained from the environment, which is caused by the climate of the considered region. System's operating modes in various seasons is described and shown that it's possible to increase the system efficiency by using cold in winter and heat in summer. The main features of system and prospect of its automation and future development are discussed. It is shown that use of the cold accumulator which is "charged" by winter air can increase the heating and air conditioning system efficiency, reduce its cost and power consumption.

*Key words:* heating, ventilation, cold accumulator, using ice in air conditioning, automated heating and air conditioning system, energy efficiency, green technologies.

Современные жилые и общественные здания, как, впрочем, и другие здания и сооружения значительно отличаются от таковых, какими они были еще 20–30 лет назад. Речь идет не только о планировке зданий и применяемых строительных материалах, а о степени комфорта пребывания и проживания в этих зданиях. Требуемый для комфортного проживания или работы и отдыха микроклимат в значительной степени определялся только возможностью обеспечивать вентиляцию помещений. Системы кондиционирования воздуха были редкими и были представлены в основном оконными кондиционерами [1]. А ведь именно микроклимат определяет самочувствие человека, его здоровье и работоспособность. С развитием рыночных отношений стало понятно, что климатическая техника призвана обеспечить более высокий уровень комфорта, конкурентное преимущество общественных заведений, в первую очередь развлекательных и торговых. Воздушное отопление, совмещенное с вентиляцией, создает в помещении удовлетворительный микроклимат и обеспечивает приятные условия воздушной среды. Комфортные системы кондиционирования воздуха служат для создания и автоматического поддержания температуры, относительной влажности, чистоты и скорости движения воздуха, отвечающих оптимальным санитарно-гигиеническим требованиям.

Внедрение систем кондиционирования воздуха привело к возрастанию энергопотребления. Учитывая то обстоятельство, что энергоемкость отечественного национального продукта и без того в три раза выше мировой, то по мере насыщения зданий отопительно-вентиляционными системами, осветительной техникой и разнообразным электробытовым оборудованием, все более очевидным становится необходимость внедрения энергосберегающих технологий [2].

С точки зрения энергосбережения важно определить, какие именно меры будут эффективны. Скажем, идея замены лампочек накаливания на энергосберегающие – замечательная. Однако в общем энергопотреблении страны затраты энергии

на освещение не превышают и 3%. В то же время немалый вклад в показатель энергопотребления вносит именно климатическая техника, которая в общественных зданиях зачастую отвечает за 70% всего энергопотребления. Требование повышения энергоэффективности производственных процессов, транспорта и жилого фонда привело к необходимости совместить принципы энергосбережения с модернизацией систем кондиционирования [3].

Особенностью применения систем вентиляции и кондиционирования воздуха в большинстве регионов России и Казахстана являются условия резко континентального климата, определяющего значительную амплитуду колебаний наружного воздуха как в течение суток, так и в продолжение года. Поэтому для повышения экономических показателей систем возникает необходимость учета резкого изменения наружных температур, влажности и ветровой нагрузки в режиме реального времени. Вместе с тем именно природно-климатические особенности регионов позволяют существенно сократить энергозатраты на системы отопления и кондиционирования воздуха.

По данным Костанайского гидрометцентра климат города резко континентальный, с жарким сухим летом и холодной малоснежной зимой.

В таблице 1 приведены средние данные за 2005–2010 годы.

Для климата характерны резкие перепады температур в течение дня; средняя скорость ветра – 3,2 м/с, преимущественно южного направления зимой и северного направления летом. При сравнении видно, что средние температуры года (таблица 2) несущественно отличаются от среднегодовых за пять лет. Это позволяет делать прогноз о стабильности температурно-климатических факторов.

Использовать особенности природно-климатической зоны России и Северного Казахстана для сохранения продуктов питания научились очень давно. Ледники и ледниковые погреба известны с незапамятных времен. Несложные подсчеты показывают, что для нагревания 1000 кг льда от температуры минус 10 градусов до температуры плюс 20

Средняя температура по месяцам за пять лет

Показатель	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Средний максимум, °С	-10,1	-9,1	-2	11,3	20,6	26,7	27,1	25,4	19	10,2	-1,5	-8,1
Средняя темп., °С	-14,5	-14	-7,3	5,4	13,8	19,9	20,9	18,8	12,5	4,8	-5,5	-12,3
Средний минимум, °С	-18,9	-18,6	-12	0,2	7,5	13,5	15,2	13,1	7,1	0,5	-9,1	-16,5

Таблица 2

Средние температуры года

Показатель	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Средний максимум, °С	-4,1	-0,1	2,1	23,7	26,8	29,6	33,2	34,4	34,5	22,2	6,3	0,6
Средняя темп., °С	-18,8	-17,6	-8	7,2	14,1	18,2	21,2	16,7	15,8	6,6	-8,2	-15,1
Средний минимум, °С	-31,	-35,5	-26,1	-8,7	-0,6	5,7	8,6	5	2	-4,7	-25,5	-27,5

градусов потребуется около 440 МДж тепла.

Принцип накопления зимнего холода для использования летом и летнего тепла для использования зимой предлагается для снижения энергопотребления общественных зданий и производственных помещений. Лед для накопления холода, в частности, используется для систем кондиционирования воздуха в некоторых небоскребах США [4] или в системах охлаждения воздуха в шахтах [5]. Для повышения экономической эффективности предлагается использовать тепловые аккумуляторы, встроенные в систему отопления и кондиционирования воздуха. С учетом рекомендаций [6] и при наличии центрального газоснабжения комплексная система поддержания микроклимата в помещениях позволит отказаться от системы центрального теплоснабжения.

На рисунке на стр. 48 показана принципиальная схема отопительно-вентиляционной системы с кондиционированием воздуха.

Тепловой аккумулятор 1 представляет собой теплоизолированную емкость объемом, рассчитанным для обслуживаемого здания. Например, для 100 дней кондиционирования воздуха в здании пло-

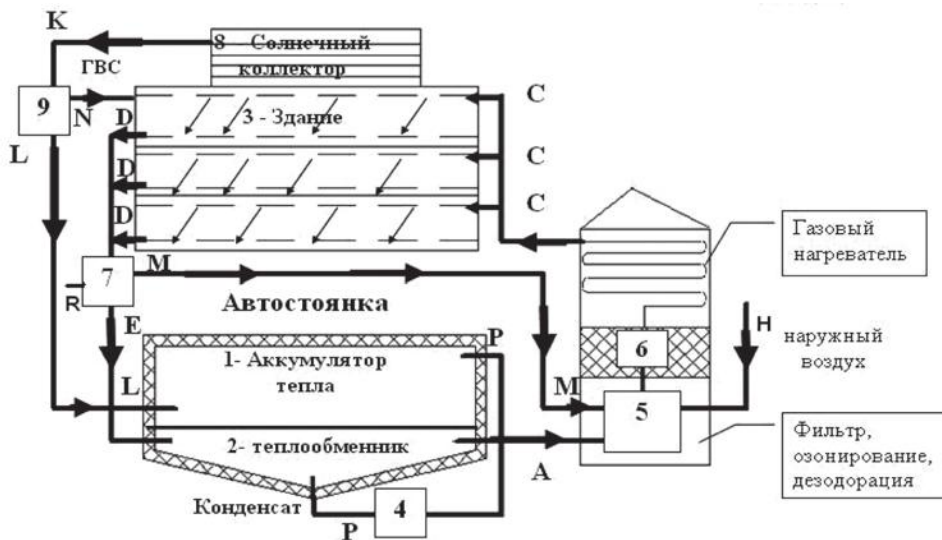
щадью 1000 кв. м с высотой потолков 3,5 м в зоне Северного Казахстана потребуется тепловой аккумулятор объемом 250 куб. м. Аккумулятор может находиться в подвальном помещении здания 3 или может располагаться под землей вблизи него.

В последнем случае сверху теплового аккумулятора может быть устроена клумба, автостоянка и т. п. В нижней части аккумулятора находится теплообменник 2, который воздуховодом А соединен с отопительно-вентиляционной системой здания. На рисунке не показаны ребра теплообменника, расположенные по обе стороны от границы теплообменника и аккумулятора, которые увеличивают площадь теплообмена.

Принцип работы системы удобнее всего рассмотреть начиная с весенне-летнего периода.

Пусть в аккумуляторе находится лед, с температурой около  $-10$  °С. Вентилятором, установленным в блоке 5, по воздуховоду А холодный воздух из теплообменника подается в блок обработки и смешивания 5 и 6. Здесь воздух фильтруется, при необходимости дезодорируется и озонируется (для обеззараживания) и подается в помещение по каналам С через теплоизолированный от внешней





Принципиальная схема отопительно-вентиляционной системы с кондиционированием воздуха

среды газовый нагреватель. Газовый нагреватель в это время не работает. В помещении через индивидуальные распределители и регуляторы воздух поступает к рабочим местам, поддерживая температуру на необходимом уровне. Отработавший воздух нагревается, пополняется испаряемой влагой и через систему рециркуляции направляется через клапан 7 в теплообменник по воздуховодам *D* и *E*. Воздуховод *M* клапаном 7 перекрыт. К воздуху, поступающему по воздуховоду *A* в блоке 5 может примешиваться наружный воздух, поступающий по воздуховоду *H* для поддержания требуемой температуры на входе воздуха в помещение.

Установленный на крыше здания солнечный коллектор обеспечивает здание горячей водой, сохраняемой в теплоизолированных емкостях в местах потребления. Влага, находящаяся в рециркуляционном воздухе, при попадании в теплообменник конденсируется. По мере необходимости насос 4 удаляет конденсат в емкость теплового аккумулятора по трубе *P*. Если температура наружного воздуха опускается до приемлемых 20 градусов, то клапан 5 перекрывает вход воздуха из воздуховода *A* и подает воздух только через вход *H*.

Так продолжается до тех пор, пока температура наружного воздуха не снижается ниже 20 градусов. В это время клапанная система 9 начинает подавать теплоноситель в аккумулятор тепла по трубе *L*, который нагревает воду, продолжая обеспечивать здание горячей водой. В принципе это несущественно повышает экономичность системы и может не устанавливаться.

Вода в аккумуляторе нагревается за счет солнечной энергии, а воздух в помещении циркулирует по «малому кругу» *C-D-M*. Из рециркуляционных

воздуховодов через клапан 7 воздух по каналу *M* попадает в блок обработки и газовый нагреватель. При необходимости газовый нагреватель может быть включен в режиме, обеспечивающем на входе в помещение необходимую и комфортную температуру.

Когда температура наружного воздуха становится отрицательной, солнечный коллектор 8 отключается от подогрева воды в аккумуляторе тепла. Клапан 7 соединяет воздушный канал *R* с каналом *E*, и морозный воздух улицы подается в теплообменник 2 аккумулятора тепла *I*. Там он нагревается за счет тепла, накопленного солнечным водонагревателем и подается в топку газового нагревателя, увеличивая его КПД. По мере прохождения холодного воздуха через теплообменник вода в аккумуляторе остывает и по достижении температуры кристаллизации обращается в лед. Так происходит замораживание льда и запасается холод для использования в системе кондиционирования в жаркий период года. Поскольку отвод тепловой энергии осуществляется снизу, то и лед начинает намерзать со дна аккумулятора. Это исключает размораживание бака аккумулятора. Газовый нагреватель в это время работает в штатном режиме, осуществляя обогрев здания и его горячее водоснабжение совместно с солнечным коллектором.

Предлагаемая система позволит поддерживать комфортную температуру в здании в рабочее время. Такая система теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха является очень гибкой. В нерабочее время система автоматического управления микроклиматом, например, подобная ТАС 920, может работать в режиме Sleep («Сон») – уменьшать температуру внутри здания на

10–12 градусов и поддерживать ее на этом уровне. Ввиду того, что такая система вентиляции и отопления обладает малой инерционностью, то режим комфортного отопления может включаться за 30–40 минут до начала рабочего дня. В конце рабочего дня происходит естественное охлаждение здания и только потом включается система поддержания пониженной температуры.

Кондиционирование воздуха с применением охлаждения воздуха от льда тоже может работать в таком режиме, только с тем отличием, что температура в помещениях будет отличаться от комфортной в большую сторону. Это позволит существенно сократить расходы как на отопление здания, так и на его кондиционирование. Незначительные колебания температуры вблизи ее комфортного значения, входят в поле допустимых для растений и оргтехники, находящихся в здании.

Учитывая то, что большая часть затрат на содержание и эксплуатацию зданий представляют затраты на энергию, даже при значительных капитальных вложениях предлагаемая система будет экономически оправдана, благодаря низким удельным капиталовложениям и энергозатратам.

#### Список литературы

1. *Ананьев В.А.* Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика: Учебное пособие [Текст] / В.А. Ананьев, Л.Н. Балужева, А.Д. Гальперин и др. – М.: Евроклимат, 2001. – 416 с.
2. *Белова Е.М.* Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях [Текст] / Е.М. Белова. – М.: Евроклимат, 2001. – 416 с.
3. *Краснов Ю.С.* Системы вентиляции и кондиционирования. Рекомендации по проектированию, испытаниям и наладке [Текст] / Ю.С. Краснов, А.П. Борисоглебская, А.В. Антипов. – М.: ТермоКул, 2004. – 373 с.
4. *Wald, Matthew L.* Green Blog: Storing Energy as Ice? [Electronic resource] / Wald, L. Matthew // The New York Times. – URL: <http://www.oim.ru/green.blogs.nytimes.com/2010/01/27/storing-energy-as-ice>.
5. *Михайленко Т.П.* Использование водяной

шуги в системах кондиционирования воздуха с промежуточным теплоносителем [Текст] / Т.П. Михайленко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 3 (60).

6. *Внутренние санитарно-технические устройства в 3 частях. Часть 3. Книга 1. Вентиляция и кондиционирование воздуха: Справочник проектировщика* [Текст] / В.Н. Богословский, А.И. Пирумов, В.Н. Посохин и др.; под ред. Н.Н. Павлова и Ю.И. Шиллера. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1992.

#### References

1. *Anan'ev V.A.* Sistemy ventiljicii i kondicionirovanija. Teorija i praktika: Uchebnoe posobie [Tekst] / V.A. Anan'ev, L.N. Balueva, A.D. Gal'perin i dr. – М.: Evroklimat, 2001. – 416 s.
2. *Belova E.M.* Central'nye sistemy kondicionirovanija vozduha v zdanijah [Tekst] / E.M. Belova. – М.: Evroklimat, 2001. – 416 s.
3. *Krasnov Ju.S.* Sistemy ventiljicii i kondicionirovanija. Rekomendacii po proektirovaniju, ispytaniyam i naladke [Tekst] / Ju.S. Krasnov, A.P. Borisoglebskaja, A.V. Antipov. – М.: TermoKul, 2004. – 373 s.
4. *Wald, Matthew L.* Green Blog: Storing Energy as Ice? [Electronic resource] / Wald, L. Matthew // The New York Times. – URL: <http://www.oim.ru/green.blogs.nytimes.com/2010/01/27/storing-energy-as-ice>.
5. *Mihajlenko T.P.* Ispol'zovanie vodjanoj shugi v sistemah kondicionirovanija vozduha s promezhutochnym teplonositelem [Tekst] / T.P. Mihajlenko // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 3 (60).
6. *Vnutrennie sanitarno-tehnicheskie ustrojstva v 3 chastjah. Chast' 3. Kniga 1. Ventiljacija i kondicionirovanie vozduha. Spravochnik proektirovshhika* [Tekst] / V.N. Bogoslovskij, A.I. Pirumov, V.N. Posohin i dr.; pod red. N.N. Pavlova i Ju.I. Shillera. – 4-e izd., pererab. i dop. – М.: Strojizdat, 1992.



**Зикий А.Н.**  
**Zikiy A.N.**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
главный конструктор Научно-  
конструкторского бюро моделирую-  
щих и управляющих систем,  
ФГАОУ ВПО «Южный федеральный  
университет», Россия, г. Таганрог



**Зламан П.Н.**  
**Zlaman P.N.**

ведущий инженер-конструктор  
Научно-конструкторского бюро  
моделирующих и управляющих  
систем ФГАОУ ВПО «Южный  
федеральный университет»,  
Россия, г. Таганрог



**Власенко Д.В.**  
**Vlasenko D.V.**

ассистент кафедры «Инфор-  
мационная безопасность теле-  
коммуникационных систем»  
Технологического института  
ФГАОУ ВПО «Южный феде-  
ральный университет», Россия,  
г. Таганрог



**Гончарова Т.О.**  
**Goncharova T.O.**

студентка ФГАОУ ВПО «Южный  
федеральный университет»,  
Россия, г. Таганрог



**Третьяк А.А.**  
**Tretyak A.A.**

студент ФГАОУ ВПО «Южный  
федеральный университет»,  
Россия, г. Таганрог

УДК 697.972+697.978+697.975

## ФИЛЬТРЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Полосовые фильтры являются важной составной частью приемо-передающей аппаратуры. Именно они определяют избирательность приемника по всем каналам приема и подавление побочных продуктов в передатчике. Первое, но не массовое применение фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) нашли в радиолокационных станциях. Первое, наиболее массовое применение они нашли как фильтры промежуточной частоты телевизионных приемников еще в восьмидесятых годах прошлого века. Сейчас фильтры на ПАВ применяются во всех отраслях радиосвязи и радиолокации.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование амплитудно-частотной характеристики полосового фильтра и диплексера, использующих поверхностные акустические волны.

Представлены результаты экспериментального исследования фильтра на ПАВ с частотой настройки 736 МГц и диплексера на ПАВ с каналами 45 и 48 МГц. Показано, что минимальные потери в полосе пропускания не превышают 3 дБ, а развязка между каналами диплексера более 45 дБ. Потери на гармониках основной частоты колеблются в пределах от 30 до 43 дБ. АЧХ получены двумя методами: снятием по

точкам с помощью ГСС и анализатора спектра, а также фотографированием с экрана характериографа Х1-55. Различие в результатах измерений не превышает погрешности измерений. Высокие электрические параметры, малые габариты, умеренная стоимость фильтров позволяют их широко использовать в современных средствах мобильной связи.

Целесообразно использовать фильтр HDF736с как преселектор приемника и «фильтр подчистки» в маломощных каскадах передатчика дециметрового диапазона. Диплексер HDD45/48 можно применить как устройство развязки каналов приема и передачи в маломощном приеме-передатчике УКВ-диапазона, так и в качестве фильтра промежуточной частоты.

*Ключевые слова:* ПАВ-фильтр, диплексер на ПАВ, АЧХ, эксперимент.

## FILTERS ON THE SURFACE-ACOUSTIC WAVE

Bandpass filters are the important part of transceivers. They determine selectivity of receivers by all channels and side products reduction of transmitters. The first, but not mass application of bandpass filters been found in radar stations. The first, more popular application of bandpass filters been found in TV-receivers as intermediate frequency filters in 80's. Nowadays SAW-filters are used in all branches of telecommunication and radiolocation.

The objective of this article is experimental research of frequency response functions of bandpass filter and diplexer, which use surface acoustic waves.

The results of experimental research of 736 MHz SAW-filter and 45 and 48 MHz channels SAW-diplexer are presented. It is shown, that minimal losses on band pass is not higher than 3 dB, and cross-channel losses of diplexer more than 45 dB. Main frequency harmonics are in 30–45 dB range. Frequency response functions been got by two methods: using spectrum analyzer and trigger generator by points and using screenshots from HI-55 curve tracer. The difference in results of two methods is not higher than measurement error. Good electrical characteristics, small size and moderate cost allow widely usage of such filters in modern mobile communications.

It is expedient to use HDF73C filter as radio receiver preselector and as “cleaner filter” in low-power cascades of decimeter-band transmitter. HDD45/48 diplexer can be used as transmission and receive channels isolator in VHF-band transceiver and also as intermediate frequency filter.

*Key words:* SAW-filter, SAW-diplexer, frequency response function, experiment.

В настоящее время имеется обширная литература, посвященная синтезу и анализу фильтров на ПАВ, их конструированию и изготовлению [1–9].

Однако в перечисленной литературе совершенно недостаточно сведений для выбора фильтра применительно к конкретной разработке. Более полные сведения содержатся в [10, 11], однако и в них часто не указывают заграждение на второй, третьей и других гармониках полезного сигнала. Поэтому экспериментальное исследование серийных фильтров является актуальным.

В качестве объектов исследования выбраны фильтры марки HDF736, HDD45/48 для работы на частотах 736, 45 и 48 МГц. Эти частоты широко используются в мобильной связи, поэтому результаты такого исследования представляют несомненный интерес.

Для испытаний фильтров на ПАВ был изготовлен макет, фото которого представлено на рисунке 1. Из этого рисунка видно, что макет представляет собой печатную плату из фольгированного стеклотекстолита размером 40 x 40 мм. На плате установлены два разных фильтра и два соединителя типа SMA, гнездо.

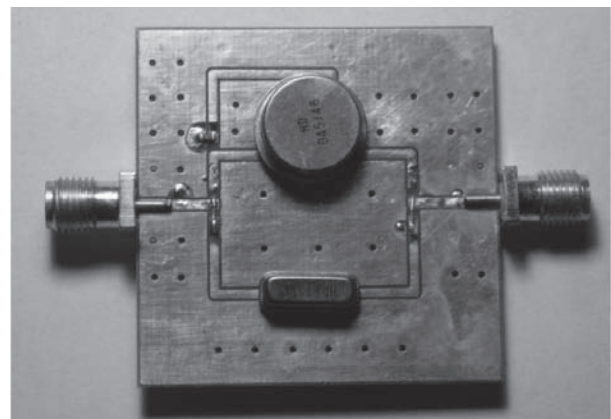


Рис. 1. Фото платы фильтров

Экспериментальное исследование АЧХ фильтров проводилось на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 2. Из этого рисунка видно, что в качестве источника сигналов использован генератор сигналов ВЧ типа E8267D фирмы Agilent Technologies. В качестве измерителя уровня выходного сигнала использован анализатор спектра 8564ЕС той же фирмы.

В первом эксперименте измерение АЧХ проводилось по точкам в диапазоне 686–786 МГц с шагом

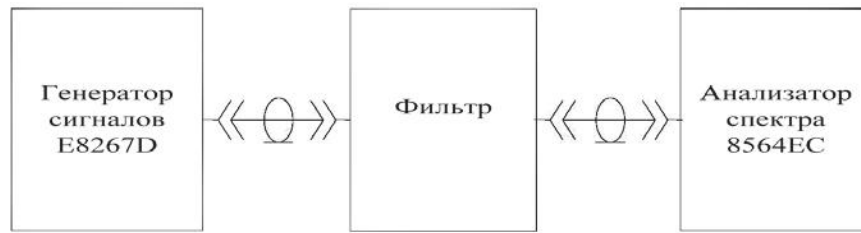


Рис. 2. Структурная схема измерительной установки

1 МГц. Результаты этого эксперимента отображены на рисунке 3.

Во втором эксперименте измерение АЧХ канала 45 МГц проводилось по точкам в диапазоне 40–50 МГц с шагом 0,1 МГц. Результаты второго эксперимента показаны на рисунке 4.

В третьем эксперименте измерение АЧХ 48 МГц проводилось в диапазоне частот 43–53 МГц с шагом 0,1 МГц. Результаты третьего эксперимен-

та можно видеть на рисунке 5.

В четвертом эксперименте проводилось фотографирование АЧХ фильтров с экрана характеристикографа типа X1-55. Результаты фотографирования представлены на рисунках 6, 7, 8. Результаты измерений по точкам с помощью ГСС и анализатора спектра и результаты фотографирования практически совпадают.

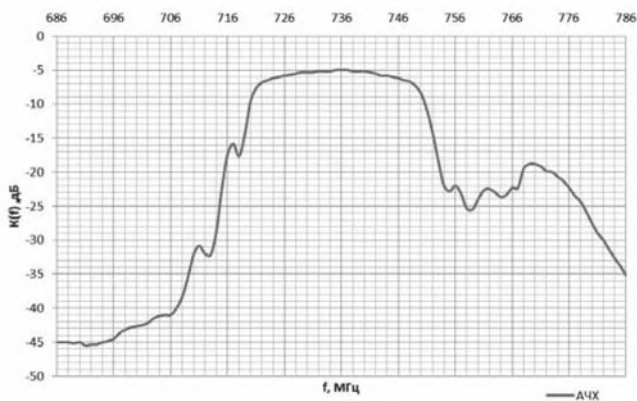


Рис. 3. АЧХ ПАВ фильтра 736 МГц

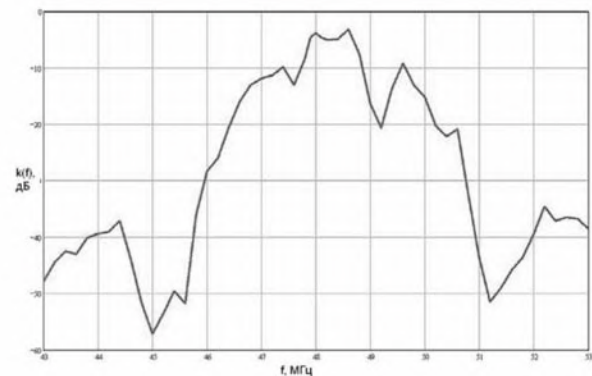


Рис. 5. АЧХ ПАВ фильтра 48 МГц

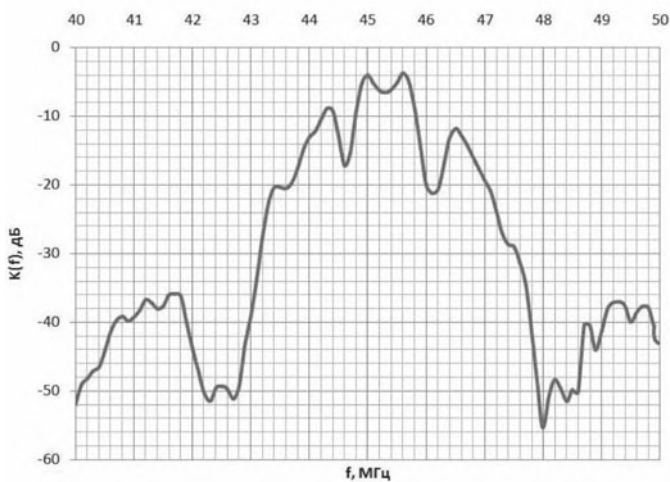


Рис. 4. АЧХ ПАВ фильтра 45 МГц

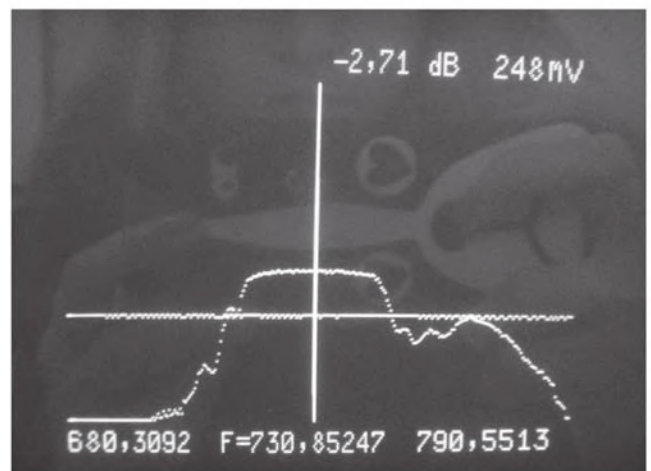


Рис. 6. Фото АЧХ ПАВ фильтра 736 МГц

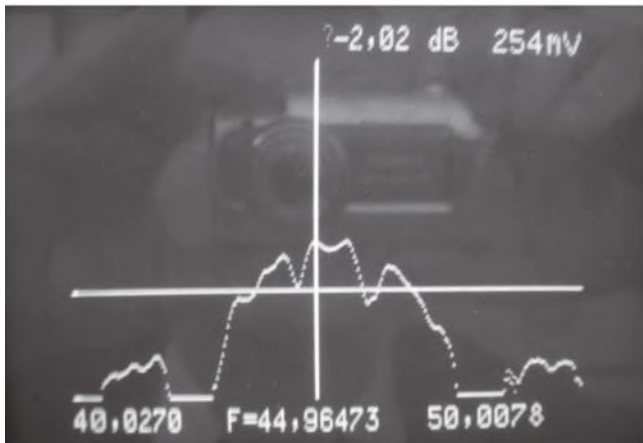


Рис. 7. Фото АЧХ ПАВ фильтра 45 МГц

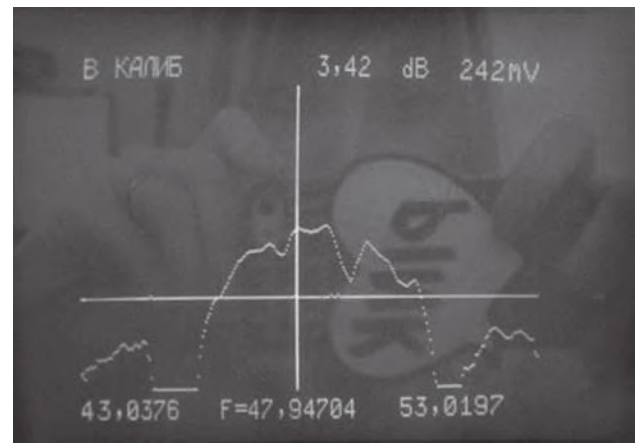


Рис. 8. Фото АЧХ ПАВ фильтра 48 МГц

### Выводы

Основные результаты измерений сведены в таблицу:

Наименование параметра, размерность	Фильтр HDF736C	Диплексер HDD45/48	
		Канал 45 МГц	Канал 48 МГц
Минимальные потери в полосе пропускания, дБ	-3	-2	-3
Максимальные потери в полосе пропускания по уровню минус 3 дБ	-6	-5	-6
Центральная частота, МГц	735,5	45,3	48,3
Ширина полосы пропускания по уровню минус 3 дБ, МГц	29	1	1
Заграждение на второй гармонике, дБ	36	37	-
Заграждение на третьей гармонике, дБ	35	43	-
Заграждение на четвертой гармонике, дБ	30	41	-
Развязка между каналами диплексера, дБ	-	>45	>45

Таким образом, подтверждены экспериментально характеристики, приведенные в [10, 11], и получены новые данные по заграждению на гармониках основной частоты.

#### Список литературы

1. Орлов В.С. Фильтры на ПАВ [Текст] / В.С. Орлов, В.С. Бондаренко. – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.
2. Морган Д. Устройства обработки сигналов на ПАВ [Текст] / Д. Морган; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990. – 416 с.
3. Фильтры на ПАВ. Расчет, технология применения [Текст] / под ред. Г. Мэттьюза; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1981. – 472 с.
4. Мостяев В.А. Российская пьезо-акустоэлектроника. История развития и современное состояние [Текст] / В.А. Мостяев, П.Г. Поздняков. – М.: Радиотехника, 2008. – 328 с.
5. Речицкий В.И. Акустоэлектронные радиокомпоненты [Текст] / В.И. Речицкий. – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.
6. Речицкий В.И. Радиокомпоненты на ПАВ [Текст] / В.И. Речицкий. – М.: Радио и связь, 1984. – 112 с.
7. Речицкий В.И. Акустоэлектронные радиокомпоненты: схемы, топология, конструкция [Текст] / В.И. Речицкий. – М.: Радио и связь, 1987. – 192 с.
8. Зеленка И. Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах: материалы, технология, конструкция, применение [Текст] / И. Зеленка; пер. с чешского. – М.: Мир, 1990. – 594 с.
9. Зикий А.Н. Фильтр на ПАВ [Текст] / А.Н. Зи-

кий, П.Н. Зламан, Д.В. Власенко // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 3. – С. 5–7.

10. *HDF736c*. Filter specification [Text]. – 4 p.

11. *HDD 45/48*. Filter specification [Text]. – 5 p.

#### References

1. *Orlov V.S.* Fil'try na PAV [Tekst] / V.S. Orlov, V.S. Bondarenko. – M.: Radio i svjaz', 1984. – 272 s.

2. *Morgan D.* Ustrojstva obrabotki signalov na PAV [Tekst] / D. Morgan; per. s angl. – M.: Radio i svjaz', 1990. – 416 s.

3. *Fil'try* na PAV. Raschet, tehnologija primenenija [Tekst] / pod red. G. Mjett'juza; per. s angl. – M.: Radio i svjaz', 1981. – 472 s.

4. *Mostjaev V.A.* Rossijskaja p'ezo-akustoelektro-nika. Istorija razvitija i sovremennoe sostojanie [Tekst] / V.A. Mostjaev, P.G. Pozdnjakov. – M.: Radiotekhnika, 2008. – 328 s.

5. *Rechickij V.I.* Akustoelektronnye radiokomponenty [Tekst] / V.I. Rechickij. – M.: Sov. radio, 1980. – 264 s.

6. *Rechickij V.I.* Radiokomponenty na PAV [Tekst] / V.I. Rechickij. – M.: Radio i svjaz', 1984. – 112 s.

7. *Rechickij V.I.* Akustoelektronnye radiokomponenty: shemy, topologija, konstrukcija [Tekst] / V.I. Rechickij. – M.: Radio i svjaz', 1987. – 192 s.

8. *Zelenka I.* P'ezoelektricheskie rezonatory na ob#emnyh i poverhnostnyh akusticheskikh volnah: materialy, tehnologija, konstrukcija, primenenie [Tekst] / I. Zelenka; per. s cheshskogo. – M.: Mir. 1990. – 594 s.

9. *Zikij A.N.* Fil'tr na PAV [Tekst] / A.N. Zikij, P.N. Zlaman, D.V. Vlasenko // Elektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – Т. 9. – № 3. – С. 5–7.

10. *HDF736c*. Filter specification [Text]. – 4 p.

11. *HDD 45/48*. Filter specification [Text]. – 5 p.

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS



**Новичкова А.В.**  
**Novichkova A.V.**

аспирант лаборатории  
математической химии  
ФГБУ науки «Институт  
нефтехимии и катализа  
Российской академии  
наук»,  
Россия, г. Уфа



**Бобренёва Ю.О.**  
**Bobreneva Yu.O.**

магистрант факультета  
математики и инфор-  
мационных технологий  
ФГБУ ВПО «Башкирский  
государственный универ-  
ситет», Россия, г. Уфа



**Губайдуллин И.М.**  
**Gubaidullin I.M.**

доктор физико-  
математических наук,  
доцент, старший науч-  
ный сотрудник лабора-  
тории математической  
химии ФГБУ науки  
«Институт нефтехимии  
и катализа Российской  
академии наук»,  
Россия, г. Уфа



**Коледина К.Ф.**  
**Koledina K.F.**

кандидат физико-  
математических наук,  
доцент, исполняющий  
обязанности заведующе-  
го кафедрой информа-  
тики и информационно-  
коммуникационных  
технологий ФГБУ ВПО  
«Уфимский государ-  
ственный университет  
экономики и сервиса»  
Россия, г. Уфа

УДК 544.424.2

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ АЛКЕНОВ В РЕАКЦИИ ГИДРОАЛЮМИНИРОВАНИЯ ОЛЕФИНОВ ТРИИЗОБУТИЛАЛЮМИНИЕМ

Проведено исследование сложной химической реакции металлокомплексного катализа, а именно гидроалюминирования олефинов триизобутилалюминием. В ходе исследования этой реакции были выделены частные реакции в виде итоговых уравнений, первая и вторая детализация частных реакций, на основе которых получен обобщенный механизм реакции. Описание всех этих реакций одним набором параметров не представлялось возможным, поэтому были найдены интервалы неопределенности кинетических параметров для частных реакций, которые успешно использовались для построения кинетической модели общей реакции. Для хранения и обработки полученной информации разработана информационно-аналитическая система обратных задач химической кинетики, состоящая из пяти блоков: входящие информационные потоки, методы обработки информации, выходящие информационные потоки, технические средства обработки, реакционная способность веществ. Информационная система построена на основе реляционной модели базы данных и включает в себя методы построения кинетической модели химических реакций, а также методы решения прямой и обратной кинетических задач.

На основе разработанной информационно-аналитической системы обратных задач химической кинетики построена кинетическая модель общей реакции гидроалюминирования (ГА) олефинов триизобутилалюминием (ТИБА) в присутствии катализатора  $\text{Cr}_2\text{ZrCl}_2$ , которая хорошо согласуется с экспери-



ментальными данными. Проведен сравнительный анализ энергий активаций различных стадий с целью определения возможных маршрутов протекания реакции. Изучена реакционная способность исходных веществ реакции по трем характеристикам: скорость расходования вещества, относительные константы скорости и энергия активации. Определено, какой из алкенов является наиболее реакционно-способным. Выведена зависимость реакционной способности от длины углеродной цепи исследуемых соединений. Показано влияние реакционной способности реагентов на конечный выход продукта. Представлен графический материал, подтверждающий расчеты.

Разработанная информационная система может применяться для исследования и других химических реакций.

*Ключевые слова:* база данных, выход продукта, информационные системы, кинетическая модель, олефины, относительная константа скорости, реакционная способность, скорость расходования вещества, энергия активации.

## INFORMATION SYSTEMS FOR MODELING REACTIVITY OF ALKENES IN OLEFIN HYDROALUMINATION REACTIONS WITH TRIISOBUTYLALUMINUM

The study of complex chemical reaction of catalysis by metal, namely, olefin hydroalumination reactions with triisobutylaluminum was conducted. During the study of this reaction private reactions, the first and second detail of private reactions were allocated and a generalization of the reaction mechanism was constructed. A description of all these reactions by one set of parameters was not possible, so the uncertainty intervals of kinetic parameters for private reactions were found, which have been successfully used for the construction of a kinetic model of the general reaction. The information-analytical system of inverse problems of chemical kinetics, which consists of five units: the incoming flow of information, information processing methods, emerging information flows, hardware processing, the reactivity of substances, was developed for storing and processing information. The information system is based on a relational database model, and includes methods for constructing kinetic models of chemical reactions, and methods for direct and inverse kinetic problems.

The kinetic model of the general olefin hydroalumination (GA) reaction with triisobutylaluminum (TIBA) in the presence of a catalyst  $Cp_2ZrCl_2$  was described using developed information-analytical system of inverse problems of chemical kinetics. A comparative analysis of the activation energies of the various stages was conducted to determine the possible routes of the reaction. The reactivity of the initial substance of the reaction was studied using three characteristics: the rate of consumption of the substance, the relative rate constants and activation energy. It is determined which of alkenes is the most reactive. The dependence of the reactivity of the carbon chain length in the test compounds was derived. It is detected how the reactivity of the reagents influence on the final yield. The graphical data supporting calculations was presented. The developed information system can be used for research other chemical reactions.

*Key words:* database, product yield, information systems, kinetic model, olefins, relative rate constant, reactivity, the rate of consumption of substance, the activation energy.

Широкое использование алюминийорганических соединений (АОС) в качестве перспективных реагентов в органическом и металлоорганическом синтезе для проведения реакций циклоалюминирования и термического гидроалюминирования олефинов требовало комплексного изучения механизмов реакций как экспериментальными методами, так и методами формальной кинетики. Натурные химические опыты и вычислительные эксперименты проводились в лабораториях структурной и математической химии Института нефтехимии и катализа РАН. Для изучения сложных

химических реакций разработана информационно-аналитическая система обратных задач химической кинетики (ИАС ОЗХК) [1]. Система работает со структурированной информацией, составляющей базу данных. При этом методы обработки данных в единстве с базой данных предоставляют исчерпывающую информацию для практического применения новых, полученных численно данных. При изучении механизмов сложных химических реакций методами математического моделирования выделяют пять взаимосвязанных процессов, порождающих проблематику исследований в данной области.



Рис. 1. Структура информационно-аналитической системы обратных задач химической кинетики

Совокупность вышеуказанных процессов и структура связей между ними для построения кинетических моделей порождает информационно-аналитическую систему обратных задач химической кинетики. Таким образом, ИАС ОЗХК состоит из пяти основных блоков (рис. 1).

Информационная система построена на основе реляционной модели базы данных (рис. 2) [2]. При изучении сложной химической реакции можно выделить несколько перечисленных ниже основных типов сущностей, с экземплярами которых и ведется постоянная работа.



Рис. 2. Реляционная модель базы данных для сложной химической реакции

База данных для расчета кинетических параметров имеет следующую структуру: все данные состоят из записей; в каждой записи на первом месте стоит количество элементов этой записи (переменная целого типа), а далее сами элементы (переменные вещественного типа); каждый элемент имеет свой номер в данной записи. При работе программы данные, записанные в виде массивов, считываются и присваиваются соответствующим идентификаторам с использованием номеров элементов в массиве.

По протеканию реакции ГА олефинов было предложено несколько механизмов. На начальном этапе изучения реакции удалось выделить частные реакции с алюминийорганическими соединениями (АОС) и олефинами в виде итоговых уравнений [3]. Далее велись работы по детализации этого механизма до элементарных стадий. Представлен первый этап детализации выделенных реакций на основании квантово-химических расчетов [4]. После была получена вторая, более подробная детализация [5], на основании которой уже предложена схема обобщенного механизма гидроалюминирования олефинов алкилаланами, катализируемого  $\text{Cp}_2\text{ZrCl}_2$  в присутствии диизобутилалюминийхлорида (ДИБАХ) [6]. Описание всех этих реакций одним набором параметров не представлялось возможным,

поэтому были найдены интервалы неопределенности кинетических параметров для частных реакций ГА олефинов по второй детализации [7]. На основе этих интервалов построена кинетическая модель обобщенной реакции ГА олефинов с ТИБА (рис. 3).

Сравнительный анализ энергий активаций различных стадий предполагаемого механизма позволил определить возможные маршруты протекания реакции. Первоначально  $\text{Cp}_2\text{ZrCl}_2$  взаимодействует с молекулой  $\text{AlBu}_3^i$  (ТИБА) с образованием  $\text{Cp}_2\text{ZrClBu}$  ( $E = 10,64$  ккал/моль). Далее происходит взаимодействие  $\text{Cp}_2\text{ZrClBu}$  с молекулой  $\text{ClAlBu}_2^i$  (ДИБАХ) ( $E = 9,72$  ккал/моль), что приводит к образованию промежуточного комплекса (10). Последующее взаимодействие комплекса (10) с молекулой ДИБАХ ( $E = 10,64$  ккал/моль) дает нам комплекс (2), который является ключевым и отвечает за гидрометаллирование олефинов. Энергия активации первой стадии взаимодействия катализатора  $\text{Cp}_2\text{ZrCl}_2$  с ТИБА ( $E = 10,64$  ккал/моль) в 3 раза меньше, чем с ДИБАХ ( $E = 31$  ккал/моль). Последующее взаимодействие комплекса (10) с молекулой ДИБАХ ( $E = 10,64$  ккал/моль) дает нам комплекс (2), который является ключевым и отвечает за гидрометаллирование олефинов.

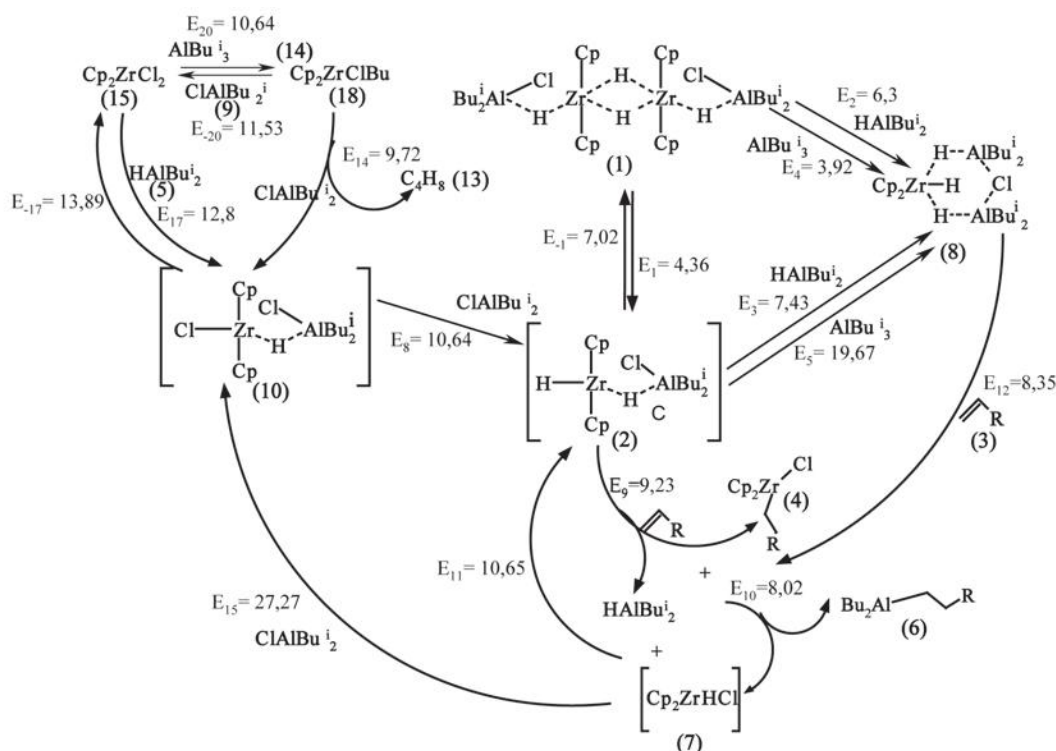


Рис. 3 Кинетическая модель обобщенной реакции каталитического гидроалюминирования октена с ТИБА

Энергия активации первой стадии взаимодействия катализатора  $\text{Cp}_2\text{ZrCl}_2$  с ТИБА ( $E = 10,64$  ккал/моль) в 3 раза меньше, чем с ДИБАХ ( $E = 31$

ккал/моль). Это говорит о более высокой гидрометаллирующей активности системы в случае ТИБА. Реакция димеризации комплекса (2) ( $E = 7,02$  ккал/

моль) и взаимодействие его же с очередной молекулой ДИБАГ ( $E = 7,43$  ккал/моль) практически равновероятны. Но для ГА олефинов с ТИБА ДИБАГ не является исходным веществом, а образуется в ходе реакции. Поэтому более вероятна димеризация комплекса (2), в результате чего образуется комплекс (1). Внедрение в реакцию олефина возможно по двум направлениям: взаимодействием с комплексом (2) или с тригидридным комплексом (8). Учитывая энергии активации этих стадий с олефинами, следует отметить, что для октена ( $E = 9,23$  ккал/моль и  $E = 8,35$  ккал/моль соответственно) практически равновероятно протекание обеих стадий, для гептена ( $E = 11,13$  ккал/моль и  $E = 7,92$  ккал/моль соответственно) преобладает взаимодействие с комплексом (8), так как в этом случае энер-

гия активации ниже, в то время как для нонена ( $E = 9,36$  ккал/моль и  $E = 33,8$  ккал/моль соответственно) и децена ( $E = 8,65$  ккал/моль и  $E = 23,9$  ккал/моль соответственно) вероятнее всего взаимодействие с комплексом (2). В результате этой стадии образуется алкилхлорид циркоцена (4). Соединение (4) в своей структуре не имеет алюминийорганического фрагмента, поэтому для протекания реакции требуется присутствие в растворе АОС. Завершающая стадия каталитического гидроалюминирования приводит к образованию алкилалана (6) и гидрохлорида циркоцена (7).

С использованием найденных кинетических параметров построены кинетические кривые реакции (рис. 4).

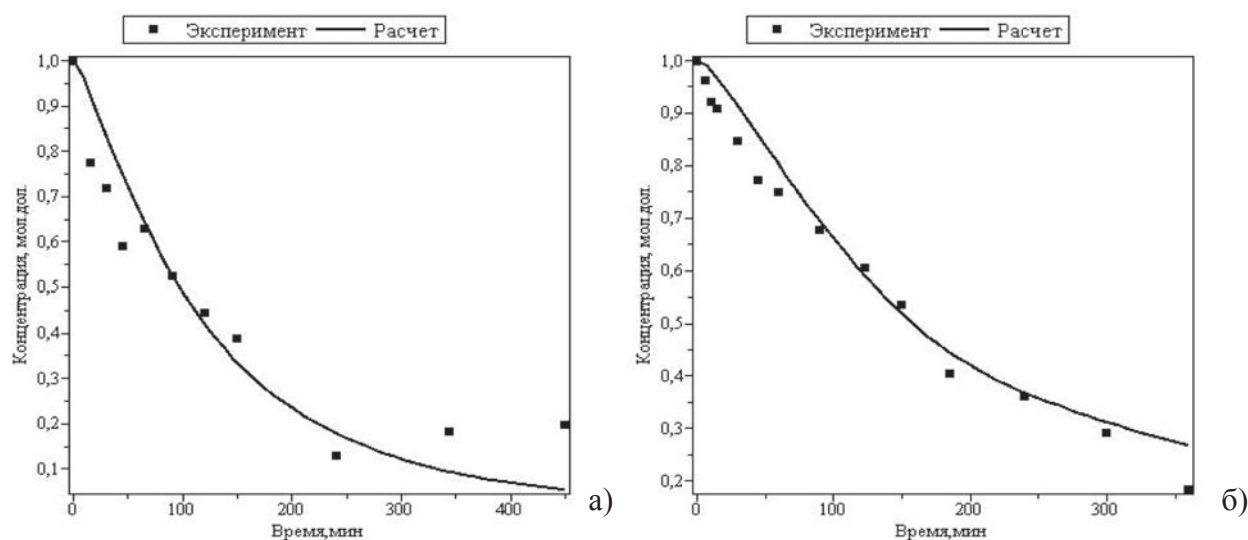


Рис. 4. График изменения концентрации гептена в зависимости от времени в реакции гидроалюминирования олефинов с ТИБА при температурах: а) 20 °С; б) 10 °С

По графикам видно, что расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными данными. Относительная ошибка отклонения расчетных и экспериментальных данных составляет не более 10 %, поэтому построенную кинетическую модель можно считать адекватной.

Построенная кинетическая модель позволяет проанализировать реакционную способность исходных веществ. Реакционная способность в данном случае рассматривается с точки зрения кинетического подхода.

Важнейшие характеристики реакционной способности – скорость расходования вещества, относительные константы скорости и энергия активации [8].

На рис. 5 представлен график скорости расходования олефинов при  $T = 20$  °С. Скорость расходования децена в точке максимума в 3,9 раза больше,

чем у гептена. Скорость расходования олефинов увеличивается с ростом углеродной цепи. Такая закономерность прослеживается при всех исследуемых температурах реакции.

Относительные константы скорости стадии, в которой участвует олефин, были рассчитаны относительно константы для реакции с гептеном (табл. 1). Таким образом, получается, что реакционная способность децена в 1,31 раза больше, чем у гептена.

Заметим, что скорость и константа скорости – это такие параметры, которые зависят от температуры, в то время как энергия активации лишена такого недостатка. С этой точки зрения энергия активации является важнейшей характеристикой реакционной способности. Анализируя табл. 2, приходим к выводу, что наименьшая энергия – 8,65 ккал/моль активации у децена.

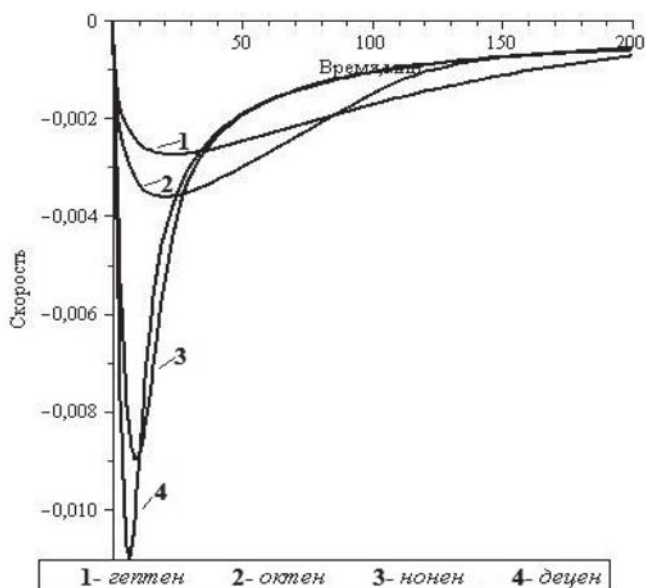
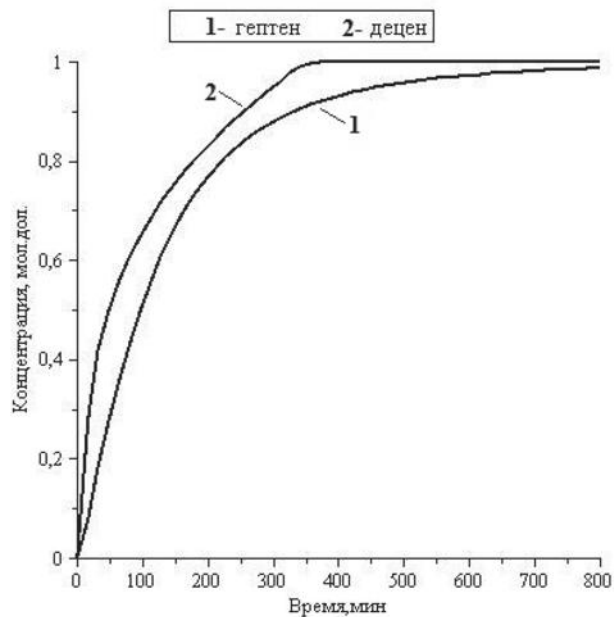
Рис. 5. Скорость расходования олефинов при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 

Рис. 6. Выход продукта при разных олефинах

Таблица 1

Относительные константы скорости при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 

	гептен	октен	нонен	децен
$k_{\text{отн}}, 1/\text{мин}$	1	1,17	1,24	1,31

Таблица 2

## Энергия активации

	гептен	октен	нонен	децен
$E_a$ , ккал/моль	11,13	9,23	9,36	8,65

Таким образом, проанализировав реакционную способность по всем характеристикам, можно сделать вывод, что децен является наиболее реакционно-способным веществом из всех рассмотренных алкенов, а также наблюдается увеличение реакционной способности с ростом углеродной цепи в исследуемом соединении.

Реакционная способность исходных веществ оказывает влияние на скорость образования конечного продукта реакции. Так, было показано, что в случае наиболее реакционно-способного соединения, а именно децена, максимальный выход продукта достигается в 2 раза быстрее, чем в реакции с гептеном (рис. 6).

Таким образом, с использованием информационно-аналитической системы ОЗХК построена кинетическая модель общей реакции гидроалюминирования олефинов триизобутилалюминием.

Найденный набор кинетических параметров адекватно описывает экспериментальные данные. В ИАС ОЗХК реализован метод определения и ана-

лиза реакционной способности веществ, с помощью которого проанализирована реакционная способность алкенов и выявлено, что децен является наиболее реакционно-способным соединением, что, в свою очередь, позволяет получить максимальный выход продукта за относительно короткое время.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-07-31029).*

## Список литературы

1. Губайдуллин И.М. Информационно-аналитическая система обратных задач химической кинетики [Текст] / И.М. Губайдуллин, С.И. Спивак // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – № 1.1 (31). – С. 150–153.
2. Коледина К.Ф. Программный комплекс для решения обратных задач химической кинетики и его реализация в виде виртуального испытательного стенда [Текст] / К.Ф. Коледина, И.М. Губайдуллин // Наука и образование: электронное научно-

техническое издание. – 2013. – № 7. – С. 385–398.

3. *Абзалилова Л.Р.* Кинетическая модель реакции гидроалюминирования олефинов алкилаланами в присутствии  $\text{Cp}_2\text{ZrCl}_2$  [Текст] / Л.Р. Абзалилова // Дис. – Уфа, 2006. – 111 с.

4. *Вильданова Р.Ф.* Новые гидроталлирующие реагенты на основе комплексов  $\text{L}_2\text{ZrH}_2$  и  $\text{X}_n\text{AlR}_{3-n}$  и механизм их действия [Текст] / Р.Ф. Вильданова // Дис. – Уфа, 2007. – 88 с.

5. *Панкратьев Е.Ю.* Механизм реакции каталитического гидроалюминирования алкенов алкилаланами в присутствии  $\text{Cp}_2\text{ZrCl}_2$ : квантово-химический подход [Текст] / Е.Ю. Панкратьев // Дис. – Уфа, 2010. – 183 с.

6. *Коледина К.Ф.* Последовательно-параллельное определение кинетических параметров при моделировании детального механизма гидроалюминирования олефинов [Текст] / К.Ф. Коледина // Дис. к-та ф.-м. наук. – Уфа, 2011. – 111 с.

7. *Ахметов И.В.* Математическое моделирование сложных химических реакций в присутствии металлокомплексных катализаторов на основе многоядерных вычислительных систем [Текст] / И.В. Ахметов, Ю.О. Бобренева, И.М. Губайдуллин, А.В. Новичкова // Системы управления и информационные технологии. – 2013. – Т. 52. – № 2.1. – С. 111–115.

8. *Семенов Н.Н.* О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности [Текст] / Н.Н. Семенов. – М.: Издательство Академии наук СССР, 1958. – 689 с.

#### References

1. *Gubajdullin I.M.* Informacionno-analiticheskaja sistema obratnyh zadach himicheskoy kinetiki [Tekst] / I.M. Gubajdullin, S.I. Spivak // Sistemy upravlenija

i informacionnye tehnologii. – 2008. – № 1.1 (31). – s. 150–153.

2. *Koledina K.F.* Programmnyj kompleks dlja reshenija obratnyh zadach himicheskoy kinetiki i ego realizacija v vide virtual'nogo ispytatel'nogo stenda [Tekst] / K.F. Koledina, I.M. Gubajdullin // Nauka i obrazovanie: jelektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie. – 2013. – № 7. – S. 385–398.

3. *Abzalilova L.R.* Kineticheskaja model' reakcii gidroaljuminirovanija olefinov alkilalanami v prisutstvii  $\text{Cp}_2\text{ZrCl}_2$  [Tekst] / L.R. Abzalilova // Dis. – Ufa, 2006. – 111 s.

4. *Vil'danova R.F.* Novye gidrometallirujushhie reagenty na osnove kompleksov  $\text{L}_2\text{ZrH}_2$  i  $\text{X}_n\text{AlR}_{3-n}$  i mehanizm ih dejstvija [Tekst] / R.F. Vil'danova // Dis. – Ufa, 2007. – 88 s.

5. *Pankrat'ev E.Ju.* Mehanizm reakcii kataliticheskogo gidroaljuminirovanija alkenov alkilalanami v prisutstvii  $\text{Cp}_2\text{ZrCl}_2$ : kvantovo-himicheskij podhod [Tekst] / E.Ju. Pankrat'ev // Diss. – Ufa, 2010. – 183 s.

6. *Koledina K.F.* Posledovatel'no-parallel'noe opredelenie kineticheskikh parametrov pri modelirovanii detal'nogo mehanizma gidroaljuminirovanija olefinov [Tekst] / K.F. Koledina // Dis. k-ta f.-m. nauk. – Ufa, 2011. – 111 s.

7. *Ahmetov I.V.* Matematicheskoe modelirovanie slozhnyh himicheskikh reakcij v prisutstvii metallokompleksnyh katalizatorov na osnove mnogojadernyh vychislitel'nyh sistem [Tekst] / I.V. Ahmetov, Ju.O. Bobreneva, I.M. Gubajdullin, A.V. Novichkova // Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii. – 2013. – Т. 52. – № 2.1. – S. 111–115.

8. *Semenov N.N.* O nekotoryh problemah himicheskoy kinetiki i reakcionnoj sposobnosti [Tekst] / N.N. Semenov. – М.: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, 1958. – 689 s.



**Грахова Е.П.**  
**Grakhova E.P.**

аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа



**Мешков И.К.**  
**Meshkov I.K.**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные системы» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа



**Багманов В.Х.**  
**Bagmanov V.Kh.**

доктор технических наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные системы» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа



**Виноградова И.Л.**  
**Vinogradova I.L.**

доктор технических наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные системы» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа

УДК 629.783

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СШП РАДИОИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ПРОИЗВОДНЫХ ГАУССА И РЭЛЕЯ С УЧЕТОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ МАСКИ ГКРЧ

Данная статья посвящена проектированию радиоимпульсов для современной технологии сверхширокополосной (СШП) связи, являющейся наиболее перспективным направлением развития систем высокоскоростной связи на короткие расстояния. Задача проектирования радиоимпульса, поставленная в данной статье, отвечает условиям ограничения на эффективную излучаемую мощность СШП систем связи, введенных Государственной комиссией по радиочастотам (ГКРЧ) РФ в 2009 г.

Во вводной части данной статьи представлено краткое описание СШП систем связи в целом, а также производится сравнительный анализ двух существующих масок распределения максимальной спектральной плотности мощности сигнала по диапазону рабочих частот (ГКРЧ и FCC), накладывающих ограничения на работу СШП систем связи.

В следующем разделе представлено обоснование выбора производных функций Гаусса и Рэля для формирования СШП радиоимпульса в условиях ограничений маски ГКРЧ, а также накладываются два условия для решения поставленной в статье задачи:

1. Условие максимизации диапазона рабочих частот, выполнение которого приводит к увеличению пропускной способности канала связи СШП системы связи.
2. Условие максимизации излучаемой мощности сформированного импульса, удовлетворяющего ограничениям спектральной маски ГКРЧ, выполнение которого приводит к увеличению дальности действия СШП системы связи.

Далее в статье представлены результаты численных экспериментов по моделированию СШП радиоимпульсов в среде MATLAB, произведенные на основе использования производных импульсов Гаусса и Рэля, удовлетворяющих выполнению поставленных условий, а также представлены характеристики сформированных радиоимпульсов и их нормированные СПМ.

В заключительной части статьи приведены результаты расчета показателей использования спектральной маски, скорости передачи данных в канале и дальности связи, а также произведен сравнительный анализ предложенных вариантов формирования СШП систем связи по данным показателям.

**Ключевые слова:** СШП системы связи, формирование радиоимпульса, спектральная маска, импульс Гаусса, импульс Рэля.

## UWB RADIO PULSES DESIGN BASED ON THE DERIVATIVE GAUSSIAN AND RAYLEIGH PULSES RELEVANT TO THE SPECTRAL MASK OF RADIOFREQUENCIES COMMITTEE

This article is dedicated to UWB radio pulse design for the modern technology of ultra-wideband (UWB), which is one of the most prospective development directions of the high-speed communication systems over short distances. The aim of this research is to design radio pulse relevant to the restrictions on the effective radiated power establishes by the Radiofrequencies Committee in 2009 in the Russian Federation.

The introduction of this article presents a brief analysis of UWB communication systems in general. Also the comparative analysis of two existing masks of the maximum spectral power density distribution over the range of operating frequencies that imposes restrictions on the work of UWB communication systems is performed.

Next part of the article clarifies the choice of derivative Gaussian and Rayleigh pulses as the base functions for the UWB radio pulse shaping in terms of the restrictions of the Radiofrequencies Committee spectral mask. Also two requirements are imposed for solving the article aims:

1. Maximization of the operating frequencies range which leads to the increase of UWB systems bandwidth.
2. Maximization of the radiated power of generated pulse which increases the range of UWB systems.

Next the results of computational experiments on simulation of UWB radio pulse in MATLAB are presented. The experiments are conducted on the basis of derivative Gaussian and Rayleigh pulses and satisfy requirements which are set in the previous part. Also the characteristics of designed radio pulses and their normalised spectral power densities are presented.

In final part of the article the estimation of spectral mask occupancy factor, data transmission rate and action range of the designed UWB system are performed. Also the comparative analysis of the proposed UWB communication systems is presented.

*Key words:* UWB communication systems, radio pulse shaping, spectral mask, Gauss pulse, Rayleigh pulse.

### Введение

Последние два десятилетия продемонстрировали стремительный рост потребности бизнеса в услугах широкополосного доступа к мультисервисным сетевым ресурсам, и в настоящее время данная тенденция сохраняется. Наиболее перспективным направлением развития систем высокоскоростной связи на короткие расстояния является технология, основанная на применении сверхширокополосных (СШП) сигналов. С помощью СШП систем связи более успешно, в сравнении с узкополосными системами, решаются такие задачи, как: повышение скорости и скрытности передачи данных в радиосвязи, увеличение точности местоопределения и навигации, обеспечение низкого энергопотребления и высокой спектральной эффективности, а также снижение стоимости и сложности аппаратной составляющей.

В СШП системах связи, позволяющих работать на безлицензионной основе, заложен большой потенциал эксплуатации, недоступный для узкополосных систем. Он включает в себя различные локальные, внутригородские и внутриобъектовые сети, основанные на энергетически скрытной системе связи со сверхвысокой пропускной способностью каналов, при этом нуждающиеся в малом энергопотреблении и минимизации размеров аппа-

ратуры (самолеты, корабли, транспорт), или же на системах связи, работающих в условиях сильных промышленных помех (нефтехимические комплексы). Также подобные системы имеют большие перспективы использования в специальных системах связи для управления военными средствами (в том числе беспилотными летательными аппаратами и роботами), для антитеррористических подразделений, а также в такой развивающейся области, как Body Area Network, позволяющей транслировать различные жизненные показатели человека на его персональные мобильные устройства.

В связи с большой шириной полосы спектра СШП систем связи возникают проблемы в обеспечении спектральной совместимости ее с другими радиоустройствами, работающими в том же частотном диапазоне. В 2009 году в Российской Федерации были приняты документы, регламентирующие работу таких систем [1]. Согласно данным документам определены нормы на уровень эффективной изотропной излучаемой мощности (ЭИИМ) для СШП систем с учетом минимизации влияния новых устройств на существующие радиослужбы, а также определена маска распределения максимальной спектральной плотности мощности (СПМ) СШП сигнала по диапазону рабочих частот (рис. 1а).

Главным отличием спектральной маски по



определению Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) от наиболее распространенной в мире спектральной маски Федеральной Комиссии Связи (Federal Communications Commission – FCC) (рис. 1б) является наличие сильных провалов 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: по решению ГКРЧ он соответствует 2,85–10,6 ГГц, FCC – 3,1–10,6 ГГц.

Данные обстоятельства накладывают гораздо более серьезные требования на формирование СШП радиоимпульса, делая невозможным использование в РФ широкого спектра устройств, спроектированных в других странах.

Таким образом, становится актуальной задача

проектирования СШП радиоимпульса, ЭИИМ которого была бы максимальной в условиях ограниченной спектральной маски ГКРЧ. Наличие провалов в СПМ на определенных частотах делает невозможным формирование радиоимпульса, со значениями СПМ, соответствующими максимально разрешенным маской, при условии использования всего разрешенного диапазона рабочих частот. В связи с этим появляется необходимость в принятии мер по уменьшению ЭИИМ до уровня провалов. Для СШП систем связи, занимающих меньшую полосу частот в 1–2 ГГц и как следствие характеризующихся меньшей скоростью передачи данных, остается возможность достижения максимальных разрешенных значений ЭИИМ, в случае если спектр сформированного импульса попадает в одно из трех «окон» спектральной маски.

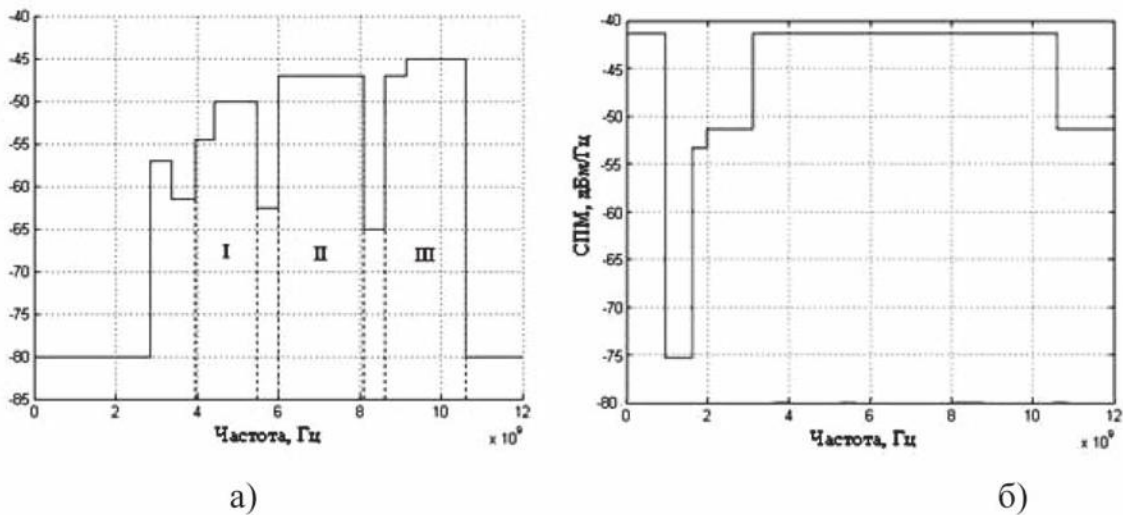


Рис. 1. Маска максимальной спектральной плотности мощности: а) утвержденная ГКРЧ РФ; б) утвержденная FCC

### Постановка задачи

Наибольшее применение в формировании СШП сигнала получили короткие радиоимпульсы, так как наряду с малой длительностью, благодаря которой стало возможным генерировать сигналы с рабочей шириной спектра в несколько гигагерц, они также легко генерируются.

Современные исследования, посвященные вопросам формирования СШП радиоимпульсов, в большинстве случаев используют в качестве базовой функции импульсы Гаусса [2] или Рэлея [3] и их производные. Данные работы учитывают ограничения маски FCC и не удовлетворяют нормам, принятым в РФ.

Формирование СШП радиоимпульса в условиях ограничений маски ГКРЧ в данной работе также реализуется на основе использования производных

функций Гаусса и Рэлея, при условии отсутствия постоянной составляющей импульса, которое можно выразить следующим образом:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} s(t) dt = S(f)|_{f=0} = 0. \quad (1)$$

Решение поставленной задачи достигается при выполнении одного из двух условий:

1.  $\Delta f \rightarrow \max$ , где  $\Delta f_{\max} = 7,75$  ГГц – эффективная полоса частот канала. Выполнение данного условия максимизации диапазона рабочих частот приводит к увеличению пропускной способности канала связи СШП системы связи.

2.  $P(f) \rightarrow \max$ , где  $P(f)_{\max} = -45$  дБм/МГц, для маски ГКРЧ. Выполнение данного условия максимизирует излучаемую мощность сформированного импульса при условии попадания СПМ импульса в одно из трех «окон» спектральной маски ГКРЧ.

*Импульс Рэлея*

Временной форме импульса Рэлея соответствует выражение:

$$s(t) = \frac{4\pi t}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{2\pi t^2}{\sigma^2}\right), \quad (2)$$

где  $\sigma$  – коэффициент формы импульса.

Выходной сигнал из антенны, представляющий собой производную от входного воздействия, для всех случаев будет иметь вид:

$$s^n(t) = -\frac{4\pi t}{\sigma^2} s^{n-1}(t) - \frac{4\pi n}{\sigma^2} s^{n-2}(t), \quad (3)$$

где  $n$  – порядок производной.

Выражение для СПМ после осуществления нормировки относительного пикового значения, разрешенного маской ГКРЧ и равного -45 дБм/МГц, можно записать:

$$|P_n(f)| = (\sigma f)^{2n+2} \left(\frac{\pi}{n+1}\right)^{n+1} \exp\left(-(\sigma f \sqrt{\pi})^2 + n+1\right). \quad (4)$$

Регулирование СПМ импульса для решения поставленных в работе условий и соответствия спектральной маски ГКРЧ достигается путем подбора коэффициента формы  $\sigma$ , порядка производной  $n$  и коэффициента амплитуды  $A$ .

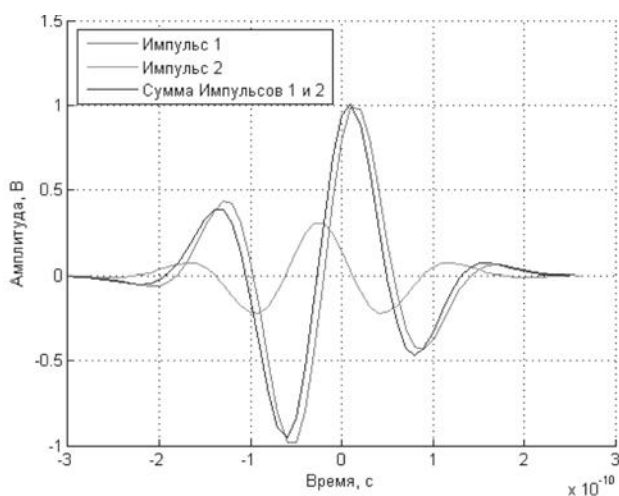


Рис. 2. Временная форма: импульс P1 ( $n = 4$ ), импульс P2 ( $n = 5$ ), суммарный импульс

СПМ суммарного радиоимпульса не пересекает провалы спектральной маски ГКРЧ, ограничиваясь областью маски, не превышающей значения -62,5 дБм/МГц, а также удовлетворяет первому условию максимизации использования разрешенного диапазона частот. При этом в качестве оценки эффективности вводится коэффициент использования спектральной маски ГКРЧ –  $K_{\text{ИМ}}$ . В таблице 1 приведены основные характеристики сформиро-

В результате численных экспериментов по моделированию импульсов в среде MATLAB R2012b (8.0.0.783) СШП радиоимпульс, соответствующий выполнению первого условия, был сформирован как сумма двух импульсов с разными значениями ( $\sigma, n$ ). При этом суммарный импульс имел следующую форму:

$$s_{\Sigma}(t)_{\text{max } \Delta f} = s^{n_1}(t, \sigma_1) + s^{n_2}(t, \sigma_2). \quad (5)$$

Параметры  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  подобраны таким образом, чтобы одиночные импульсы наилучшим образом вписывались в правый и левый край маски и не нарушали условий ограничения максимальной ЭИИМ. Временные зависимости трех смоделированных импульсов представлены на рисунке 2, а их нормированные СПМ – на рисунке 3.

Также было установлено, что выполнение второго условия с использованием импульсов Рэлея для всех «окон» маски ГКРЧ является невозможным при заданной длительности импульса, ввиду того факта что увеличение  $\sigma$  во временной области приводит к смещению СПМ импульса в область низких частот. Использование порядков производной свыше 20-й степени также является неэффективным и практически нереализуемым.

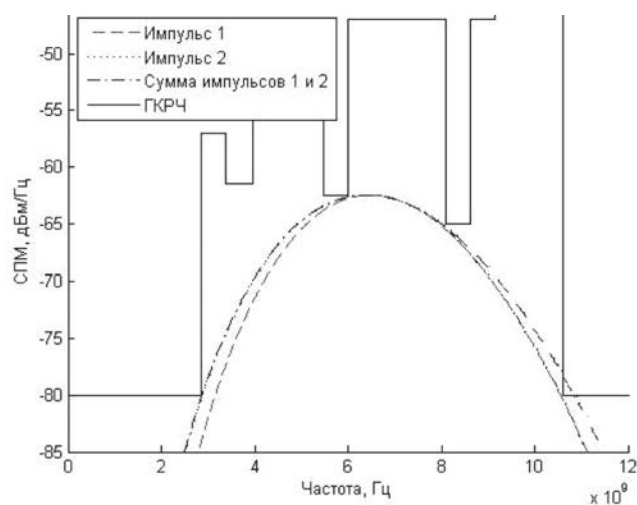


Рис. 3. Нормированные СПМ: импульс P1 ( $\sigma_1 = 0,195$  нс), импульс P2 ( $\sigma_2 = 0,212$  нс), суммарный импульс P3

ванного СШП радиоимпульса.

*Импульс Гаусса*

В случае Импульса Гаусса временная форма,  $n$ -я производная и нормированная СПМ представлены выражениями 6, 7 и 8:

$$s(t) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right), \quad (6)$$

$$s^n(t) = -\frac{n-1}{\sigma^2} s^{n-2}(t) - \frac{t}{\sigma^2} s^{n-1}(t), \quad (7)$$

$$|P_n(f)| = \frac{(2\pi f\sigma)^{2n} \exp(-(2\pi f\sigma)^2)}{n^n \exp(-n)} \quad (8)$$

Подбор коэффициентов формы и производной осуществлялся аналогично случаю импульса Рэ-

лея. Временные формы, а также нормированные СПМ для смоделированных СШП импульсов как для первого, так и для второго условия представлены на рисунках 4 и 5.

Таблица 1

**Основные характеристики СШП радиоимпульса**

Название импульса	$\sigma$ , нс	$\Delta f$ , ГГц	ЭИИМ, дБм	$K_{ИМ}$ , %
Импульс Р1	0,195	7,5	-62	45
Импульс Р2	0,212	7,53	-62	45,1
Импульс Р3		7,75	-62	46

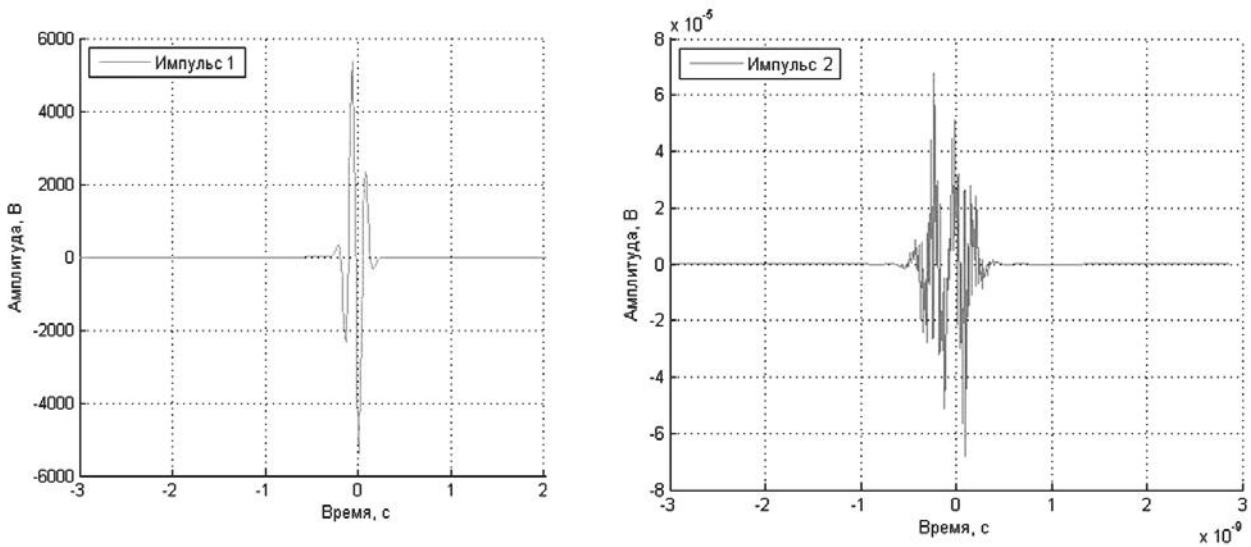


Рис. 4. Временная форма: импульс Г1 ( $n = 15$ ), импульс Г2 ( $n = 5$ )

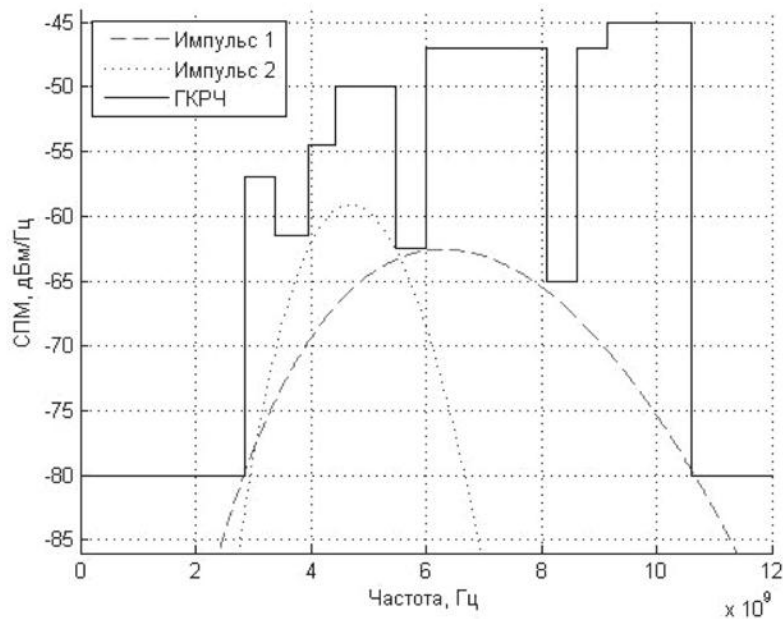


Рис. 5. Нормированные СПМ: импульс Г1 ( $\sigma_1 = 0,056$  нс), импульс Г2 ( $\sigma_2 = 0,131$  нс)

Результаты моделирования СШП радиоимпульса с использованием производных Гаусса показали, что решением поставленной задачи, удовлетворяющим первому условию, является пятая производная импульса Гаусса с показателем коэффициента формы  $\sigma_2 = 0,056$  нс. Сформированный радиоимпульс, как и в случае импульса Рэлея, максимально использует выделенный диапазон частот, соответствуя ограничениям, установленным спектральной маской ГКРЧ.

Выполнение второго условия частично достигается путем формирования СШП радиоимпульса, СПМ которого соответствует первому «окну» спектральной маски ГКРЧ. При этом сформированный более узкополосный импульс Г2 облада-

ет уровнем излучаемой мощности, превышающем уровень импульса Г1 почти на 5 дБ. На основе экспериментальных данных было установлено, что для соответствия спектров импульсов полосам частот, относящимся ко второму и третьему «окну» спектральной маски при заданной длительности импульса, теоретически необходимо использовать производные Гаусса как минимум 38-го порядка, что является практически нереализуемым. Достижение максимума ЭИИМ ограничено невозможностью дальнейшего увеличения коэффициента формы ввиду смещения СПМ импульса в область низких частот.

В таблице 2 приведены основные характеристики сформированных СШП радиоимпульсов.

Таблица 2

### Основные характеристики СШП радиоимпульса

Название импульса	$\sigma$ , нс	$\Delta f$ , ГГц	ЭИИМ, дБм	$K_{им}$ , %
Импульс Г1	0,056	7,75	-62,5	46
Импульс Г2	0,131	3,55	-58,2	25,5

#### Оценка параметров СШП систем связи

Оценка возможностей СШП систем связи, удовлетворяющих нормативным ограничениям на уровень излучения, а также соответствующих полученным экспериментальным данным, производилась при фиксированных значениях вероятности ошибки BER= $10^{-4}$  и ЭИИМ сформированных СШП радиоимпульсов.

Дальность действия СШП системы связи определяется по формуле [4]:

$$r = \sqrt{\frac{P_{пик} \cdot G_{прд} \cdot G_{прм} \cdot (c \cdot \tau)^2}{16 \cdot \pi^2 \cdot P_{прм}}}, \quad (9)$$

где  $P_{пик}$  – пиковая мощность передатчика;  $G_{прд}$  – коэффициент усиления антенны передатчика,  $G_{прд} = 1$  дБи;  $G_{прм}$  – коэффициент усиления антенны приемника,  $G_{прм} = 1$  дБи;  $\tau$  – длительность импульса;  $c$  – скорость света;  $P_{прм}$  – чувствительность приемника.

В случае если коэффициент усиления передающей антенны превышает единицу, необходимо ограничивать излучаемую мощность передатчика в области наибольшей направленности передающей антенны.

Пиковая мощность передатчика составляет:

$$P_{пик} = \frac{P_{пред}}{\tau \cdot R}, \quad (10)$$

где  $P_{пред} = P_n(f) \cdot \Delta f$  – предельная средняя излучаемая мощность передатчика.

Скорость передачи данных в канале оценивается по формуле:

$$R = \frac{1}{\tau \cdot q \cdot n_{и}}, \quad (11)$$

где  $q$  – скважность последовательности, выбираемая с учетом наличия защитного интервала между импульсами;  $n_{и}$  – количество импульсов для передачи одного бита.

Уровень шума, действующего в рабочей полосе СШП-приемника, при условии, что прием сигнала происходит на фоне аддитивного белого гауссовского шума, оценивается как:

$$N_{ш} = k \cdot T \cdot \Delta f \cdot n_{пр}, \quad (12)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $T$  – шумовая температура, равная 300°К;  $n_{пр}$  – коэффициент шума приемника, равный 10.

Оценка производится без учета дополнительного влияния шумов иного происхождения.

Чувствительность приемника, с учетом минимального отношения сигнал/шум на входе приемника, который для заданного значения BER= $10^{-4}$  составляет  $E_b/N_0 = 11,5$  дБ, рассчитывается по формуле:

$$P_{прм} = N_{ш} \cdot \frac{E_b}{N_0}. \quad (13)$$

Результаты расчетов дальности действия СШП системы связи сведены в таблицу 3. В вычислениях не учитывался эффект многолучевого распространения сигнала.

**Результаты расчета дальности действия СШП систем связи  
для сформированных импульсов при фиксированных значениях  
вероятности ошибки**

Вид СШП радиоимпульса	$P_{\text{шк}}$ , мкВт	$R$ , Мбит/сек	$r$ , м
Импульс РЗ	71,4	484	4,30
Импульс Г1	69,7	484	4,26
Импульс Г2	85,7	221	15,22

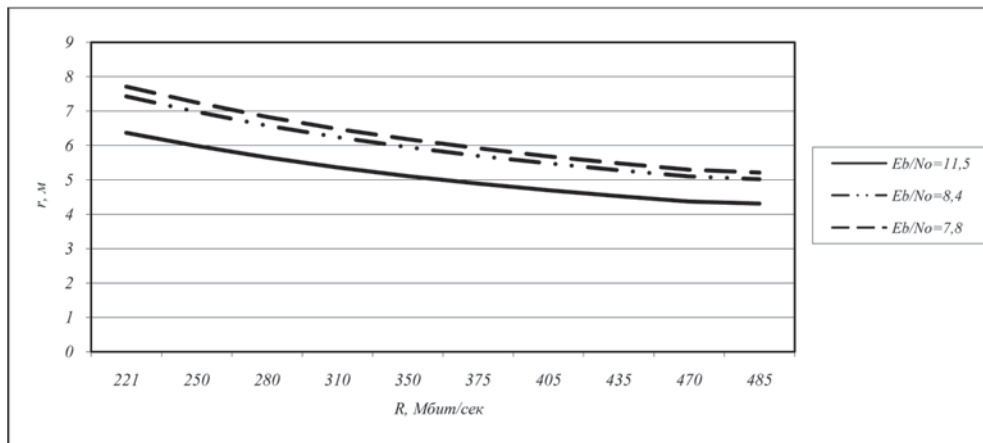


Рис. 6. Зависимость дальности связи от скорости передачи информации для фиксированного значения BER и ЭИИМ

### Выводы

В данной работе исследовалась задача формирования СШП радиоимпульса, СПМ которого удовлетворяет ограничениям спектральной маски ГКРЧ, при выполнении условий максимального использования выделенного разрешенного диапазона рабочих частот и достижения максимального уровня ЭИИМ. Предложенные варианты СШП радиоимпульсов, удовлетворяющие первому условию и основанные на применении импульсов Гаусса и Рэлея, характеризуются большими показателями пропускной способности и малой дальностью связи. Подобные высокоскоростные СШП системы связи, работающие на расстоянии до 3–5 метров, могут найти применение в центрах обработки данных, области мобильных приложений или суперкомпьютерах.

Решение поставленной задачи, удовлетворяющее второму условию, достигается использованием производных импульса Гаусса. Данный СШП радиоимпульс характеризуется большим, в сравнении с первым случаем, уровнем ЭИИМ, однако существенно меньшей полосой рабочих частот.

Исследование формирования СШП радиоимпульсов в условиях ограничений маски ГКРЧ является эффективным средством увеличения про-

изводительности СШП систем связи. Полученные результаты могут повысить пропускную способность или повысить дальность канала связи.

*Работа выполнена при поддержке государственного контракта № 14.BVV.21.0159.*

### Список литературы

1. Приложение к решению ГКРЧ № 09-05-02 от 15 декабря 2009 г. Сверхширокополосные беспроводные устройства.
2. Pei Wang. Improved UWB Pulse shaping method based on Gaussian derivatives [Текст] / Pei Wang, Li Li, Xiao-dong Wu, Jiakai Zhang // Proceedings of CCWMC, 2011. – P. 438–442.
3. Абдрахманова Г.И. Моделирование СШП импульса на основе производных Рэлея и генетического алгоритма [Текст] / Г.И. Абдрахманова, В.Х. Багманов // Инфокоммуникационные технологии. – Казань, 2013. – С. 84–88.
4. Калинин В.О. Оценка параметров короткоимпульсной сверхширокополосной системы связи [Текст] / В.О. Калинин, В.И. Носов // Вестник СибГУТИ. – 2011. – № 3. – С. 73–85.
5. Иммореев И. Сверхширокополосные и узкополосные системы связи [Текст] / И. Иммореев,

А. Судаков // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2003. – № 2. – С. 36–39.

#### References

1. *Prilozhenie k resheniju GKRCn № 09-05-02 ot 15 dekabrya 2009. Sverhshirokopolosnye besprovodnye ustrojstva.*

2. *Pei Wang. Improved UWB Pulse shaping method based on Gaussian derivatives [Tekst] / Pei Wang, Li Li, Xiao-dong Wu, Jiakai Zhang // Proceedings of CCWMC, 2011. – P. 438 – 442.*

3. *Abdrahmanova G.I. Modelirovanie SShP*

*impul'sa na osnove proizvodnyh Rjeleja i geneticheskogo algoritma [Tekst] / G.I. Abdrahmanova, V.H. Bagmanov // Infokommunikacionnye tehnologii. – Kazan', 2013. – S. 84–88.*

4. *Kalinin V.O. Ocenka parametrov korotkoimpul'snoj sverhshirokopolosnoj sistemy svjazi [Tekst] / V.O. Kalinin, V.I. Nosov // Vestnik SibGUTI. – 2011. – № 3. – S. 73–85.*

5. *Immoriev I. Sverhshirokopolosnye i uzkopolosnye sistemy svjazi [Tekst] / I. Immoriev, A. Sudakov // Jelektronika: Nauka, Tehnologija, Biznes. – 2003. – № 2. – С. 36–39.*



**Воловач В.И.**  
**Volovach V.I.**

*кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис» ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет сервиса», Россия, г. Тольятти*



**Будилов В.Н.**  
**Budilov V.N.**

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационный и электронный сервис» ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет сервиса», Россия, г. Тольятти*

УДК 621.341

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ПОРОГОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ РУО И ДОСТОВЕРНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

В статье рассмотрены вопросы, связанные с определением взаимосвязи порогового напряжения радиотехнических устройств обнаружения ближнего действия и достоверности обнаружения протяженных объектов этими устройствами. Радиотехнические устройства обнаружения используют классические принципы радиолокации, но при этом, вследствие работы на ближних дальностях, в таких устройствах должны учитываться протяженный характер обнаруживаемых объектов, многолучевой характер отражения зондирующих сигналов от обнаруживаемых объектов и ряд других особенностей.

Рассмотрена задача обнаружения и различения сигналов радиотехническими устройствами обнаружения ближнего действия во взаимосвязи с величиной порогового напряжения устройства обнаружения. Решение названной задачи позволяет определить вероятностные параметры обнаружения, такие как достоверность обнаружения, пропуска и ложного обнаружения объекта. Следует отметить, что в статье рассматриваются два практически важных режима радиолокации – активный и полуактивный. Также приведены случаи обнаружения зондирующих сигналов как с детерминированными, так и со случайными параметрами. В качестве помехи, воздействующей на устройство обнаружения, рассматривается белый гауссовский шум.

Решение задачи обнаружения строится на основании анализа функции правдоподобия, а также отношения правдоподобия. В свою очередь, анализ численного значения отношения правдоподобия позволяет

определять наличие или отсутствие обнаруживаемого объекта в зоне контроля устройства обнаружения. Приведено одно из возможных выражений для определения отношения правдоподобия, использующее пороговое напряжение устройства обнаружения.

Приведены выражения для определения вероятностных параметров обнаружения объекта, зависящие от величины порогового напряжения устройства обнаружения. Показана связь напряжения помехи и величины порогового напряжения. Также показано, что величину порогового напряжения устройства обнаружения объекта можно оптимизировать, используя известные критерии. В частности, приведено выражение, позволяющее определить величину порогового напряжения исходя из заданной вероятности ложных срабатываний устройства обнаружения с использованием критерия Неймана – Пирсона.

*Ключевые слова:* устройство обнаружения, задача обнаружения и различения сигналов, протяженный объект, зондирующий сигнал, отношение правдоподобия, пороговое напряжение, критерий Неймана – Пирсона.

## DEFINITION OF INTERRELATION OF THRESHOLD TENSION OF REDD AND RELIABILITY OF DETECTION OF EXTENDED OBJECTS

In article the questions connected with definition of interrelation of threshold tension of radio engineering devices of short-range detection and reliability of detection of extended objects by these devices are considered. Radio engineering devices of detection use the classical principles of a radar-location, but thus, owing to work at near ranges, in such devices extended nature of found objects, multibeam nature of reflection of probing signals from found objects and some other features have to be considered.

The problem of detection and distinction of signals by radio engineering devices of short-range detection in interrelation with the size of threshold tension of the device of detection is considered. The solution of the called task allows to determine probabilistic parameters of detection, such as reliability of detection, the admission and false detection of object. It should be noted that in article two almost important modes of a radar-location – active and semi-active are considered. Cases of detection of probing signals both with determined, and with casual parameters are also given. As the hindrance influencing the device of detection, white Gaussian noise is considered.

The solution of a problem of detection is under construction on the basis of the analysis of function of credibility, and also the credibility relation. In turn, the analysis of numerical value of the relation of credibility allows to define existence or absence of found object in a zone of control of the device of detection. One of possible expressions for definition of the relation of the credibility, the using threshold tension of the device of detection is given.

Expressions for determination of probabilistic parameters of detection of the object, depending on the size of threshold tension of the device of detection are given. Communication of tension of a hindrance and size of threshold tension is shown. It is also shown that the size of threshold tension of the device of detection of object can be optimized, using known criteria. In particular, the expression, allowing to determine the size of threshold tension, proceeding from the set probability of false operations of the device of detection, with use of criterion of Neumann – Pearson is given.

*Key words:* detection device, problem of detection and distinction of signals, the extended object probing a signal, the credibility relation, threshold tension, Neumann – Pearson's criterion.

Радиотехнические устройства обнаружения (РУО) являются ключевым элементом многих интегрированных систем охраны, поскольку достаточно универсальны, работают с высокой вероятностью обнаружения, могут использоваться для контроля, защиты и охраны объектов, в достаточной степени различающихся по размерам зоны контроля (обнаружения) и условиям эксплуатации. Принцип работы, реализуемый в РУО, основан на классических принципах радиолокации; вместе с тем при проектировании и эксплуатации таких устройств следует учитывать, что РУО являются разновидностью

радиосистем ближнего действия [1], имеющих свои специфические особенности, такие как многолучевой характер отражения сигналов от обнаруживаемых объектов, протяженный характер таких объектов, сравнимость геометрических размеров объектов с дальностью до него и др. [2, 3].

Достаточно важным вопросом при определении эффективного функционирования РУО в реальных условиях эксплуатации является определение взаимосвязи порогового напряжения устройства обнаружения, определяемого [4–6] величиной его внутримприемного шума, и вероятностных параме-

тров обнаружения протяженных объектов. В свою очередь, вероятностные параметры обнаружения, прежде всего, достоверность обнаружения, необнаружения (пропуска) или ложного обнаружения непосредственным образом связаны с решением задачи обнаружения.

Известна [7] формулировка задачи обнаружения и различения сигналов на фоне шума в радиотехнических системах, в т. ч. РУО, в наиболее общем виде, когда на входе приемника в принятом воздействии  $u_{\text{пр}}(t)$  может быть только один из двух сигналов  $u_{c_1}(t, \lambda_1)$  или  $u_{c_2}(t, \lambda_2)$ :

$$u_{\text{пр}}(t) = \theta u_{c_1}(t, \lambda_1) + (1 - \theta) u_{c_2}(t, \lambda_2) + u_{\text{п}}(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (1)$$

где  $\theta$  – некоторая случайная величина, которая может принимать только два значения:  $\theta = 1$  (присутствует сигнал  $u_{c_1}(t, \lambda_1)$  с вероятностью  $p_1$ ) и  $\theta = 0$  (присутствует сигнал  $u_{c_2}(t, \lambda_2)$  с вероятностью  $p_2 = 1 - p_1$ );  $u_{\text{п}}(t)$  – помеха;  $T$  – время работы РУО.

Выражение (1) одинаково успешно может быть использовано при работе РУО в активном и полупассивном режимах радиолокации [4], а также их комбинированном использовании в двухканальной схеме устройств обнаружения [8]. Вместе с тем без потери достоверности исследования можно полагать в выражении (1),  $u_{c_2}(t, \lambda_2) \equiv 0$  (режим активной радиолокации), исходя из чего задача обнаружения и различения сигналов на фоне шума в РУО и, следовательно, задача обнаружения объекта в пределах зоны контроля сводится к обнаружению отраженного от объекта зондирующего сигнала  $u_c(t, \lambda)$  на фоне помехи  $u_{\text{п}}(t)$ , т. е. к анализу принятого колебания  $u_{\text{пр}}(t)$  [9]:

$$u_{\text{пр}}(t) = \theta u_c(t, \lambda) + u_{\text{п}}(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (2)$$

при этом, по аналогии с (1), можно записать:  $\theta$  – случайная величина, принимающая только два значения: при  $\theta = 1$  в принятом приемником РУО сигнале присутствуют сигнал  $u_c(t, \lambda)$  и помеха  $u_{\text{п}}(t)$ , при  $\theta = 0$  в принятом сигнале присутствует только помеха  $u_{\text{п}}(t)$ .

Параметры  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k\}$ , в свою очередь, представляют собой параметры, определяющие функционирование РУО, которые принято называть существенными параметрами [4, 10] и к которым, например, можно отнести чувствительность приемника устройства обнаружения, его помехоустойчивость и др. Также в [4, 11, 12] показано, что для реализации функции охраны объектов рассматривают как параметры самого радиосигнала (амплитуда, частота и т. п.), так и параметры, представляющие обнаруживаемый объект (размеры объекта, площадь отражающей поверхности, наличие «блестящих» точек и т. п.) и характер его движения в пределах зоны обнаружения (дальность до объекта,

скорость, направление, траекторию). Кроме того, в большинстве практических случаев для РУО, использующихся вне помещений, существенными будут также условия наблюдения. Там же отмечено, что зондирующий сигнал  $u_c(t, \lambda)$  представляет собой детерминированную и известную функцию аргументов  $t$  и  $\lambda$ .

Для упрощения дальнейшего анализа предположим, что сигнал  $u_c(t, \lambda) = u_c(t)$  зависит только от одного непрерывного параметра  $\lambda$ , имеющего априорную плотность вероятности  $P(u_c)$ . Апостериорная плотность вероятности определяется  $P(u_c/u_{\text{пр}})$  и представляет собой апостериорную вероятность отражения зондирующего сигнала от обнаруживаемого объекта.

Рассмотрим задачу обнаружения протяженных объектов как задачу обнаружения сигналов с известными детерминированными параметрами. В этом случае задача обнаружения сигнала на фоне внутримощного гауссовского шума формируется в виде, изложенном в [10]. Анализ сигнала с известными параметрами, в свою очередь, позволяет определить верхние границы характеристик обнаружения [2] РУО.

Воспользуемся общими подходами к решению задачи обнаружения, изложенными, например, в [9]. Предположим, что сигнал представляет собой произведение некоторой случайной величины  $\theta$  согласно (2) на известную функцию времени  $u_c(t)$ . Пусть также сигнал смешивается с аддитивной помехой  $u_{\text{п}}(t)$ . По результирующему воздействию необходимо принять решение о наличии или отсутствии сигнала  $u_c(t)$  на входе приемника РУО, т. е. определить наличие обнаруживаемого объекта. Воздействие (2) на входе приемника РУО с учетом приведенных выше рассуждений относительно непрерывности единственного существенного, т. е. подлежащего анализу при приеме, параметра  $\lambda$  представим в виде

$$u_{\text{пр}}(t) = \theta u_c(t) + u_{\text{п}}(t), \quad 0 \leq t \leq T. \quad (3)$$

По принятому РУО воздействию  $u_{\text{пр}}(t)$  следует установить наличие в нем полезного сигнала, для чего, в свою очередь, определяют соответствующие функции правдоподобия, а также отношение правдоподобия.

Функция правдоподобия [6] представляет собой плотность вероятности того, что на вход приемника РУО поступает воздействие  $u_{\text{пр}}(t)$  при условии передачи сигнала  $u_{c_i}(t)$  следующим образом:  $L(u_{c_i}) = p(u_{\text{пр}}/u_{c_i})$ . В радиолокационных приложениях  $u_{c_i}(t)$  определяется величиной  $\theta$ :  $u_{c_i}(t) = \theta u_c(t)$ . В рассматриваемом случае согласно (2)  $u_{\text{пр}} = u_{c_i} + u_{\text{п}}$ ; при этом для упрощения сигнал и помеха считаются взаимонезависимыми [5].



Если принятое воздействие  $u_{np}(t)$  представляет собой непрерывный случайный процесс, наблюдаемый в дискретных временных точках  $t_i$  (при  $i = \overline{1, n}$ ), то можно перейти к условной плотности вероятности  $p(u_{np}/u_{ci})$ , которая должна равняться плотности вероятности того, что помеха принимает значение  $u_{ci} = u_{np} - u_{ci}$ . С учетом последнего замечания функция правдоподобия принимает вид:  $L(u_{ci}) = p(u_{np}/u_{ci}) = p(u_{np} - u_{ci}) = p(u_{ci})$ .

Пусть помеха является белым гауссовским шумом (БГШ), поскольку такой шум возникает вследствие тепловых и других шумов приемного устройства и окружающего пространства. Предположим, что шумы приемного устройства РУО значительно превосходят шумы окружающего пространства, и примем, что напряжение аддитивной помехи  $u_{ci}(t)$  представляет собой внутримприемный шум. Именно в результате названных предположений становится возможным аддитивный широкополосный гауссов-

ский шум рассматривать как БГШ.

Для плотности вероятности мгновенных значений внутримприемного шума  $u_{ci}(t)$  справедлива запись в виде закона нормального распределения вероятностей [6, 9]:

$$p(u_{ci}) = \beta \exp \left[ -\frac{1}{W_{\pi 0}} \int_0^T u_{ci}^2(t) dt \right], \quad (4)$$

в котором  $\beta = [1/\sqrt{2\pi} \sigma_{\pi}]^n$  – некоторый коэффициент пропорциональности;  $n$  – число отсчетов, определяющих функцию  $u_{ci}(t)$ ;  $W_{\pi}$  – нормированная мощность помех, т. е. мощность помех, приходящаяся на единицу полосы частот.

Отметим, что фаза  $\varphi_c$  не несет полезной информации о существовании сигнала. Обозначим  $L(u_{ci}) = L(U_{mc})$  для случая, когда сигнал присутствует в принимаемом колебании, и, учитывая результаты, изложенные в [5, 13], запишем выражение функции правдоподобия при наличии сигнала:

$$L(U_{mc}) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \beta \exp \left[ -\frac{1}{W_{\pi 0}} \int_0^T [u_{np}(t) - U_{mc} \cos(\omega t + \varphi_c)]^2 dt \right] d\varphi_c. \quad (5)$$

Функция правдоподобия в случае отсутствия сигнала от обнаруживаемого объекта:

$$L(u_{c0}) = \beta \exp \left[ -\frac{1}{W_{\pi 0}} \int_0^T u_{np}^2(t) dt \right]. \quad (6)$$

Отношение правдоподобия определяется выражением [9]

$$l(u_{np}) = \frac{L(u_{c1})}{L(u_{c0})} = \exp \left[ -TU_{mc}^2/2W_{\pi} \right] I_0(U_0\mu),$$

в котором  $I_0(U_0\mu) = I_0(x)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Для решения задачи обнаружения следует определить функцию правдоподобия [4] и отношение правдоподобия:

$$l(u_{np}) = \frac{L(u_{c1})}{L(u_{c0})} > \frac{P(u_{c0})}{P(u_{c1})} = \gamma, \quad (7)$$

где  $L(u_{c1})$  – функция правдоподобия при наличии во входном воздействии (3) сигнала от обнаруживаемого объекта  $u_{c1}(t)$  (т. е. при  $\theta = 1$ );  $L(u_{c0})$  – та же функция при отсутствии во входном воздействии (3) сигнала от обнаруживаемого объекта  $u_{c1}(t)$  (т. е. при  $\theta = 0$ );  $P(u_{c0})$  – априорная вероятность отсутствия сигнала от обнаруживаемого объекта;  $P(u_{c1})$  – априорная вероятность наличия такого сигнала.

Если  $l(u_{np}) > \gamma$ , то можно считать, что принятое РУО воздействие  $u_{np}(t)$  содержит наряду с помехой  $u_{c0}$  сигнал от обнаруживаемого объекта  $u_{c1}$ . В противоположном случае  $u_{np}(t)$  принадлежит только помехе  $u_{c0}$ .

Отметим, что отношение априорных вероятностей  $\frac{P(u_{c0})}{P(u_{c1})} = \gamma$  – это некоторая постоянная величина, представляющая собой порог, относительно которого оценивается функция  $l(u_{np})$ . Если в выражении (5) отношение правдоподобия окажется больше порога  $\gamma$ , то должен быть сделан вывод о сигнале обнаружения на входе приемника РУО, т. е. присутствии обнаруживаемого объекта. В соответствии с выбранным критерием обнаружения определяется величина порога  $\gamma$ . Как правило, в охранных системах используют критерий Неймана – Пирсона, который согласно [4] позволяет получить максимальную вероятность обнаружения сигнала от обнаруживаемого объекта. Вероятность ложных обнаружений задают постоянной и достаточно малой. Величину  $\delta$  определяют как цену правильного решения при отсутствии сигнала, причем  $l(u_{np}) = l(u_{c1}) / l(u_{c0}) > 0$ .

Для решения задачи обнаружения должно выполняться очевидное неравенство  $l(u_{np}) > \gamma$ . Учитывая сказанное и используя результат [4], после преобразования приходим к выражению, определяющему структуру оптимального приемника РУО [7], [8], в котором также присутствует интересующая нас величина порогового напряжения:

$$\frac{2}{W_{\pi 0}} \int_0^T u_{c1}(t) u_{np}(t) dt > \ln \gamma + \frac{W_{c0}}{W_{\pi}} = u_{пор}, \quad (8)$$

где  $W_c = \int_0^T u_c^2(t) dt$  – энергия зондирующего сигнала;  $u_{\text{пор}}$  – величина порогового напряжения, определяемая при выбранном критерии обнаружения заданной вероятностью ложного обнаружения  $P(u_{\text{cl}}/u_{\text{c0}})$ .

Следует отметить, что достоверность обнаружения объектов РУО определяется многими факторами, среди которых достаточно существенная роль принадлежит выбору порогового напряжения узла принятия решения РУО, которое, в свою очередь, определяется уровнем возможных в данных условиях эксплуатации помех.

Выбор порогового напряжения определяется возможностью ложных срабатываний РУО. Чем ниже порог, тем больше вероятность ложных срабатываний устройства. Чем выше порог, тем больше вероятность того, что напряжение полезного сигнала его не превысит и объект не будет обнаружен.

Существуют специальные критерии, позволяющие оптимизировать пороговый уровень при решении статистической задачи распознавания гипотез отсутствия Н0 и наличия Н1 на входе приемника устройства обнаружения полезного сигнала [11].

Алгоритмы работы РУО могут быть различны, но строятся они, как правило, на основании проверки правильности двух гипотез [14]:

– первой гипотезы Н1, предполагающей наличие в сигнале на входе РУО полезного сигнала  $S_{\text{отр}}$  и помехи  $n(t)$ ;

– второй гипотезы Н0, предполагающей отсутствие сигнала и наличие на входе РУО одной только помехи  $n(t)$ .

В идеализированном случае в каждой из сформулированных гипотез предполагают отсутствие помехи  $n(t) = 0$ .

В гауссовском приближении для двух альтернативных гипотез можно записать [14]:

$$H1: Y(t) = S_{\text{отр}}(t) + n(t) \in N(\bar{u}_{\text{вых.АД}}(\tau); \sigma_{\text{вых.АД}}^2(\tau));$$

$$F = \int_{U_{\text{п}}}^{\infty} W(u_{\text{вых.АД}}) \Big|_{q^2=0} du_{\text{вых.АД}} \Big|_{q^2=0} = 1 - \Phi \left\{ \frac{u_{\text{п}} - \bar{u}_{\text{вых.АД}} \Big|_{q^2=0}}{\sigma_{\text{вых.АД}} \Big|_{q^2=0}} \right\}, \quad (12)$$

$$1 - D = \int_{-\infty}^{U_{\text{п}}} W(u_{\text{вых.АД}}) du_{\text{вых.АД}} = \Phi \left[ (u_{\text{п}} - \bar{u}_{\text{вых.АД}}) / \sigma_{\text{вых.АД}} \right], \quad (13)$$

где  $\Phi$  – интеграл вероятности.

Значения  $\bar{u}_{\text{вых.АД}}$ ;  $\bar{u}_{\text{вых.АД}} \Big|_{q^2=0}$ ;  $\sigma_{\text{вых.АД}}^2$ ;  $\sigma_{\text{вых.АД}}^2 \Big|_{q^2=0}$  определяются из соотношений (1)–(8) [10].

В результате проведенного анализа можно говорить о том, что приемник РУО в рабочем режиме

Н0:  $Y(t) = n(t) \in N \left( \bar{u}_{\text{вых.АД}} \Big|_{q_{\text{АД}}^2=0}; \sigma_{\text{вых.АД}}^2 \Big|_{q_{\text{АД}}^2=0} \right)$ , в которых  $\bar{u}_{\text{вых.АД}}$ ,  $\sigma_{\text{вых.АД}}$  – среднее значение и дисперсия выходного напряжения амплитудного детектора РУО;  $q_{\text{АД}}^2 = 0$  – отношение сигнал/шум по мощности на входе детектора сигнала.

Для определения порога ограничения  $u_{\text{пор}}$  воспользуемся критерием Неймана – Пирсона. Для этого определим условные вероятности правильного обнаружения  $P(u_{\text{cl}}/u_{\text{cl}})$  и ложного обнаружения  $P(u_{\text{cl}}/u_{\text{c0}})$ .

Запишем интересующие вероятности, учитывая (8), [9]:

$$P(u_{\text{cl}}/u_{\text{c0}}) = \int_0^{\infty} p(u_{\text{сп}}^k / u_{\text{c0}}) du_{\text{сп}}^k, \quad (9)$$

$$P(u_{\text{cl}}/u_{\text{cl}}) = \int_0^{\infty} p(u_{\text{сп}}^k / u_{\text{cl}}) du_{\text{сп}}^k, \quad (10)$$

где  $u_{\text{сп}}^k = \frac{2}{W_{\text{п}}} \int_0^T u_c(t) u_{\text{сп}}(t) dt$ ;  $u_{\text{пор}} = \ln \gamma + \frac{W_c}{W_{\text{п}}}$ .

Таким образом, при заданной вероятности ложного обнаружения  $P(u_{\text{cl}}/u_{\text{c0}})$  величина  $u_{\text{пор}}$  зависит от закона нормального распределения  $p[u_{\text{сп}}^k(t)/u_{\text{c0}}]$ .

В [15] проведен детальный анализ определения величины порогового напряжения, на основании которого и построены дальнейшие выводы.

В случае, когда решение о наличии объекта в зоне контроля принимается в соответствии с критерием Неймана – Пирсона, величина порогового уровня  $u_{\text{пор}}$  определяется заданной вероятностью ложных срабатываний:

$$u_{\text{пор}} = \bar{u}_{\text{вых.АД}} \Big|_{q_{\text{АД}}^2=0} + \sigma_{\text{вых.АД}} \Big|_{q_{\text{АД}}^2=0} * \Phi^{-1}(1 - F), \quad (11)$$

где  $\Phi^{-1}(x)$  – функция, обратная интегралу вероятностей.

В свою очередь, связь величины напряжения порогового уровня  $u_{\text{пор}}$  с вероятностью правильного обнаружения  $D$ , пропуска  $1 - D$  и ложного срабатывания  $F$  будет определяться выражениями:

находится под воздействием аддитивного широкополосного гауссовского шума, который можно рассматривать как белый гауссовский шум.

Приведены выражения для определения функции и отношения правдоподобия для случая обнаружения сигналов, отраженных от протяженных

объектов, при использовании критерия Неймана – Пирсона.

В статье показано, что определяющим для решения задачи обнаружения является нахождение функции и отношения правдоподобия. В свою очередь, достоверность обнаружения объекта и, следовательно, решение задачи обнаружения связаны с выбором порогового напряжения приемника РУО. Выбор величины порогового напряжения определяется величиной внутриприемного шума. Приведены выражения, характеризующие связь величины напряжения порогового уровня и, следовательно, напряжения внутриприемного шума с основными вероятностными параметрами обнаружения объекта.

Важными практическими выводами являются следующие:

1. Величина порогового напряжения при заданной вероятности ложного обнаружения зависит от закона нормального распределения.
2. Величина порогового напряжения определяется заданной вероятностью ложных срабатываний.

*Работа выполнена в рамках фундаментальной НИР, финансируемой из средств Минобрнауки РФ (Государственное задание на 2014 г., код 226).*

#### Список литературы

1. *Теоретические основы радиолокации* [Текст] / Под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Советское радио, 1978. – 608 с.
2. *Артюшенко В.М.* Анализ параметров спектра доплеровского сигнала, отраженного от протяженного объекта [Текст] / В.М. Артюшенко, В.И. Воловач // *Известия вузов. Приборостроение.* – 2012. – Т. 55. – № 9. – С. 62–67.
3. *Артюшенко В.М.* Особенности отражения зондирующих сигналов радиотехнических устройств обнаружения от протяженных объектов сложной формы [Текст] / В.М. Артюшенко, В.И. Воловач // *Школа университетской науки: Парадигма развития.* – 2012. – № 2 (6). – С. 42–46.
4. *Воловач В.И.* Методы и алгоритмы анализа радиотехнических устройств обнаружения ближнего действия [Текст]: монография / В.И. Воловач; науч. ред. проф. В.М. Артюшенко. – М.: Радио и связь, 2013. – 228 с.
5. *Воловач В.И.* Определение вероятностных параметров радиотехнических устройств обнаружения на фоне внутриприемного гауссовского шума [Текст] / В.И. Воловач // *Научно-технический вестник Поволжья.* – 2012 – № 6. – С. 184–188.
6. *Воловач В.И.* Помехоустойчивость радио-

технических устройств охраны при использовании когерентного и некогерентного методов обнаружения [Текст] / В.И. Воловач // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. Научно-технический журнал.* – 2012. – № 1 (17). – С. 13–19.

7. *Тихонов В.И.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.И. Тихонов, В.Н. Харисов. – М.: Радио и связь, 2004. – 608 с.

8. *Воловач В.И.* Реализация оптимальной структуры обнаружения радиотехнических устройств охранной сигнализации [Текст] / В.И. Воловач // *Электротехнические и информационные комплексы и системы.* – 2009. – № 2. – Т. 9. – С. 43–49.

9. *Радиотехнические системы* [Текст]: учеб. для вузов по спец. «Радиотехника» / Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов и др.: под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.

10. *Воловач В.И.* Обнаружение и различение сигналов на фоне гауссовского шума в радиотехнических устройствах обнаружения ближней дальности [Текст] / В.И. Воловач, Е.В. Гурина, И.С. Акманцева // *Электротехнические и информационные комплексы и системы.* – 2013. – № 1. – Т. 9. – С. 76–80.

11. *Артюшенко В.М.* Исследование и разработка радиолокационного измерителя параметров движения протяженных объектов [Текст]: монография / В.М. Артюшенко. – М.: ФГБОУ ВПО ФТА, 2013. – 214 с.

12. *Артюшенко В.М.* Особенности определения дальности действия радиотехнических устройств обнаружения охранных систем [Текст] / В.М. Артюшенко, В.И. Воловач // *Школа университетской науки: Парадигма развития.* – 2013. – № 3 (7). – С. 77–80.

13. *Воловач В.И.* Накапливающаяся вероятность обнаружения объектов в зоне контроля радиотехнических охранных устройств [Текст] / В.И. Воловач // *Электротехнические и информационные комплексы и системы.* – 2011. – № 1. – Т. 7. – С. 17–20.

14. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники [Текст] / Б.Р. Левин. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

15. *Воловач В.И.* Характеристики обнаружения радиотехнических устройств охраны и повышение эффективности их работы посредством адаптации к изменяющейся помеховой обстановке [Текст] / В.И. Воловач // *Электротехнические и информационные комплексы и системы.* – 2011. – № 2. – Т. 5. – С. 27–29.

#### References

1. *Teoreticheskie osnovy radiolokacii* [Tekst] / Pod red. V.E. Dulevicha. – M.: Sovetskoe radio, 1978. – 608 s.

2. *Artjushenko V.M.* Analiz parametrov spektra doplerovskogo signala, otrazhennogo ot protjazhennogo ob#ekta [Tekst] / V.M. Artjushenko, V.I. Volovach // *Izvestija vuzov. Priborostroenie*. – 2012. – T. 55. – № 9. – S. 62–67.
3. *Artjushenko V.M.* Osobennosti otrazhenija zondirujushhijh signalov radiotekhnicheskijh ustrojstv obnaruzhenija ot protjazhennyh ob#ektov slozhnoj formy [Tekst] / V.M. Artjushenko, V.I. Volovach // *Shkola universitetskij nauki: Paradigma razvitija*. – 2012. – № 2 (6). – S. 42–46.
4. *Volovach V.I.* Metody i algoritmy analiza radiotekhnicheskijh ustrojstv obnaruzhenija blizhnego dejstvija [Tekst]: monografija / V.I. Volovach; nauch. red. prof. V.M. Artjushenko. – M.: Radio i svjaz', 2013. – 228 s.
5. *Volovach V.I.* Opredelenie verojatnostnyh parametrov radiotekhnicheskijh ustrojstv obnaruzhenija na fone vnutripriemnogo gaussovskogo shuma [Tekst] / V.I. Volovach // *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja*. – 2012. – № 6. – S. 184–188.
6. *Volovach V.I.* Pomehoustojchivost' radiotekhnicheskijh ustrojstv ohrany pri ispol'zovanii kogerentnogo i nekogerentnogo metodov obnaruzhenija [Tekst] / V.I. Volovach // *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii. Nauchno-tehnicheskij zhurnal*. – 2012. – № 1 (17). – S. 13–19.
7. *Tikhonov V.I.* Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems [Text]: manual for higher education institutions / V.I. Tikhonov, V.N. Harisov. – M.: Radio and communication, 2004. – 608 s.
8. *Volovach V.I.* Realization of optimum structure of detection of radio engineering devices of the security alarm system [Text] / V.I. Volovach // *Electrotechnical and information complexes and system*. – 2009. – № 2. – T. 9. – S. 43–49.
9. *Radio engineering systems* [Text]: manual for higher education institutions as a Radio technician / Yu.P. Grishin, V.P. Ipatov, Yu.M. Kazarinov [etc.]: editor Yu.M. Kazarinov. – M.: The higher school, 1990. – 496 s.
10. *Volovach V.I.* Detection and distinction of signals against Gaussian noise in radio engineering devices of detection of near range [Text] / V. I. Volovach, E.V. Gurin, I.S. Akmantsev // *Electrotechnical and information complexes and system*. – 2013. – № 1. – T. 9. – S. 76–80.
11. *Artyushenko V.M.* Research and development of the radar measuring instrument of parameters of movement of extended objects [Text]: monograph / V.M. Artyushenko. – M.: FGBOU VPO FTA, 2013. – 214 s.
12. *Artyushenko V.M.* Features of determination of range of operation of radio engineering devices of detection of security systems [Text] / V.M. Artyushenko, V.I. Volovach // *School of university science: Development paradigm*. – 2013. – № 3 (7). – S. 77–80.
13. *Volovach V.I.* Collecting probability of detection of objects in a zone of control of radio engineering security devices [Text] / V.I. Volovach // *Electrotechnical and information complexes and system*. – 2011. – № 1. – T. 7. – S. 17–20.
14. *Levin B.R.* Theoretical bases of statistical radio engineering [Text] / B.R. Levin. – M.: Radio and communication, 1989. – 656 s.
15. *Volovach V.I.* Harakteristiki obnaruzhenija radiotekhnicheskijh ustrojstv ohrany i povyshenie jeffektivnosti ih raboty posredstvom adaptacii k izmenjajushhejsja pomehovej obstanovke [Tekst] / V.I. Volovach // *Jelektrotehnicheskije i informacionnye kompleksy i sistemy*. – 2011. – № 2. – T. 5. – S. 27–29.



**Павлов С.В.**  
**Pavlov S.V.**

*доктор технических наук, профессор кафедры «Геоинформационные системы» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа*



**Самойлов А.С.**  
**Samoylov A.S.**

*начальник группы ОАО «Газпром газораспределение Уфа», Россия, г. Уфа*

УДК 621.341

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ОТНОШЕНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АКТУАЛЬНОСТИ БАЗЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

В статье рассматривается проблема обеспечения актуальности базы данных пространственных объектов, входящих в состав геоинформационной системы газораспределительной организации и окружающей их среды. Сложность поддержания базы данных в актуальном состоянии заключается в наличии многоуровневой структуры и существенной территориальной распределенности подразделений организации.

Актуализация пространственной информации об объектах газораспределительных сетей обеспечивается на основе построения топологических отношений, что позволяет повысить качество имеющейся в базе данных информации и контролировать его на протяжении всего жизненного цикла, что в значительной степени обеспечивает сокращение количества ошибок, актуальность и непротиворечивость пространственной информации. В качестве одного из подходов для решения рассматриваемой проблемы предложен метод точно-множественного описания пространственных объектов, где различные типы объектов являются множествами, состоящими из совокупности координат точек, входящих в их состав.

Приведены определения и представлены иллюстрации возможных случаев топологических отношений объектов газораспределительных сетей и окружающих их объектов:

- отношение «касается»;
- отношение «находится внутри»;
- отношение «пересекает»;
- отношение «перекрывает»;
- отношение «не пересекается».

Определены классы пространственных данных, являющихся объектами базы данных геоинформационной системы газораспределительной организации, и описаны топологические правила между соответствующими парами объектов, в результате чего составлена обобщенная таблица допустимых пространственных отношений между объектами газораспределительной сети и окружающими их объектами. В качестве примера приведена демонстрация реализации топологических правил с помощью программного обеспечения ArcGis.

Разработанный алгоритм позволяет обеспечить актуальность пространственной информации об объектах сетей газоснабжения промышленных предприятий на основе построения топологических отношений.

*Ключевые слова:* геоинформационная система, пространственные данные, информационное обеспе-

чение газораспределительной организации, газораспределительные сети, топологические правила, поддержание актуальности пространственной информации.

## TOPOLOGICAL RELATIONS USE FOR SPATIAL DATABASE RELEVANCE PROVISION IN DISTRIBUTED GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM OF INDUSTRIAL ENTERPRISES GAS SUPPLY SYSTEM

The paper considers the issue of spatial objects database relevance provision of geographic information system in gas-distribution organization and their environment. The complicity of keeping the database up-to-date is in multilayer structure and substantial spatial distribution of the company's subdivisions.

Spatial information updating about gas distribution networks objects is based on topological relations building which allows to increase the quality of presenting in database information and monitor it during the whole life cycle. This significantly provides the error quantity reduction, timeliness and spatial information consistency. The method of point-set description of spatial objects was proposed as one of the approach for solving the considered problem where different types of objects are sets consisting of point location assembly and the points are their elements.

The paper includes the definitions and drawings of possible cases of topological relations of gas distribution network objects and the surrounding them objects:

- the touch relationship;
- the in relationship;
- the cross relationship;
- the overlap relationship;
- the disjoint relationship.

We define the classes of spatial objects which are database objects of geographic information system in gas-distribution organization and describe the topological rules between the corresponding pares of objects which results in the generalized table of admissible spatial relationships between objects of gas distribution networks and surrounding them objects. The demonstration of topological rules realization with the help of ArcGis software is provided as an example.

The due-to algorithm allows to provide the spatial information update about the objects of gas-supply system in industrial enterprises on the basis of topological relationships building.

*Key words:* geographic information system, spatial data, information support of gas distribution organization, gas-distribution networks, topological rules, keeping the spatial information relevance.

Деятельность промышленных предприятий во многом зависит от их своевременного обеспечения энергоресурсами. Для многих из них (по России их более 14 тысяч [1]) основным энергоносителем является природный газ, вследствие чего своевременное, безаварийное и бесперебойное обеспечение газом потребителей и поддержание в работоспособном состоянии инфраструктуры газораспределительных сетей является важной задачей, которую осуществляют региональные газораспределительные организации.

Помимо того, что газоснабжение осуществляется с помощью большого количества территориально распределенных объектов и оборудования, газораспределительные организации имеют иерархическую территориально распределенную структуру: первый уровень – аппарат управления, второй уровень – филиал, третий уровень – районная эксплуатационная служба (участок), вследствие

чего база пространственных данных организации имеет сложную распределенную структуру.

Для процесса управления обеспечением промышленных предприятий газом требуется большое количество пространственной информации, и наиболее эффективным решением, которое позволяет оперативно предоставить многопользовательский доступ к необходимой информации, являются географические информационные системы (ГИС) [2, 3, 4]. ГИС газораспределительной организации содержит большое количество пространственных объектов: газораспределительная станция, магистральный газопровод, газопровод, пункт редуцирования газа, абонент – потребитель газа, промышленное предприятие, структура взаимосвязи которых представлена на рисунке 1.

Для оперативного принятия управленческих решений руководству газораспределительной организации необходимо владеть полной и достовер-

ной информацией об обслуживаемых объектах, что обеспечивается актуализацией пространственной информации об объектах газораспределительных сетей на основе построения топологических отношений. Использование топологических правил позволяет повысить качество имеющейся в базе данных информации и контролировать его на протяжении всего жизненного цикла, что в значительной степени обеспечивает сокращение количества ошибок, актуальность и непротиворечивость пространственной информации.

Топология – это набор правил, которые вместе с инструментами и технологиями редактирования позволяют более точно моделировать пространственные отношения в базе геоданных. Например, в программном обеспечении ArcGis контроль топологии обеспечивается с помощью наборов правил, которые определяют то, как пространственные объекты взаиморасполагаются в географическом пространстве, а также через набор инструментов редактирования, одинаковым образом применяемых к объектам с общей геометрией [6].

Для обеспечения качества пространственных данных об объектах газораспределительных сетей необходим механизм, позволяющий осуществлять проверку топологической корректности вносимой информации и предоставлять удаленным пользователям информацию об ошибках, возникающих при вводе информации в базу данных, для их своевременного устранения.

Топологические отношения между пространственными объектами, участвующими в распределении и транспортировке газа, могут быть описаны с помощью обобщенных правил, для формулировки которых введем обозначения:  $P_i$  – множество, содержащее координаты одного  $i$ -го точечного объекта газораспределительных сетей и окружающей их среды (например пункт редуцирования газа, запорная арматура),  $x_i^P, y_i^P$ ,  $P_i = \{(x_i^P, y_i^P)\}$ , совокупность координат всех точечных объектов обозначим:

$$P = \bigcup_{i=1}^{k_p} P_i \quad (1)$$

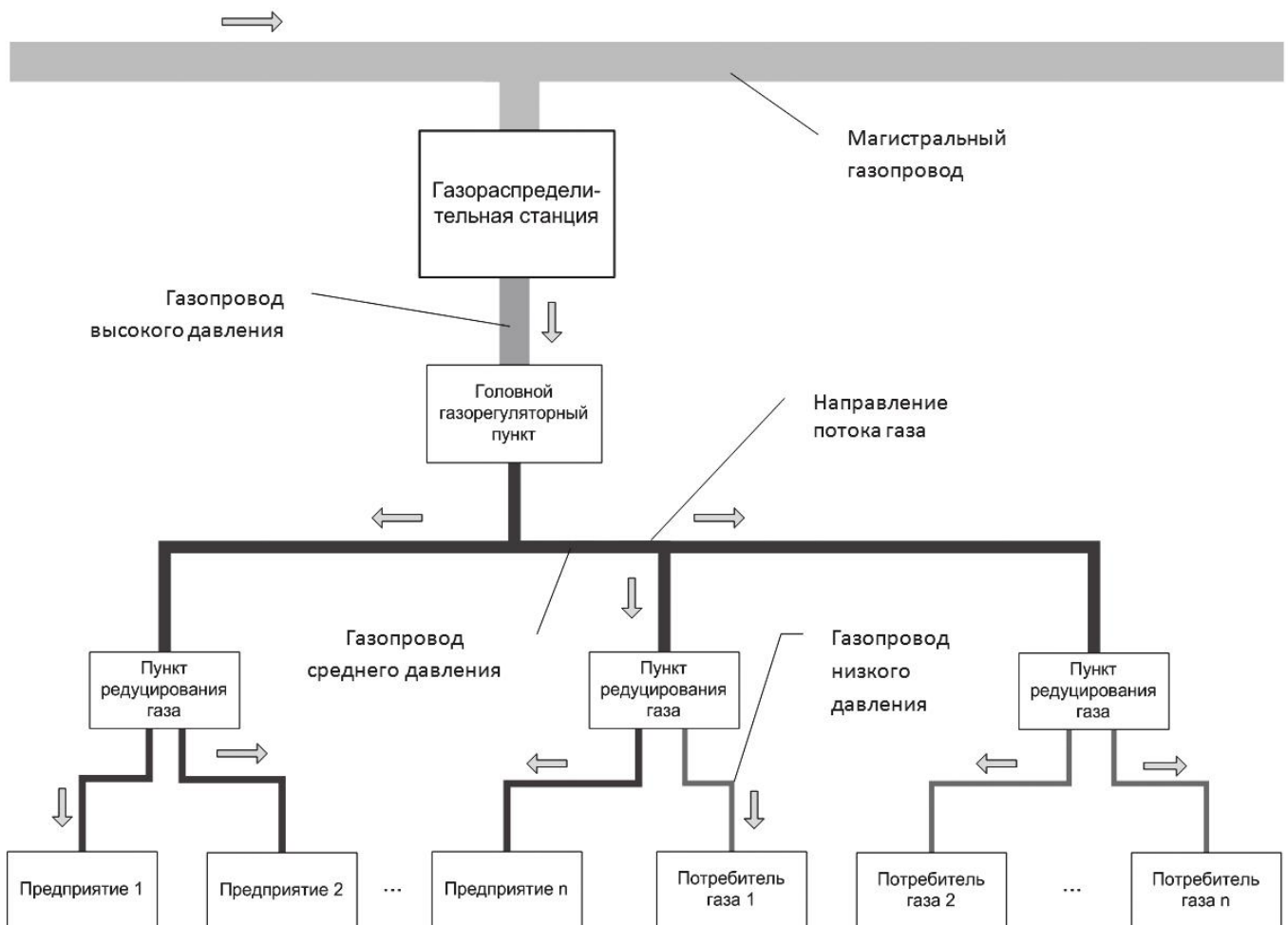


Рис. 1. Схема газоснабжения промышленных предприятий и потребителей

где  $i = \overline{1, k_p}$  – количество точек.

Кроме того, всю совокупность точечных объектов можно представить в виде множества  $\overline{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_{k_p}\}$ , тогда в силу введенных обозначений будут выполняться следующие соотношения:  $P_i \in \overline{P}, P_i \subset P$ .

$L_i^*$  – множество, содержащее координаты  $i$ -го линейного объекта газораспределительных сетей и окружающей их среды (например, газопровод, футляр), которые задаются координатами вершин  $x_{in_i}^l, y_{in_i}^l$ ,

$$L_i^* = \{(x_{i1}^l, y_{i1}^l), (x_{i2}^l, y_{i2}^l), \dots, (x_{in_i}^l, y_{in_i}^l)\}, \quad (2)$$

где  $n_i^l$  – количество вершин линейного объекта;  $i = \overline{1, k_l}$  – номера линейных объектов. Для целей определения топологических отношений между различными пространственными объектами введем в рассмотрение другое множество  $L_i = \{(x_{ij}^l, y_{ij}^l)\}$ , которое содержит бесконечное множество координат всех точек непрерывного линейного объекта, а не только координаты его вершин.

Совокупность координат всех линейных объектов обозначим:

$$L = \bigcup_{i=1}^{k_l} L_i = \{(x_i^l, y_i^l)\}, \quad (3)$$

где  $k_l$  – количество линейных объектов рассматриваемой территории.

Кроме того, совокупность линейных объектов можно представить в виде множества  $\overline{L} = \{L_1, L_2, \dots, L_{k_l}\}$ , тогда в силу введенных обозначений будут выполняться следующие соотношения:  $L_i \in \overline{L}, L_i \subset L$ .

$A_i^*$  – множество, содержащее координаты  $i$ -го площадного объекта газораспределительных сетей и окружающей их среды (например, производственная база, охранная зона), которые задаются координатами вершин  $x_{in_i}^a, y_{in_i}^a$ ,

$$A_i^* = \{(x_{i1}^a, y_{i1}^a), (x_{i2}^a, y_{i2}^a), \dots, (x_{in_i}^a, y_{in_i}^a)\}, \quad (4)$$

где  $n_i^a$  – количество вершин площадного объекта;  $i = \overline{1, k_a}$  – номера площадных объектов.

Для целей определения топологических отношений между различными пространственными объектами введем в рассмотрение другое множество  $A_i = \{(x_i^a, y_i^a)\}$ , которое содержит бесконечное множество координат всех точек непрерывного полигонального объекта, а не только координаты его вершин. Совокупность координат всех полигональных объектов обозначим как

$$A = \bigcup_{i=1}^{k_a} A_i = \{(x_i^a, y_i^a)\}, \quad (5)$$

где  $k_a$  – количество полигональных объектов рассматриваемой территории.

Кроме того, совокупность полигональных объектов можно представить в виде множества  $\overline{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_{k_a}\}$ , тогда в силу введенных обозначений будут выполняться следующие соотношения:  $A_i \in \overline{A}, A_i \subset A$ .

Через  $Y$  обозначим любой тип объектов из множества точечных, линейных и площадных объектов:

$$Y = \begin{cases} P, & \text{если объекты точка} \\ L, & \text{если объекты линия} \\ A, & \text{если объекты полигон} \end{cases} \quad (6)$$

В [8] предлагается система объектных вычислений, которая является формальным языком для создания запросов к базам геоданных, что позволяет, например, с помощью записи  $(Y_1, r, Y_2)$  обозначить наличие связи  $r$  между объектами  $Y_1$  и  $Y_2$ , такую систему из трех элементов назовем событием. Система объектных вычислений позволяет использовать методы (операции) внутри определяющего запроса, а события могут быть составлены с помощью логических операторов И ( $\wedge$ ), ИЛИ ( $\vee$ ).

Формальные определения геометрических объектов и связей основаны на точечно-множественном подходе, где объекты – множества, а точки – элементы этого множества [9]. Предметом связей являются точки, линии и области, используемые в ГИС: размерность топологического пространства  $R^2$ ; все виды объектов являются замкнутыми, то есть каждый объект содержит все свое множество точек и не является объединением двух различных объектов. Таким образом, пространственные объекты обладают следующими свойствами:

1. Площадные объекты  $A$  связаны только с областями без пустот.
2. Линейные объекты  $L$  – линии без самопересечений, которые замыкаются на себя (замкнутая кривая), либо имеют две конечные точки.
3. Точечный объект  $P$  может содержать только одну точку.

Введем определения, которые связывают систему объектных вычислений и точечно-множественный подход, для описания расположения пространственных объектов.  $S$  – обобщенное точечное множество, которое может состоять из нескольких не связанных между собой частей, а все  $P$  – точечные,  $L$  – линейные и  $A$  – площадные пространственные объекты являются элементами  $S$ :

$$S = P \cup L \cup A = \{(x_{ij}^m, y_{ij}^m)\}, \quad (7)$$

$$i = \overline{1, k_m}; j = \begin{cases} \overline{1, n_i^l} & \text{для } L \\ \overline{1, n_i^a} & \text{для } A \end{cases}; m = \{p, l, a\}$$

Для определения размерности точечного мно-



жества введем функцию «dim», которая возвращает размерность точечного множества, а в случае, если множество является совокупностью нескольких частей, возвращается размерность наибольшего множества:

$$\dim(S) = \begin{cases} -, \text{ если } S = \emptyset \\ 0, P(x_j, y_j) \in S; L(x_k, y_k), A(x_l, y_l) \notin S \\ 1, L(x_k, y_k) \in S; A(x_l, y_l) \notin S \\ 2, A(x_l, y_l) \in S. \end{cases} \quad (8)$$

Границы и внутренние области объектов используются в методе Эгенхофера [10] для описания топологических связей. Это верно и для нашей системы, поэтому для границы и внутренней части трех типов объектов дадим определение, которое немного отличается от чистой математической теории, но ведет к непротиворечивым определениям для пространственных отношений. Граница объекта  $Y$  обозначается как  $\partial Y$  и определяется для каждого типа объектов следующим образом:

1.  $\partial P$  – учитываем, что граница точечного объекта – пустое множество.
2.  $\partial L$  – граница линии – пустое множество, в случае, если линия представляет собой замкнутую дугу, в противном случае – это набор из двух раздельных конечных точек.
3.  $\partial A$  – граница области – замкнутая дуга, содержащая все граничные точки области.

$$(Y_1, \text{касается}, Y_2) \Leftrightarrow (Y_1^\circ \cap Y_2^\circ = \emptyset) \wedge (Y_1 \cap Y_2 \neq \emptyset), \quad (10)$$

т. е.  $\exists (x_1^1, y_1^1) \in \partial Y_1, (x_1^2, y_1^2) \in \partial Y_2: x_1^1 = x_1^2, y_1^1 = y_1^2$ .

Введенное топологическое отношение «касается» (Т) применимо для описания расположения объектов газораспределительных сетей и окружающей их среды на рис. 2: а) охранная зона/населенный пункт (область/область); б) газопровод/автомобильная дорога (линия/линия); в) газопровод/жилой дом (линия/область); г) газопровод/абонент – потребитель газа (линия/точка), но не применимо к си-

Внутренность объекта  $Y$  обозначается  $Y^\circ$  и определяется следующим образом:

$$Y^\circ = Y - \partial Y. \quad (9)$$

Отметим, что внутреннее пространство точки и замкнутой линии равно самому объекту.

На уровне языка запросов мы принимаем во внимание изложенные выше соображения, делая доступными для пользователей только операторы границы (для областей и линейных объектов) вместе с пятью топологическими связями: касаются, находятся внутри, пересекаются, перекрываются, не пересекаются. Таким образом, в записи  $(Y_1, r, Y_2)$   $r$  обозначает один из пяти типов связей, в то время как  $Y_1$  и  $Y_2$  могут быть как объектами, так и границами объектов. Описанный, таким образом, набор топологических правил будет достаточным для описания возможных случаев топологических отношений объектов газораспределительных сетей.

В приведенных ниже определениях топологических отношений системе объектных вычислений поставлено в соответствие описание, базирующееся на точно-множественном подходе.

**Определение 1: Отношение «касается».** Объект  $Y_1$  касается  $Y_2$ , когда внутренности этих объектов  $Y_1^\circ$  и  $Y_2^\circ$  не пересекаются, а границы этих объектов имеют общие координаты:

туации точка/точка; д) абонент – потребитель газа/жилой дом (точка/область).

**Определение 2: Отношение «находится внутри».** Объект  $Y_1$  находится внутри объекта  $Y_2$ , когда для любой пары координат  $(x_i^1, y_i^1)$ , принадлежащих  $Y_1$ , существует пара координат  $(x_i^2, y_i^2)$ , принадлежащих  $Y_2$ , такая, что  $x_i^1 = x_i^2, y_i^1 = y_i^2$ :

$$(Y_1, \text{внутри}, Y_2) \Leftrightarrow (Y_1 \cap Y_2 = Y_1) \wedge (Y_1^\circ \cap Y_2^\circ \neq \emptyset), \quad (11)$$

т. е. для  $\forall (x_i^1, y_i^1) \in Y_1, \exists (x_i^2, y_i^2) \in Y_2: x_i^1 = x_i^2, y_i^1 = y_i^2$ .

Введенное топологическое отношение «находится внутри» (И) применимо для описания расположения объектов газораспределительных сетей и окружающей их среды на рис. 3: а) охранная зона/населенный пункт (область/область); б) промышленное предприятие/населенный пункт (точка/область); в) газопровод/административный район (линия/область);

г) газопровод/контрольная трубка (линия/точка).

**Определение 3: Отношение «пересекает».** Объект  $Y_1$  пересекает объект  $Y_2$ , когда существуют координаты  $(x_i^1, y_i^1)$ , принадлежащие внутренностям объекта  $Y_1$ , и координаты  $(x_i^2, y_i^2)$ , принадлежащие внутренностям объекта  $Y_2$ , такие, что  $x_i^1 = x_i^2, y_i^1 = y_i^2$ ;

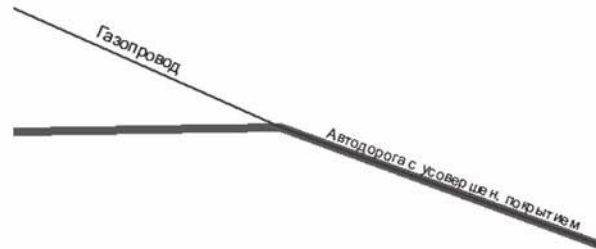
$$\begin{aligned}
 (Y_1, \text{пересекает}, Y_2) &\Leftrightarrow \dim(Y_1^\circ \cap Y_2^\circ) = \\
 &= (\max(\dim(Y_1^\circ), \dim(Y_2^\circ)) - 1) \wedge \\
 &\wedge (Y_1 \cap Y_2 \neq Y_1) \wedge (Y_1 \cap Y_2 \neq Y_2)
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

т. е.  $\exists (x_1^1, y_1^1) \in Y_1^\circ, (x_1^2, y_1^2) \in Y_2^\circ: x_1^1 = x_1^2, y_1^1 = y_1^2$ .

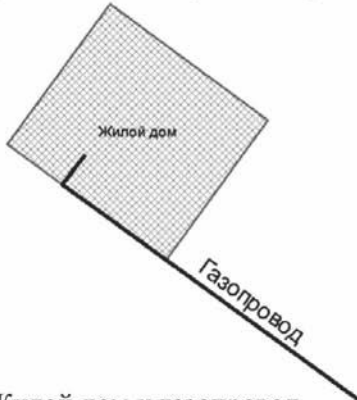
Введенное топологическое отношение «пересекает» (C) применимо для описания расположения объектов газораспределительных сетей и окружающей их среды на рис. 4: а) газопровод высокого давления/газопровод среднего давления (линия/линия); б) газопровод /административный район (линия/область).



а) Населенный пункт и охранная зона



б) Газопровод и автомобильная дорога



в) Жилой дом и газопровод

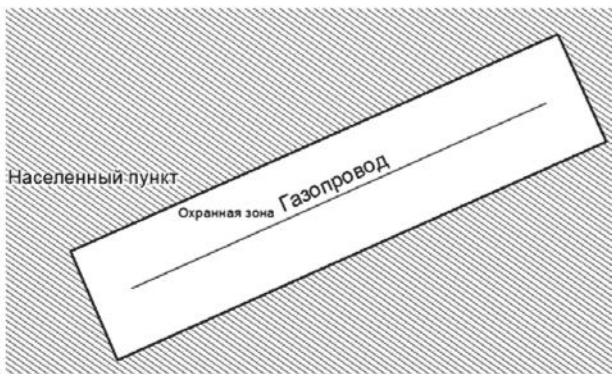


г) Абонент - потребитель газа и газопровод



д) Жилой дом и абонент - потребитель газа

Рис. 2. Топологические ситуации, иллюстрирующие отношение «касаются» для двух областей, двух линий, линии и области, точки и линии, точки и области



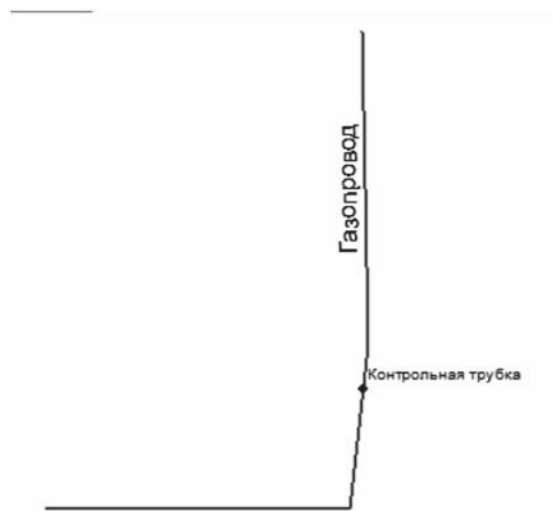
а) Населенный пункт и охранная зона



б) Промышленное предприятие и населенный пункт

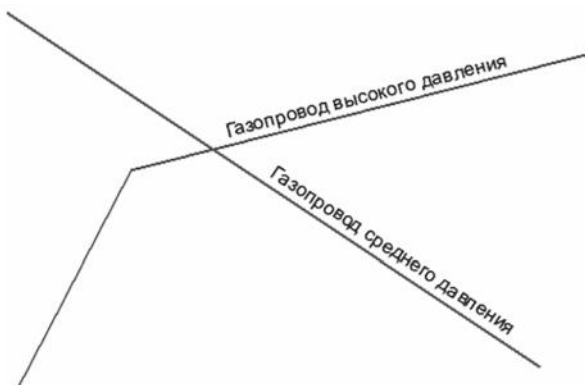


в) Газопровод и административный район

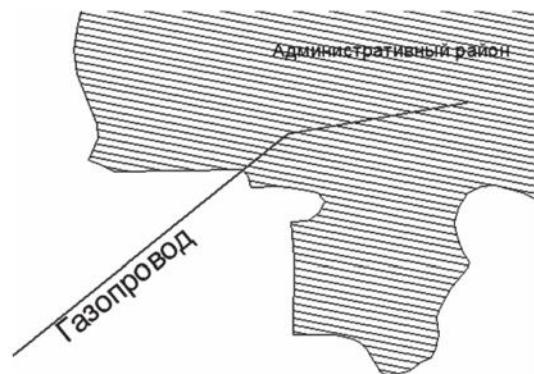


г) Газопровод и контрольная трубка

Рис. 3. Топологические ситуации, иллюстрирующие отношение «внутри» для двух областей, точки и области, линии и области, точки и линии



а) Газопровод высокого давления и газопровод среднего давления



б) Газопровод и административный район

Рис. 4. Топологические ситуации, иллюстрирующие отношение «пересекаются» для двух линий, линии и области

**Определение 4: Отношение «перекрывает».** Объект  $Y_1$  перекрывает объект  $Y_2$ , когда существуют как минимум две пары координат  $(x_i^1, y_i^1), (x_i^2, y_i^2)$ , принадлежащих  $Y_1$ , и две пары координат  $(x_i^3, y_i^3), (x_i^4, y_i^4)$ , принадлежащих  $Y_2$ , таких, что  $x_i^1 = x_i^3, y_i^1 = y_i^3$  и  $x_i^2 = x_i^4, y_i^2 = y_i^4$ .

$$(Y_1, \text{перекрывает}, Y_2) \Leftrightarrow \dim(Y_1^\circ) = \dim(Y_2^\circ) = (\dim(Y_1^\circ \cap Y_2^\circ)) \wedge (Y_1 \cap Y_2 \neq Y_1) \wedge (Y_1 \cap Y_2 \neq Y_2), (13)$$

т. е. существуют как минимум две пары:

$$(x_i^1, y_i^1), (x_i^2, y_i^2) \in Y_1, (x_i^3, y_i^3), (x_i^4, y_i^4) \in Y_2: x_i^1 = x_i^3, y_i^1 = y_i^3 \text{ и } x_i^2 \neq x_i^4 \text{ или } y_i^2 \neq y_i^4.$$

Введенное топологическое отношение «перекрывает» (O) применимо для описания расположения объектов газораспределительных сетей и окружающей их среды на рис. 5: а) охранная зона/строение (область/область); б) газопровод/футляр (линия/линия).

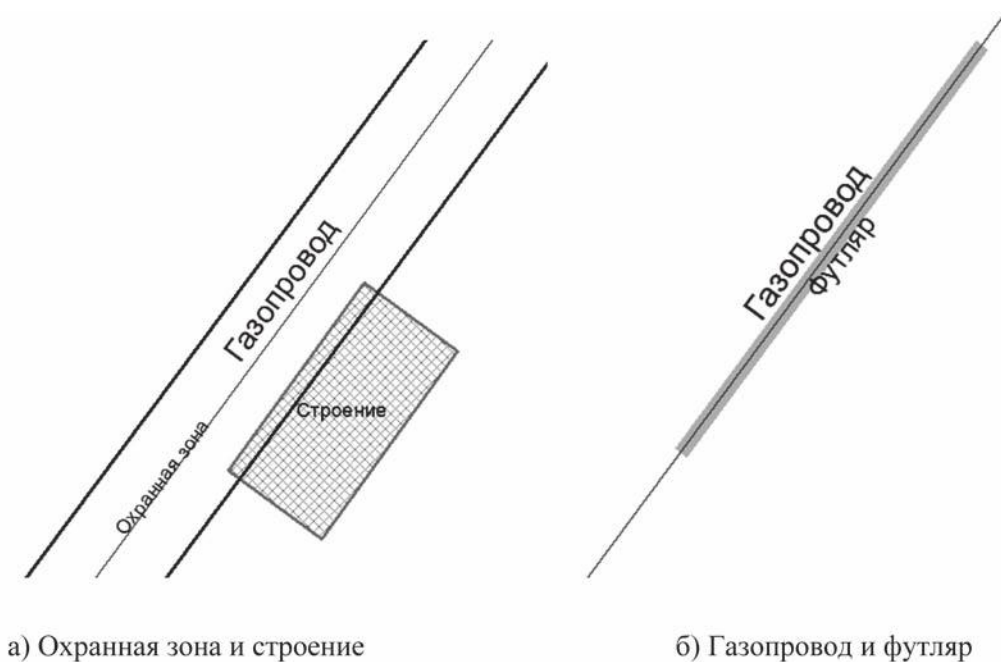


Рис. 5. Топологические ситуации, иллюстрирующие отношение «перекрываются» для двух областей, двух линий

**Определение 5: Отношение «не пересекается».** Объект  $Y_1$  не пересекает объект  $Y_2$ , когда для любых  $(x_i^1, y_i^1)$ , принадлежащих  $Y_1$ , и любых  $(x_i^2, y_i^2)$ , принадлежащих  $Y_2$ , верно  $x_i^1 \neq x_i^2, y_i^1 \neq y_i^2$ :

$$(Y_1, \text{не пересекается}, Y_2) \Leftrightarrow (Y_1 \cap Y_2 = \emptyset), (14)$$

т. е.  $\forall (x_i^1, y_i^1) \in Y_1, \text{ и } \forall (x_i^2, y_i^2) \in Y_2: x_i^1 \neq x_i^2, y_i^1 \neq y_i^2$ .

Введенное топологическое отношение «не перекрывает» (D) применимо для описания расположения объектов газораспределительных сетей и окружающей их среды на рис. 6: а) охранная зона/строение (область/область); б) газопровод/строение (линия/область); в) контрольно-измерительный пункт/строение (точка/область).

Введенные определения топологических отношений предлагается использовать для решения задачи проверки топологической корректности пространственных данных объектов газораспределительной сети. Для этого потребуется:

1. Определить классы объектов, которые уча-

ствуют в построении сети.

2. Описать топологические правила, в соответствии с которыми будет осуществляться проверка корректности сети.

3. Проверить выполнение топологических правил с необходимыми классами пространственных данных.

4. Предоставить информацию о допущенных топологических ошибках конечным удаленным пользователям, осуществляющим ввод информации.

Объекты сетей газоснабжения промышленных предприятий, обслуживание которых осуществляют газораспределительные организации, представлены в базе геоданных в виде набора классов пространственных объектов, для которых задаются топологические правила: газораспределительные станции; газопровод; пункт редуцирования газа; потребители газа; абоненты-потребители; административный район; гидрозатвор; запорная арматура; кабельные

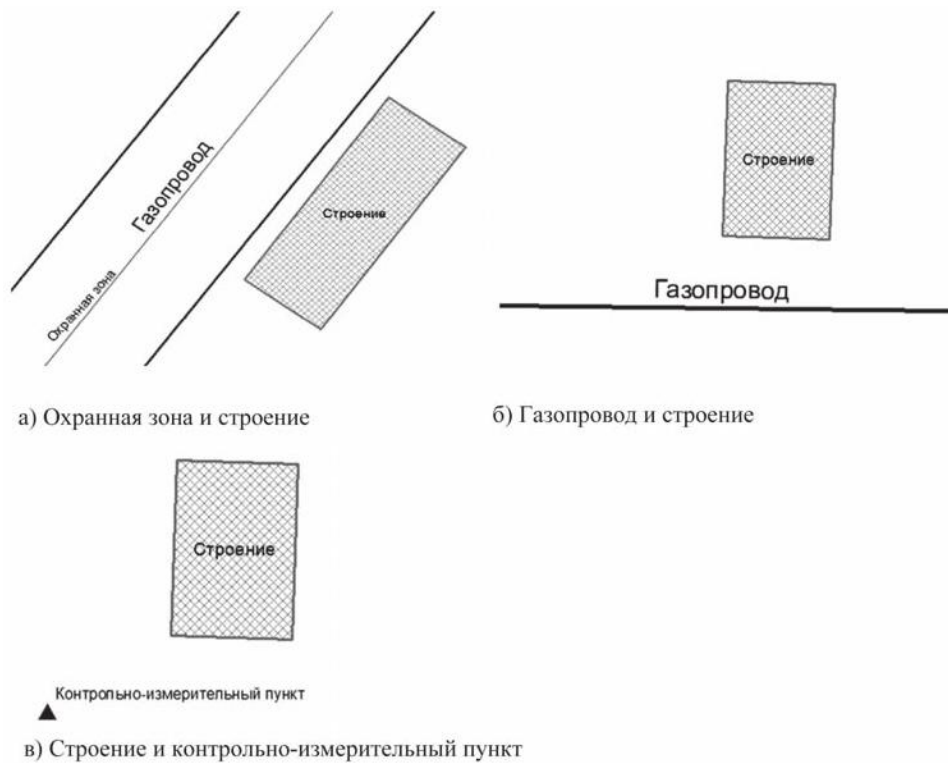


Рис. 6. Топологические ситуации, иллюстрирующие отношение «не пересекаются» для двух областей, линии и области, точки и области

линии; колодцы смежных коммуникаций; компенсатор; конденсатосборник; контрольно-измерительные пункты; контрольные трубки; населенный пункт; опоры газопровода; охранная зона; переход диаметра материала газопровода; пикеты; смежные коммуникации; установки ЭХЗ; футляры. После того как объекты газораспределительной сети, которые

будут участвовать в топологических отношениях, выделены из общего массива объектов базы данных, требуется определить пространственные отношения между этими объектами. В наиболее общем виде топологические правила, описывающие пространственные отношения между различными видами геометрических объектов, приведены в таблице 1.

Таблица 1

### Обобщенные топологические правила

Точки	Линии	Полигоны
<ul style="list-style-type: none"> <li>– должны совпадать с конечными точками линии;</li> <li>– должны лежать на линии;</li> <li>– должны быть полностью внутри класса полигональных объектов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– не должны иметь висячих узлов;</li> <li>– не должны перекрываться</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– должны быть полностью внутри другого класса полигональных объектов</li> </ul>

В соответствии с этими обобщенными правилами для обеспечения актуализации пространственной информации об объектах газораспределительной сети предложены правила топологических отношений между основными классами пространственных объектов, которые приведены в таблице 2.

Эти правила могут быть реализованы в ГИС конкретной газораспределительной организации с помощью инструментов специального программного обеспечения. Например, создание топологиче-

ского правила «потребитель должен располагаться на конце участка газопровода» может быть реализовано в среде программного обеспечения ArcGis так, как показано на рис. 7.

Предложенные правила используются для проверки топологических отношений между пространственными объектами, ввод которых в базу данных ГИС осуществляется посредством веб-клиента (подсистемы удаленного ввода и редактирования данных) и инструмента администратора

настоющего приложения ArcGis Desktop, в результате чего выявляются ошибки введенных пространственных данных. Далее с помощью инструментов ArcGis Desktop эти ошибки переносятся в специ-

альные слои, доступ к которым получают пользователи, использующие в своей работе подсистему информационно-справочных и поисковых задач и подсистему удаленного редактирования.

Таблица 2

### Топологические правила между объектами газораспределительной сети

Класс объектов	Правило	Класс объектов
Газораспределительные станции	Должны совпадать с конечными точками	Газопровод
Газопровод	Не должны иметь висячих узлов, не должны иметь самопересечений	
Пункт редуцирования газа	Должны совпадать с конечными точками	Газопровод
Потребители газа	Должны быть полностью внутри	Административный район
Абоненты-потребители	Должны быть полностью внутри	Строения
Гидрозатвор	Точка должна лежать на линии	Газопровод
Запорная арматура	Должны совпадать с конечными точками	Газопровод
Кабельные линии	Не должны иметь висячих узлов, не должны иметь самопересечений	
Колодцы смежных коммуникаций	Точка должна лежать на линии	Смежные коммуникации
Компенсатор	Точка должна лежать на линии	Газопровод
Конденсатосборник	Точка должна лежать на линии	Газопровод
Контрольно-измерительные пункты	Точка должна лежать на линии	Газопровод
Контрольные трубки	Точка должна лежать на линии	Газопровод
Опоры газопровода	Точка должна лежать на линии	Газопровод
Газопровод	Должны быть полностью внутри	Охранная зона
Переход диаметра материала газопровода	Должны совпадать с конечными точками	Газопровод
Пикеты	Точка должна лежать на линии	Газопровод
Смежные коммуникации	Не должны иметь висячих узлов, не должны иметь самопересечений	
Установки ЭХЗ	Точка должна лежать на линии	Дренажный кабель ЭХЗ
Футляры	Должны совмещаться с линией	Газопровод

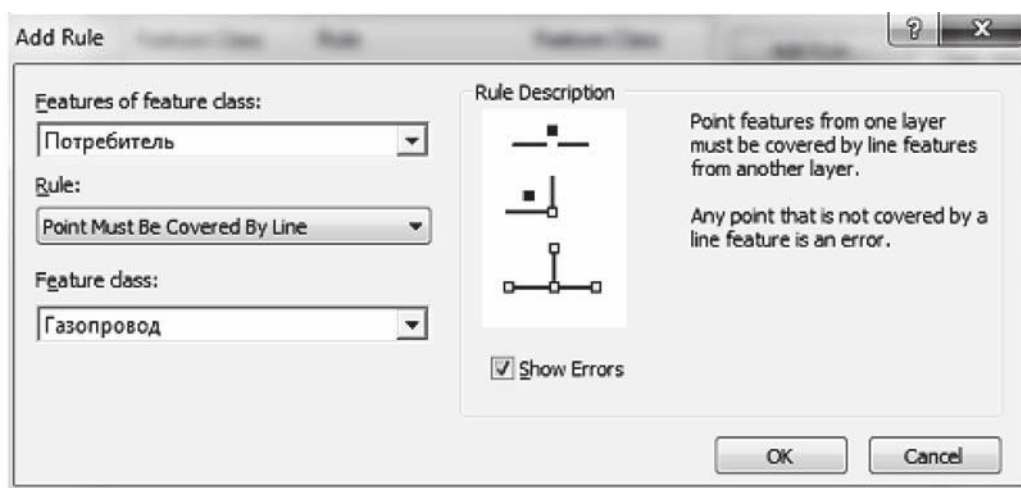


Рис. 7. Создание топологического правила в ПО ArcGis Desktop

Во время сеанса редактирования пользователи устраняют выявленные ошибки топологии, после чего администратор осуществляет повторную проверку на выполнение правил и наличие ошибок топологии до тех пор, пока все ошибки не будут исключены. Алгоритм обеспечения актуальности пространственной информации об объектах сетей газоснабжения промышленных предприятий на основе построения топологических отношений представлен на рисунках 8 и 9.

На основании анализа данных из таблиц 1 и 2 выделены правила, характеризующие топологические отношения между объектами газораспределительной сети и окружающей их средой, в результате чего сформирована таблица 3, в которой представлены допустимые пространственные отношения для каждой пары объектов: касаются (Т), находятся внутри (I), пересекаются (С), перекрываются (О), не пересекаются (D).

### Заключение

Для пространственных данных, описывающих объекты газораспределительной сети и окружающую их среду, выделены пять топологических отношений (касаются, находятся внутри, пересекаются, перекрываются, не пересекаются), которые позволяют формализовать в базе данных связи между различными классами объектов газораспределительной сети и правилами построения топологических отношений между ними позволяют удаленным пользователям обеспечивать актуальность информации в базе данных ГИС, что, в свою очередь, помогает быстро выявлять и исправлять ошибки ввода, обеспечивая высокое качество и актуальность информации в базе пространственных данных, что существенно улучшает процесс управления газоснабжением промышленных предприятий.

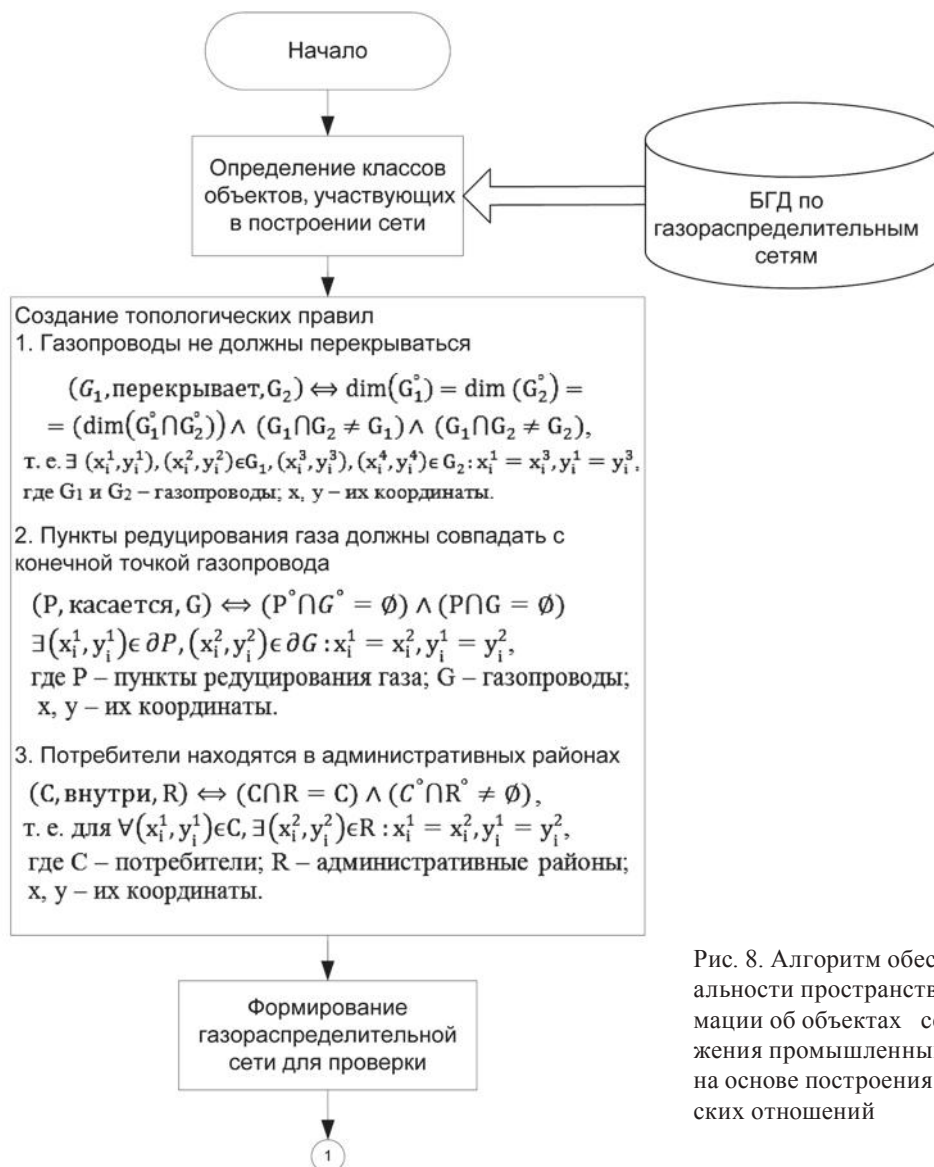


Рис. 8. Алгоритм обеспечения актуальности пространственной информации об объектах сетей газоснабжения промышленных предприятий на основе построения топологических отношений

## Допустимые пространственные отношения между объектами газораспределительных сетей и окружающими их объектами

Газораспределительные станции	Административный район	Газораспределительные станции	Газопровод	Пункт редуцирования газа	Потребители газа	Абоненты-потребители	Гидрозапор	Дренажные кабели ЭХЗ	Запорная арматура	Кабельные линии	Колодцы смежных коммуникаций	Компенсатор	Конденсатосборник	Контрольно-измерительные пункты	Контрольные трубы	Охранная зона	Опоры газопровода	Переход диаметра газопровода	Пикеты	Смежные коммуникации	Строения	Установки ЭХЗ	Фуляры	
	I	D	T	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D
Газопровод	I, T	T	T	T	T	T	I	D	T	C	D	T	T	T	T	I	T	T	T	C	T, C	D	D	O, C
Пункт редуцирования газа	I	D	T	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D
Потребители газа	I	D	T	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D
Абоненты-потребители	I	D	T	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	I	D	D	D	D	I	D	D	D
Гидрозапор	I	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D
Запорная арматура	I	D	T	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D
Кабельные линии	I	D	C	D	D	D	D	D	D	D	T	D	D	D	D	T, C	D	D	D	T	D	D	D	D
Колодцы смежных коммуникаций	I	D	D	D	D	D	D	D	D	T	D	D	D	D	D	T, I	D	D	D	T	D	D	D	D
Компенсатор	I	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D
Конденсатосборник	I	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D
Контрольно-измерительные пункты	I	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D
Контрольные трубы	I	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D
Опоры газопровода	I	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D
Переход диаметра материала газопровода	I	D	T	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D
Пикеты	I	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D
Смежные коммуникации	I, T	D	C, D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	T, C	D	D	D	D	D	D	D	O, C
Установки ЭХЗ	I	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	I	D	D	D	D	D	D	D	D
Фуляры	I, T	D	O, C	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	I	D	D	D	D	D	D	D	T, D, C





Рис. 9. Алгоритм обеспечения актуальности пространственной информации об объектах сетей газоснабжения промышленных предприятий на основе построения топологических отношений

#### Список литературы

1. Портал о российском газе [Электронный ресурс]: Некоммерческий проект Аналитической группы ЭРТА. – Режим доступа: <http://gasforum.ru> (дата обращения 01.08.2013).

2. Билл Михан. ГИС: новая энергия электрических и газовых предприятий [Текст] / Билл Михан; пер. с англ. – М.: Дата+, 2010. – 259 с.

3. Павлов А.С. Разработка корпоративной геоинформационной системы газораспределительной организации [Текст] / А.С. Павлов, А.С. Самойлов // Геоинформационные технологии в проектировании и создании корпоративных информационных систем: межвуз. науч. сб. – Уфа: УГАТУ, 2011. – С. 23–29.

4. Павлов А.С. Координация работы пользователей ГИС энергораспределительных организаций с использованием модуля ArcGis Workflow Manager [Текст] / А.С. Павлов, Н.Ф. Кунакужина, С.В. Павлов, А.С. Самойлов // Геоинформационные техноло-

гии в проектировании и создании корпоративных информационных систем: межвуз. науч. сб. – Уфа: УГАТУ, 2013. – С. 26–32.

5. Коцаб М. Интеграция картографических данных в единую информационную систему [Текст] / М. Коцаб, К. Радей // Межведомственный научно-технический сборник. Геодезия, картография и аэрофотосъемки. – 2013. – № 78. – С. 127–131.

6. ESRI [Электронный ресурс]: справочная система / ESRI, Inc. – Режим доступа: <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html> (дата обращения 01.08.2013).

7. Павлов А.С. Организация обработки пространственных данных в распределенной геоинформационной системе газораспределительной организации [Текст] / А.С. Павлов, С.В. Павлов, А.С. Самойлов // Геоинформационные технологии в проектировании и создании корпоративных информационных систем: межвуз. науч. сб. – Уфа: УГАТУ, 2012. – С. 57–62.

8. *Eliseo Clementini*. An object calculus for geographic databases [Text] / Clementini Eliseo, Di Felice Paolino // In A CM Symposium on Applied Computing. – Indianapolis, February 1993. – P. 302–308.

9. *John L. Kelley*. General Topology [Text] / John L. Kelley. – Springer-Verlag, New York, 1955.

10. *Egenhofer, J.M. & Sharma*. Topological relations between regions in  $R^2$  and  $Z^2$  [Text] / Egenhofer, J.M. & Sharma; In Abel, D. & Ooi, B. C. (eds.) // Proceedings of the of the 3rd International Symposium on Large Spatial databases (SSD\* 93). Lecture Notes in Computer Science. – Springer-Verlag. – Vol. 692. – P. 316–336.

#### References

1. *Portal o rossijskom gaze*. [Elektronnyj resurs]: Nekommercheskij proekt Analiticheskoj grupy JeRTA. – Rezhim dostupa: <http://gasforum.ru> (data obrashhenija 01.08.2013).

2. *Bill Mihan*. GIS: novaja jenergija jelektricheskikh i gazovyh predpriyatij [Tekst] / Bill Mihan; per. s angl. – M.: Data+, 2010. – 259 s.

3. *Pavlov A.S.* Razrabotka korporativnoj geoinformacionnoj sistemy gazoraspredelitel'noj organizacii [Tekst] / A.S. Pavlov, A.S. Samojlov // Geoinformacionnye tehnologii v proektirovanii i sozdanii korporativnyh informacionnyh sistem: mezhvuz. nauch. sb. – Ufa: UGATU, 2011. – S. 23–29.

4. *Pavlov A.S.* Koordinacija raboty pol'zovatelej GIS jenergoraspredel'ajushhih organizacij s ispol'zovaniem modulja ArcGis Workflow Manager [Tekst] / A.S. Pavlov, N.F. Kunakkuzhina, S.V. Pavlov, A.S. Samojlov // Geoinformacionnye tehnologii v proektirovanii

i sozdanii korporativnyh informacionnyh sistem: mezhvuz. nauch. sb. – Ufa: UGATU, 2013. – S. 26–32.

5. *Kocab M.* Integracija kartograficheskikh dannyh v edinuju informacionnuju sistemu [Tekst] / M. Kocab, K. Radej // Mezhvedomstvennyj nauchno-tehnicheskij sbornik. Geodezija, kartografija i ajerofotos'emki. – 2013. – № 78. – S. 127–131.

6. *ESRI* [Elektronnyj resurs]: spravocnaja sistema / ESRI, Inc. – Rezhim dostupa: <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html> (data obrashhenija 01.08.2013).

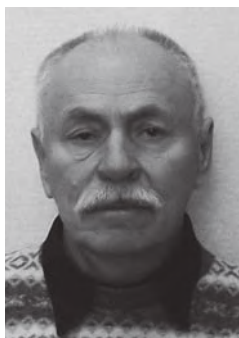
7. *Pavlov A.S.* Organizacija obrabotki prostranstvennyh dannyh v raspredelennoj geoinformacionnoj sisteme gazoraspredelitel'noj organizacii [Tekst] / A.S. Pavlov, S.V. Pavlov, A.S. Samojlov // Geoinformacionnye tehnologii v proektirovanii i sozdanii korporativnyh informacionnyh sistem: mezhvuz. nauch. sb. – Ufa: UGATU, 2012. – S. 57–62.

8. *Eliseo Clementini*. An object calculus for geographic databases [Text] / Clementini Eliseo, Di Felice Paolino // In A CM Symposium on Applied Computing. – Indianapolis, February 1993. – P. 302–308.

9. *John L. Kelley*. General Topology [Text] / John L. Kelley. – Springer-Verlag, New York, 1955.

10. *Egenhofer, J.M. & Sharma* Topological relations between regions in  $R^2$  and  $Z^2$  [Text] / Egenhofer, J.M. & Sharma; In Abel, D. & Ooi, V. C. (eds.) // Proceedings of the of the 3rd International Symposium on Large Spatial databases (SSD\* 93). Lecture Notes in Computer Science. – Springer-Verlag. – Vol. 692. – P. 316–336.

# МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES



**Сироткин С.Л.**  
**Sirotkin S.L.**

*кандидат технических наук,  
ведущий инженер-конструктор  
Научно-конструкторского бюро моделирующих  
и управляющих систем,  
ФГАОУ ВПО «Южный федеральный универси-  
тет», Россия, г. Таганрог*



**Коньков А.Н.**  
**Konkov A.N.**

*начальник сектора  
Научно-конструкторского бюро  
моделирующих и управляющих систем,  
ФГАОУ ВПО «Южный федеральный универси-  
тет», Россия, г. Таганрог*

УДК 681.325.(088.8)

## МЕТОДЫ НЕПРЕРЫВНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ОТ ЧАСТОТНЫХ ДАТЧИКОВ

Статья относится к области обработки сигналов от частотных датчиков. Рассматриваются предложенные методы непрерывной обработки частотных сигналов. Обработке подвергаются различные параметры средней частоты импульсов, такие как частота, скорость изменения частоты, ускорение изменения частоты, средний период частоты, скорость изменения периода, разность или сумма двух частот, разность периодов двух частот, отношение двух частот. На все описанные методы обработки сигналов получены авторские свидетельства СССР. Все описанные методы построены на основе использования дискретных линий задержки (регистров сдвига) с большим числом разрядов и реверсивных счетчиков. Средняя входная частота импульсов поступает на суммирующий вход реверсивного счетчика, и эта же частота, прошедшая через линию задержки, поступает на вычитающий вход реверсивного счетчика, показания которого прямо пропорциональны средней входной частоте импульсов. Реализация линий задержки с большим числом разрядов предлагается на основе использования программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). ПЛИС имеют высокое быстродействие и большое количество ячеек, позволяющих организовать регистры сдвига большой длины. В качестве примера применения предложенных методов непрерывной обработки частотных сигналов рассматривается схема стабилизации суммарной частоты дифференциального струнного датчика, построенная на основе использования устройства непрерывного преобразования в код суммы и разности двух частот. Рекомендуется к использованию в измерительных устройствах, системах обработки информации от частотных датчиков, системах управления, системах стабилизации частоты и ее производных.

*Ключевые слова:* частотный датчик, реверсивный счетчик, частота импульсов, скорость изменения частоты, ускорение изменения частоты, разность частот, период, скорость изменения периода, разность периодов, дискретная линия задержки, регистр сдвига.

## THE METHODS CONTINUOUS WORKING OF INFORMATION FROM FREQUENCY SENSORS

Entry apply to area of procession from frequency sensors. Consider offered methods of continuous working frequency signals. Different parameters procession different parameters of overage frequency impulses: frequency, rate of change frequency, acceleration rate of change frequency, period, rate of change period, difference or sum of frequencies, production of frequencies. In all attached had take out a certificate of authorship of USSR. All attached method of working make of basis using discrete line of delay (shift register) with big number of discharge and reversible counter. Average input frequency of impulses enters in summing input of reversible counter and this frequency, passing through line of delay enters in subtracting input of reversible counter, registration which is directly proportional of overage input frequency of impulses. Realization of line of delay with big number of discharge propose on basis programmable logical integral scheme (PLIS). PLIS has fast response and big amount of cells, admitting to organize shift registers of big length. As a case in point application offered of methods continuous working of frequency signals consider circuit for stabilization summing frequency of differential stringed sensor, building on basis using device continuous transformation in code of sum and difference of second frequencies. Recommend to use in measuring devices, system of processing information from frequency sensors, systems direction, systems of stabilization and her derivative.

*Key words:* frequency sensor, overage frequency of impulses, reversible counter, rate of change frequency, acceleration rate of change frequency, difference of frequencies, period, rate of change period, difference of periods, discrete line of delay, shift register.

Задача обработки информации от частотных датчиков является актуальной, т. к. существует множество устройств и приборов, оснащенных частотными датчиками, у которых информационным параметром является средняя частота импульсов и ее производные.

В настоящей статье приводится обзор предложенных методов непрерывной обработки сигналов от частотных датчиков.

В 1964 году Бруфманом С.С. был запатентован способ измерения частоты [1]. Описание этого способа опубликовано в [2] в 1970 г. Суть способа поясняется рисунком 1.

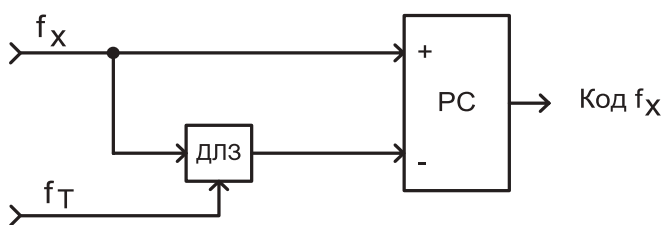


Рис. 1. Способ измерения частоты

Входная частота импульсов  $f_x$  поступает на суммирующий вход реверсивного счетчика (РС), и эта же частота  $f_x$ , задержанная на дискретной линии задержки (ДЛЗ), поступает на вычитающий вход РС. Пока входная частота заполняет ДЛЗ, РС осуществляет подсчет этих импульсов. Когда импуль-

сы с выхода ДЛЗ начнут поступать на вычитающий вход РС, его показания перестанут изменяться и будут прямо пропорциональны средней входной частоте  $f_x$ . Если средняя входная частота  $f_x$  будет увеличиваться, показания РС будут увеличиваться, если уменьшаться – будут уменьшаться. То есть с помощью РС непрерывно определяется значение средней входной частоты импульсов  $f_x$ .

Ранее данный способ широко не использовался, т. к. для точного преобразования частоты в код необходимо обеспечить большой измерительный интервал, т. е. большое время задержки. При реализации линии задержки на основе регистра сдвига для обеспечения необходимой точности преобразования требуется большое количество разрядов регистра сдвига и его высокое быстродействие. В настоящее время указанные недостатки незначительны, если использовать высокоскоростные перепрограммируемые логические интегральные схемы (ПЛИС).

В описанной схеме преобразования частоты импульсов в код при случайном совпадении импульсов на счетных входах РС может возникать потеря информации и, соответственно, будет увеличиваться погрешность преобразования. Для устранения данного недостатка во всех описанных ниже схемах должен применяться принцип рассинхронизации импульсов на счетных входах РС по схеме, приведенной на рисунке 2.

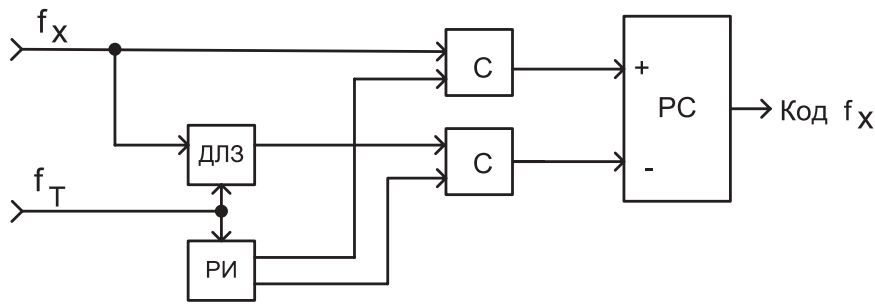


Рис. 2. Пример рассинхронизации импульсов на счетных входах РС

Рассинхронизация импульсов на входах РС осуществляется с помощью синхронизаторов (С), управляемых импульсами с выходов распределителя импульсов (РИ), вырабатывающего сдвинутые по времени серии импульсов.

На основе описанного способа измерения частоты предложено устройство непрерывного преобразования в код разности частот [3], функциональная схема которого приведена на рисунке 3.

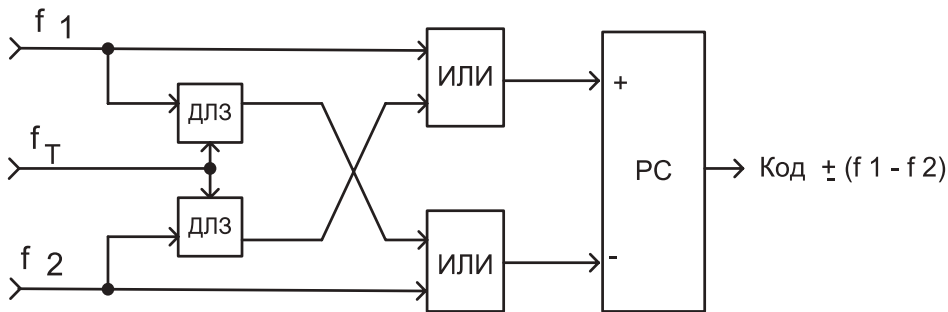


Рис. 3. Преобразование разности частот в код

В данной схеме, как и во всех описываемых ниже схемах, синхронизаторы условно не показаны. Схема работает следующим образом. Тактовая частота  $f_T$  поступает на тактовые входы ДЛЗ, являющиеся регистрами сдвига, и осуществляет формирование времени задержки, которое складывается из числа разрядов регистра сдвига, умноженного на период тактовой частоты  $f_T$ .

Первая входная частота  $f_1$  непрерывно преобразуется в код по способу [1], и одновременно с этим вторая входная частота  $f_2$  также непрерывно пре-

образуется в код, но в отличие от  $f_1$  незадержанная частота  $f_2$  поступает на вычитающий вход РС, а задержанная частота  $f_2$  поступает на суммирующий вход РС. Таким образом, на РС осуществляется непрерывное преобразование в код разности частот. Для определения знака разности необходимо выбирать модифицированный дополнительный код.

На рисунке 4 приведена функциональная схема преобразования в код скорости изменения частоты [4].

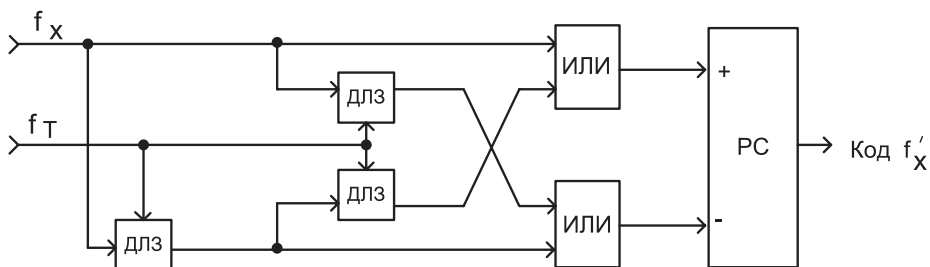


Рис. 4. Преобразование скорости изменения частоты в код

Принцип работы схемы следующий. Входная частота  $f_x$  задерживается, и по известной схеме [3] осуществляется непрерывное преобразование в код

разности незадержанной и задержанной входной частоты  $f_x$ . Эта разность непрерывно показывает, насколько изменяется входная частота за время за-

держки, т. е. какова скорость изменения частоты.

На рисунке 5 приведена функциональная схема преобразования в код ускорения изменения частоты [5].

Преобразование ускорения изменения частоты  $f_x$  в код осуществляется следующим образом. Ускорение изменения частоты зависит от того, насколько изменится скорость изменения частоты за определенный интервал времени. Для этого на суммирование подаются импульсы, соответствующие

не задержанной скорости изменения частоты, и на вычитание – импульсы, соответствующие задержанной скорости изменения частоты.

При обработке сигналов от частотных датчиков бывает удобнее непрерывно преобразовывать в код не частоту, а период входной частоты и его производных.

На рисунке 6 представлена функциональная схема непрерывного преобразования в код периода входной частоты  $T_x$  [6].

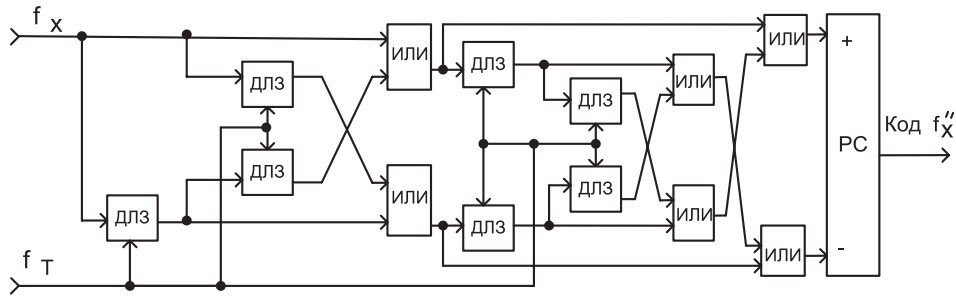


Рис. 5. Преобразование ускорения изменения частоты в код

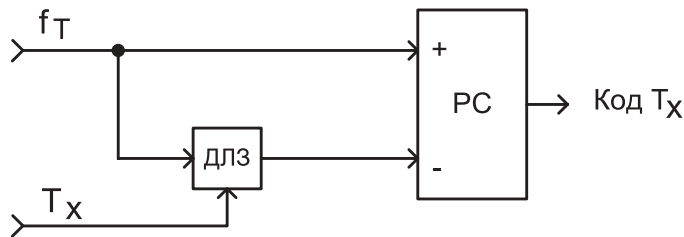


Рис. 6. Преобразование периода в код

Отличается данный метод от известного способа измерения частоты [1] тем, что импульсы измеряемого периода  $T_x$  подаются на сдвиговой вход ДЛЗ, на информационный вход которой подается постоянная тактовая частота с периодом  $f_T$ . При увеличении периода  $T_x$  импульсов входной частоты

увеличивается время задержки в ДЛЗ и соответственно увеличивается код в РС, т. е. код РС прямо пропорционален периоду  $T_x$  входной частоты.

На рисунке 7 приведена функциональная схема преобразования в код разности периодов двух частот [7].

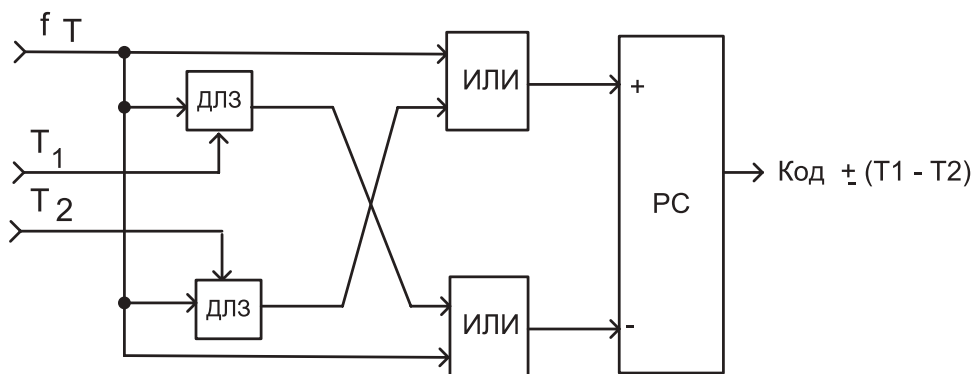


Рис. 7. Преобразование разности периодов в код

Преобразование в код разности периодов осуществляется аналогично способу преобразования в код разности частоты [3], только входные периоды  $T_1$  и  $T_2$  подаются на сдвиговые входы ДЛЗ, а тактовая частота  $f_T$  подается на информационные входы ДЛЗ. Для фиксирования знака разности периодов

должен выбираться модифицированный дополнительный код.

На рисунке 8 приведена функциональная схема преобразования в код скорости изменения периода [8].

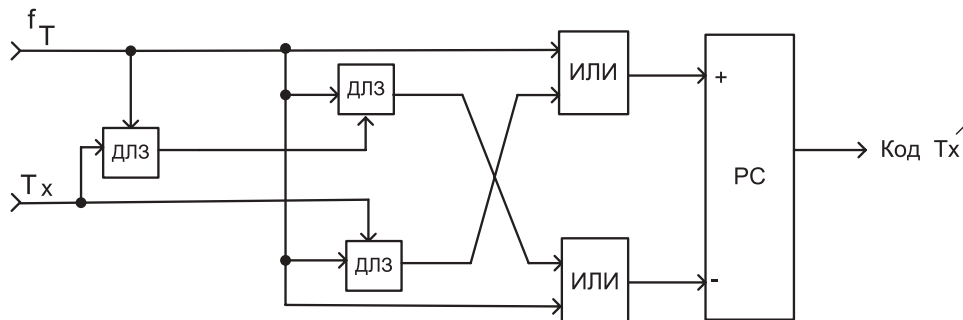


Рис. 8. Преобразование скорости изменения периода в код

Преобразователь работает следующим образом. Импульсы периода  $T_x$  входной частоты задерживаются на ДЛЗ, и по известной схеме [6] осуществляется преобразование в код разности импульсов не задержанного и задержанного периода

$T_x$ , т. е. непрерывное преобразование в код скорости изменения периода  $T_x$ .

На рисунке 9 приведена функциональная схема преобразования в код суммы частот [9].

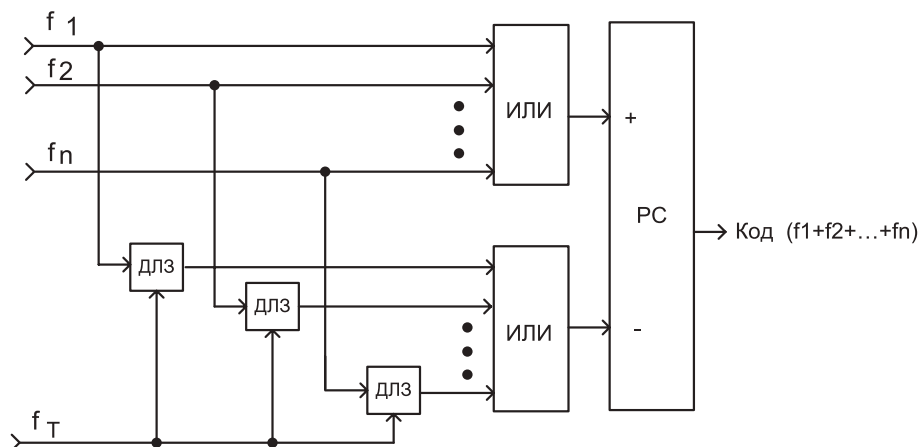


Рис. 9. Преобразование суммы частот в код

Преобразователь работает следующим образом. По известной схеме [1] каждая из суммируемых частот  $f_1, f_2, \dots, f_n$  с помощью РС и индивидуальной ДЛЗ преобразуется в код, а на РС осуществляется непрерывное формирование кода суммы частот.

двух частот. Для формирования знака разности в РС следует выбирать модифицированный дополнительный код.

На рисунке 10 приведена функциональная схема преобразования в код разности скоростей изменения двух частот [10].

На рисунке 11 приведена функциональная схема непрерывного преобразования в код отношения двух частот [11].

Преобразователь работает следующим образом. По известной схеме [4] осуществляется формирование сигналов для получения скорости изменения частот  $f_1$  и  $f_2$ , и на РС происходит вычитание скоростей изменения двух частот и непрерывное формирование кода разности скоростей изменения

Преобразователь работает следующим образом. Одна частота  $f_1$  поступает на суммирующий вход РС и через ДЛЗ – на вычитающий вход РС. Вторая частота  $f_2$  поступает на управляющий вход ДЛЗ. При увеличении частоты  $f_1$  показания РС увеличиваются. При увеличении частоты  $f_2$  за счет уменьшения времени задержки ДЛЗ показания РС уменьшаются. Поэтому результирующие показа-

ния РС прямо пропорциональны отношению двух частот, и процесс преобразования идет непрерывно.

Примером применения метода обработки сигналов от частотных датчиков является устройство для стабилизации суммарной частоты дифференциального струнного датчика (ДСД) [12]. Функциональная схема устройства стабилизации суммарной частоты ДСД приведена на рисунке 12.

Струнные датчики используются для выработки сигналов, пропорциональных ускорению, причем это ускорение прямо пропорционально сумме частот двух струн датчика, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Поэтому для более точной работы струнного датчика необходима стабилизация суммарной частоты его струн.

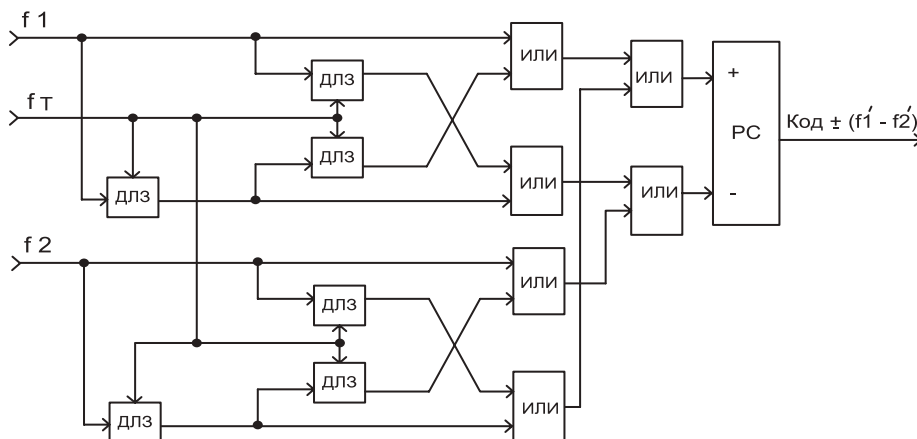


Рис. 10. Преобразование в код разности скоростей изменения двух частот

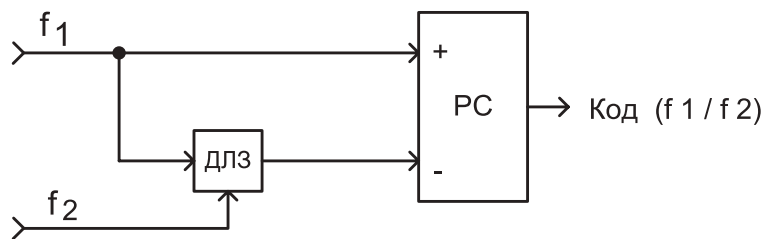


Рис. 11. Преобразование отношения двух частот в код

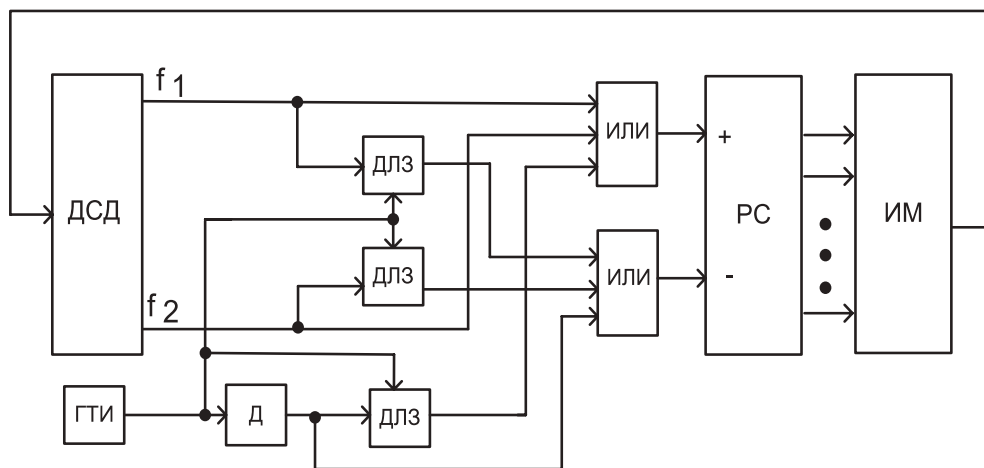


Рис. 12. Функциональная схема стабилизации суммарной частоты ДСД

Устройство стабилизации работает следующим образом. Обе частоты с выхода дифференциального струнного датчика (ДСД)  $f_1$  и  $f_2$  поступают через элемент ИЛИ на суммирующий вход РС, и

эти же две частоты, задержанные на ДЛЗ, поступают на вычитающий вход РС [9]. Одновременно с этим эталонная частота от генератора тактовых импульсов (ГТИ), к величине которой должна под-



страиваться суммарная частота ДСД, поступает на вычитающий вход РС, и эта же эталонная частота, задержанная на ДЛЗ, поступает на суммирующий вход РС. Эталонная частота формируется ГТИ и делителем частоты (Д). На РС непрерывно формируется код, пропорциональный суммарной частоте струн ДСД за вычетом эталонной частоты. При равенстве суммарной частоты струн ДСД и эталонной частоты код на выходе РС близок к нулю, и управляющий ток на выходе исполнительного механизма (ИМ) имеет среднее значение. При увеличении суммарной частоты струн ДСД увеличивается разность суммарной и эталонной частот, код этой разности со знаком плюс с РС поступает на управляющий вход ИМ, который вырабатывает тем больший ток, чем больше разность суммарной и эталонной частот. Чем больше ток от ИМ, тем больше длина струн ДСД и тем меньше их суммарная частота. При уменьшении суммарной частоты ДСД увеличивается отрицательная разность суммарной и эталонной частот, эта разность в виде кода со знаком минус РС поступает на управляющий вход ИМ, который вырабатывает тем меньший ток, чем больше отрицательная разность суммарной и эталонной частот. При уменьшении тока от ИМ длина струн в ДСД уменьшается, а частота их колебаний увеличивается. Таким образом, осуществляется стабилизация суммарной частоты ДСД.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Описанные методы обработки сигналов от частотных датчиков защищены авторскими свидетельствами СССР. Функциональные схемы описанных методов входят в состав функциональных схем известных устройств в качестве дополнительных режимов работы. Поэтому не требуется полное описание методов работы известных устройств, в состав которых входят в виде составных частей устройства, реализующие предложенные методы.

2. Реализация и применение предложенных методов непрерывной обработки сигналов от частотных датчиков в настоящее время намного упрощаются за счет возможности построения ДЛЗ на сдвиговых регистрах с большим временем задержки при большом числе разрядов. Регистры сдвига с большим числом разрядов легко реализуются на ПЛИС, что дает возможность обеспечить высокую точность преобразования.

3. Описанные преобразователи могут использоваться для более точной непрерывной обработки сигналов от частотных датчиков, где важно не только само непрерывное значение частоты датчика, но и непрерывное значение скорости измене-

ния частоты и ее ускорение.

4. Возможно дальнейшее расширение данного направления по непрерывной обработке сигналов от частотных датчиков. С помощью аналогичного принципа преобразования можно, например, непрерывно определять производные более высокого порядка частоты, разности фаз и периода.

#### Список литературы

1. Авторское свидетельство СССР № 161417, Н03К 13/20. Способ измерения частоты [Текст] / С.С. Бруфман. – БИ № 7. – 1964.
2. Новицкий П.В. Цифровые приборы с частотными датчиками [Текст] / П.В. Новицкий, Е.Г. Кнорринг, В.С. Гутников. – Л.: Энергия, 1970. – С. 230.
3. Авторское свидетельство СССР № 1112551, Н03К 13/20. Преобразователь частоты в код [Текст] / С.Л. Сироткин, В.В. Клименко, В.А. Гаманко, Н.Д. Леонидов. – БИ № 33. – 1984.
4. Авторское свидетельство СССР № 1251329, кл. Н03М 1/60. Преобразователь частоты импульсов в код [Текст] / С.Л. Сироткин, А.Н. Коньков, В.В. Клименко. – БИ № 30. – 1986.
5. Авторское свидетельство СССР № 1410276, Н03М 1/60. Преобразователь частота – код [Текст] / С.Л. Сироткин, А.Н. Коньков, В.В. Клименко, П.Б. Галунов. – БИ № 26. – 1988.
6. Авторское свидетельство СССР № 1229959, кл. Н03М 1/60. Преобразователь частота – код [Текст] / С.Л. Сироткин, А.Н. Коньков, В.В. Клименко, П.Б. Галунов. – БИ № 17. – 1986.
7. Авторское свидетельство СССР № 1418906, Н03М 1/60. Преобразователь частоты в код [Текст] / С.Л. Сироткин, А.Н. Коньков, В.В. Клименко, А.В. Бойченко. – БИ № 21. – 1988.
8. Авторское свидетельство СССР № 1411975, Н03М 1/60. Преобразователь частоты в код [Текст] / С.Л. Сироткин, А.Н. Коньков, В.В. Клименко, А.В. Бойченко. – БИ № 27. – 1988.
9. Авторское свидетельство СССР № 1179545, кл. Н03М 5/10. Преобразователь частоты в код [Текст] / С.Л. Сироткин, В.В. Клименко, В.А. Гаманко, А.Н. Коньков. – БИ № 34. – 1985.
10. Авторское свидетельство СССР № 1330760, Н03М 1/60 Преобразователь частота – код [Текст] / С.Л. Сироткин, А.Н. Коньков, В.В. Клименко, А.В. Бойченко. – БИ № 30. – 1987.
11. Авторское свидетельство СССР № 1305857, Н03М 1/60 Преобразователь частоты в код [Текст] / С.Л. Сироткин, А.Н. Коньков, Ю.А. Куликов, В.В. Клименко. – БИ № 15. – 1987.
12. Авторское свидетельство СССР № 1398101, Н03М 5/10. Преобразователь двух частот в код

[Текст] / С.Л. Сироткин, В.В. Клименко, А.Н. Коньков, А.С. Державин. – БИ № 19. – 1988.

*References*

1. *Avtorskoe* svidetel'stvo SSSR № 161417, N03K 13/20. Sposob izmerenija chastoty [Tekst] / S.S. Brufman. – БИ № 7. – 1964.
2. *Novickij P.V.* Cifrovye pribory s chastotnymi datchikami [Tekst] / P.V. Novickij, E.G. Knorring, V.S. Gutnikov. – L.: Jenergija, 1970. – S. 230.
3. *Avtorskoe* svidetel'stvo SSSR № 1112551, N03K 13/20. Preobrazovatel' chastoty v kod [Tekst] / S.L. Sirotkin, V.V. Klimenko, V.A. Gamanko, N.D. Leonidov. – БИ № 33. – 1984.
4. *Avtorskoe* svidetel'stvo SSSR № 1251329, kl. N03M 1/60. Preobrazovatel' chastoty impul'sov v kod [Tekst] / S.L. Sirotkin, A.N. Kon'kov, V.V. Klimenko. – БИ № 30. – 1986.
5. *Avtorskoe* svidetel'stvo SSSR № 1410276, N03M 1/60. Preobrazovatel' chastota – kod [Tekst] / S.L. Sirotkin, A.N. Kon'kov, V.V. Klimenko, P.B. Galunov. – БИ № 26. – 1988.
6. *Avtorskoe* svidetel'stvo SSSR № 1229959, kl. N03M 1/60. Preobrazovatel' chastota – kod [Tekst] / S.L. Sirotkin, A.N. Kon'kov, V.V. Klimenko, P.B. Galunov. – БИ № 17. – 1986.
7. *Avtorskoe* svidetel'stvo SSSR № 1418906, N03M 1/60. Preobrazovatel' chastoty v kod [Tekst] / S.L. Sirotkin, A.N. Kon'kov, V.V. Klimenko, A.V. Bojchenko. – БИ № 21. – 1988.
8. *Avtorskoe* svidetel'stvo SSSR № 1411975, N03M 1/60. Preobrazovatel' chastoty v kod [Tekst] / S.L. Sirotkin, A.N. Kon'kov, V.V. Klimenko, A.V. Bojchenko. – БИ № 27. – 1988.
9. *Avtorskoe* svidetel'stvo SSSR № 1179545, kl. N03M 5/10. Preobrazovatel' chastoty v kod [Tekst] / S.L. Sirotkin, V.V. Klimenko, V.A. Gamanko, A.N. Kon'kov. – БИ № 34. – 1985.
10. *Avtorskoe* svidetel'stvo SSSR № 1330760, N03M 1/60. Preobrazovatel' chastota-kod [Tekst] / S.L. Sirotkin, A.N. Kon'kov, V.V. Klimenko, A.V. Bojchenko. – БИ № 30. – 1987.
11. *Avtorskoe* svidetel'stvo SSSR № 1305857, N03M 1/60. Preobrazovatel' chastoty v kod [Tekst] / S.L. Sirotkin, A.N. Kon'kov, Ju.A. Kulikov, V.V. Klimenko. – БИ № 15. – 1987.
12. *Avtorskoe* svidetel'stvo SSSR № 1398101, N03M 5/10. Preobrazovatel' dvuh chastot v kod [Tekst] / S.L. Sirotkin, V.V. Klimenko, A.N. Kon'kov, A.S. Derzhavin. – БИ № 19. – 1988.



**Евстафьев А.И.**  
**Evstafjev A.I.**

*аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника»  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный  
авиационный технический университет»,  
Россия, г. Уфа*



**Ураксеев М.А.**  
**Urakseev M.A.**

*доктор технических наук, профессор кафедры  
«Информационно-измерительная техника»  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный  
авиационный технический университет»,  
Россия, г. Уфа*

УДК 535-4

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЦ ДЖОНСА ДЛЯ ОПИСАНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА В МАГНИТООПТИЧЕСКОМ ДАТЧИКЕ ТОКА**

В статье рассматривается применение матричного метода Джонса для описания различных состояний поляризации волны света и определения ее результирующей интенсивности при прохождении

оптической системы. Приводятся основные понятия матричного метода Джонса – вектор и матрица Джонса. Показываются матрицы Джонса, описывающие свойства различных оптических элементов: линейного поляризатора с различной ориентацией осей пропускания, полуволновой пластинки, четвертьволновой пластинки, магнитооптического чувствительного элемента. Данные оптические элементы широко используются при проектировании и разработке магнитооптических датчиков тока. Показываются структурные схемы различных магнитооптических датчиков тока с расшифровкой элементов, входящих в их состав. Описывается принцип действия наиболее часто используемого однопроходного магнитооптического датчика тока. Приводятся векторы Джонса, характеризующие поляризацию света на выходах магнитооптических датчиков тока различных видов: однопроходного магнитооптического датчика тока, многопроходного магнитооптического датчика тока с чувствительным элементом в виде магнитооптического кристалла с линейным и круговым двулучепреломлениями, магнитооптического датчика тока с обратным отражением на основе оптоволоконка.

*Ключевые слова:* матрица Джонса, эффект Фарадея, магнитооптический датчик тока, поляризация света, вектор Джонса, анализатор, поляризатор, чувствительность, оптоволоконно, интенсивность света.

## APPLICATION OF THE JONES MATRICES FOR DESCRIBING POLARIZATION STATE OF LIGHT IN MAGNETO-OPTICAL CURRENT SENSOR

The application of Jones matrix method to describe the various states of polarization of light waves and determine its resulting intensity when the light passes through the optical system is considered in this article. The basic concepts of Jones matrix method – Jones vector and Jones matrix are described. Jones matrices describing the properties of various optical elements are shown. There are: linear polarizer with different orientations of transmission axes, half-wave plate, quarter-wave plate, magneto-optical sensitive element. These optical elements are widely used in the design and development of magneto-optic current sensors. The structural schemes of various magneto-optic current sensors with description of its elements are shown. The principle of operation of the most commonly used single-pass magneto-optical current sensor is described. Jones vectors characterizing the polarization of light at the output of different magneto-optical sensors are given. There are: single-pass magneto-optical current sensor, magneto-optical multi-pass current sensor with a sensing element in form of magneto-optical crystal with linear and circular birefringence, fiber magneto-optical current sensor with reverse reflection.

*Key words:* Jones matrix, Faraday effect, magneto-optical current sensor, polarization of light, Jones vector, analyzer, polarizer, sensitivity, optical fiber, intensity of light.

В последнее время все больший интерес вызывает возможность использования оптических систем для сбора, обработки и передачи информации.

Для измерения электрических токов и магнитных полей перспективной является разработка магнитооптических датчиков, действие которых основано на продольном магнитооптическом (МО) эффекте Фарадея. В таких датчиках изменение измеряемой величины вызывает изменение поляризации световой волны в структуре датчика [3].

Известно [1, 2], что волна света представляет собой электромагнитную волну, характеризующуюся

векторными величинами:  $\vec{E}$  – напряженностью электрического поля;  $\vec{H}$  – напряженностью магнитного поля;  $\vec{c}$  – скоростью распространения. Эти векторы взаимно перпендикулярны и образуют правовинтовую систему. Для определения состояния поляризации световых волн используется вектор напряженности электрического поля. Если предположить, что свет распространяется в направлении оси  $z$ , то вектор напряженности электрического поля будет располагаться в плоскости  $xy$  и состоять из двух компонент:

$$E_x(t) = A_x \cos(\omega t + \varphi_x) = \operatorname{Re}[A_x \exp i(\omega t + \varphi_x)] = \operatorname{Re}[A_x e^{i(\omega t + \varphi_x)}], \quad (1)$$

$$E_y(t) = A_y \cos(\omega t + \varphi_y) = \operatorname{Re}[A_y \exp i(\omega t + \varphi_y)] = \operatorname{Re}[A_y e^{i(\omega t + \varphi_y)}]. \quad (2)$$

Поляризацию световой волны можно достаточно хорошо представить с помощью вектора, введенного Р. Джонсом. В этом представлении вектор

электрического поля плоской монохроматической волны света описывается вектор-столбцом [1], состоящим из компонент  $E_x(t)$ ,  $E_y(t)$ :

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_x e^{i\varphi_x} \\ A_y e^{i\varphi_y} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Вектор Джонса является комплексным и содер-

$$J = E^* \cdot E = \begin{pmatrix} E_x^* & E_y^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_x e^{-i\varphi_x} & A_y e^{-i\varphi_y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_x e^{i\varphi_x} \\ A_y e^{i\varphi_y} \end{pmatrix} = A_x^2 + A_y^2, \quad (4)$$

где  $E^*$  – комплексно сопряженный транспонированный вектор Джонса. Примем фазу колебаний световой волны равной 0 (т. к. рассматривается одна световая волна). Также предположим, что  $E^* \cdot E = 1$  [2]. Тогда, представив  $A_x = \cos\theta$  и  $A_y = \sin\theta$  ( $\theta$  – угол между направлением поляризации и осью  $x$ ), запишем выражение (3) в виде:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \cdot e^{i(\varphi_y - \varphi_x)} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Частные случаи  $\theta = 0, 90^\circ$  соответствуют линейно поляризованным горизонтальной и вертикальной волнам соответственно. Векторы Джонса при этом имеют вид:

$$\vec{E}_H = \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ и } \vec{E}_V = \begin{pmatrix} 0 \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Сумма двух когерентных лучей света представляет собой сумму их соответствующих компонент векторов Джонса [2]. Если  $E_x(t) = E_y(t)$ :

$$\vec{E}_{45^\circ} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_x \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Линейная поляризация под углом в  $45^\circ$  по отношению к оси  $x$  (7).

Световые волны с правой и левой круговой поляризацией (9, 10). Для обоих случаев обе компоненты имеет одинаковую амплитуду  $E_x(t) = E_y(t)$ . В случае правой круговой поляризации фаза  $y$ -компоненты опережает фазу  $x$ -компоненты на  $\frac{\pi}{2}$ . Таким образом, для правой круговой поляризации получим:

$$\vec{E}_R = \begin{pmatrix} E_x e^{i\varphi} \\ E_x e^{i(\varphi - \pi/2)} \end{pmatrix} \quad (8)$$

«Нормализовав» выражение (8), получим:

$$\vec{E}_R = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ e^{i\pi/2} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \quad (9)$$

Для левой круговой поляризации вектор Джонса имеет вид:

$$\vec{E}_L = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \quad (10)$$

Изменение поляризации света при его прохождении через произвольное оптическое устройство запишем в виде:

жит полную информацию об амплитудах и фазах (3), составляющих компонент вектора электрического поля.

Интенсивность волны определяется по формуле:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}_{out} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}_{in} = G \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где  $G$  – матрица Джонса оптического устройства.

Матрицы Джонса некоторых оптических элементов приведены в таблице.

Опишем с помощью матричного метода Джонса МО датчик с однопроходным чувствительным элементом (ЧЭ), представленный на рисунке 1, структура оптических элементов которого приведена на рисунке 2.

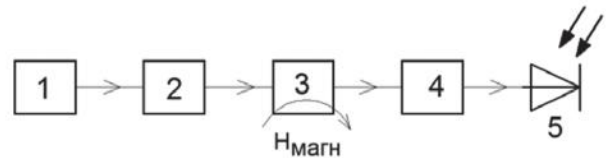


Рис. 1. МО датчик с однопроходным ЧЭ в виде магнитооптической пленки: 1 – источник излучения (лазерный диод); 2 – поляризатор; 3 – ЧЭ в виде магнитооптической пленки, 4 – анализатор; 5 – фотодиод;  $H_{\text{магн}}$  – напряженность магнитного поля

При прохождении линейно поляризованного света от источника излучения 1 через ЧЭ 3, внесенный в магнитное поле напряженностью  $H_m$ , создаваемое измеряемым током, происходит поворот плоскости поляризации луча света на угол фарадеевского вращения  $\Phi$  [4, 5]:

$$\Phi = VLH_m \quad (12)$$

где  $V$  – постоянная Верде;  $L$  – длина пути света в магнитооптическом элементе.

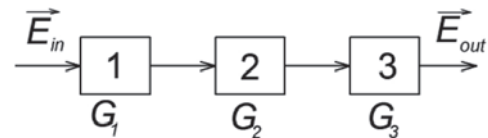


Рис. 2. Структура оптических элементов МО датчика: 1 – линейный поляризатор; 2 – ЧЭ в виде магнитооптической пленки; 3 – анализатор;  $G_{1,3}$  – матрицы Джонса оптических элементов

Вектор Джонса на выходе датчика будет иметь вид:

$$\vec{E}_{out} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}_{out} = G_3 G_2 G_1. \quad (13)$$

Здесь  $G_3$  – матрица Джонса анализатора;  $G_2$  – матрица Джонса магнитооптической пленки;  $G_1$  – матрица Джонса поляризатора.

$$\vec{E}_{out} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}_{out} = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda_0}(n_+ - n_-)\right) & \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda_0}(n_+ - n_-)\right) \\ -\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda_0}(n_+ - n_-)\right) & \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda_0}(n_+ - n_-)\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \end{pmatrix}_{in}, \quad (14)$$

где  $d$  – длина пути света в магнитооптической пленке;  $\lambda_0$  – длина волны света;  $n_{\pm}$  – показатели преломления намагниченного вещества для волн, поляризованных по правому и левому кругу;  $\theta$  – угол между осями пропускания анализатора и поляризатора.

Примем  $\frac{\pi d}{\lambda_0}(n_+ - n_-) = \Phi$ , тогда (14) запишется в виде:

$$\vec{E}_{out} = \begin{pmatrix} \cos^2 \varphi & \sin \varphi \cos \varphi \\ \sin \varphi \cos \varphi & \sin^2 \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Phi & \sin \Phi \\ -\sin \Phi & \cos \Phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \end{pmatrix}_{in} = \begin{pmatrix} \cos^2 \varphi & \sin \varphi \cos \varphi \\ \sin \varphi \cos \varphi & \sin^2 \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \cos \Phi & 0 \\ -E_x \sin \Phi & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x \cos^2 \varphi \cos \Phi - E_x \sin \varphi \cos \varphi \sin \Phi & 0 \\ E_x \sin \varphi \cos \varphi \cos \Phi - E_x \sin^2 \varphi \sin \Phi & 0 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Найдем интенсивность световой волны на выходе анализатора, умножив (16) на комплексно сопряженный транспонированный вектор, следуя правилу (4):

$$J_{вых} = |E_x \cos^2 \varphi \cos \Phi - E_x \sin \varphi \cos \varphi \sin \Phi \quad E_x \sin \varphi \cos \varphi \cos \Phi - E_x \sin^2 \varphi \sin \Phi|^* \\ * \begin{pmatrix} E_x \cos^2 \varphi \cos \Phi - E_x \sin \varphi \cos \varphi \sin \Phi \\ E_x \sin \varphi \cos \varphi \cos \Phi - E_x \sin^2 \varphi \sin \Phi \end{pmatrix} = (E_x \cos^2 \varphi \cos \Phi - E_x \sin \varphi \cos \varphi \sin \Phi)^2 + \\ + (E_x \sin \varphi \cos \varphi \cos \Phi - E_x \sin^2 \varphi \sin \Phi)^2 = (E_x^2 \cos^2 \varphi + E_x^2 \sin^2 \varphi)(\cos^2 \varphi \cos^2 \Phi - \\ - 2 \sin \varphi \cos \varphi \cos \Phi \sin \Phi + \sin^2 \varphi \sin^2 \Phi) = E_x^2 \cos^2(\varphi + \Phi),$$

где  $E_x^2$  – интенсивность  $J_{вх}$ .

Таким образом, интенсивность света на выходе датчика найдена в виде:

$$J_{вых} = J_{вх} \cos^2(\varphi + \Phi). \quad (17)$$

Одним из известных способов повышения чувствительности МО датчиков является увеличение угла Фарадея за счет увеличения оптического пути света  $L$  в ЧЭ при использовании отражательной схемы построения последнего (см. рисунок 3). В этом случае используется явление взаимной компенсации влияния оптической активности за прямой и обратный проходы света в кристалле, что позволяет не учитывать ее влияние и температурный дрейф оптической активности для датчиков с четным числом проходов.

Матрица Джонса магнитооптического кристалла, обладающего линейным и круговым двулучепреломлениями, найдена в виде:

Вектор Джонса, описывающий поляризацию света на выходе датчика, найден в виде (ось поляризатора горизонтальна):

$$\vec{E}_{out} = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Phi & \sin \Phi \\ -\sin \Phi & \cos \Phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \end{pmatrix}_{in}, \quad (15)$$

где  $\varphi$  – угол между осями пропускания анализатора и поляризатора;  $\Phi$  – угол фарадеевского вращения.

Перемножим матрицы Джонса оптических элементов:

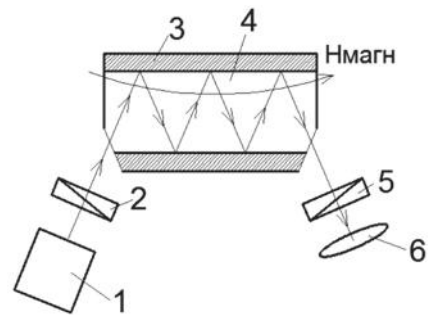


Рис. 3. МО датчик с многопроходным ЧЭ: 1 – источник излучения (лазерный диод); 2 – поляризатор; 3 – диэлектрические зеркала; 4 – магнитооптический кристалл; 5 – анализатор; 6 – фотодиод;  $H_{магн}$  – напряженность магнитного поля

$$G = \begin{pmatrix} \cos(L_n \sqrt{c^2 + b^2}) + i \frac{b}{\sqrt{c^2 + b^2}} \sin(L_n \sqrt{c^2 + b^2}) & \frac{c}{\sqrt{c^2 + b^2}} \sin(L_n \sqrt{c^2 + b^2}) \\ -\frac{c}{\sqrt{c^2 + b^2}} \sin(L_n \sqrt{c^2 + b^2}) & \cos(L_n \sqrt{c^2 + b^2}) - i \frac{b}{\sqrt{c^2 + b^2}} \sin(L_n \sqrt{c^2 + b^2}) \end{pmatrix}, \quad (18)$$

где  $c$  – коэффициент кругового двулучепреломления;  $b$  – коэффициент линейного двулучепреломления;  $L_n$  – длина единичного пробега луча по кристаллу.

Примем угол  $\theta$  между осями поляризатора и ана-

$$\vec{E}_{out} = \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(L_n \sqrt{c^2 + b^2}) + i \frac{b}{\sqrt{c^2 + b^2}} \sin(L_n \sqrt{c^2 + b^2}) & \frac{c}{\sqrt{c^2 + b^2}} \sin(L_n \sqrt{c^2 + b^2}) \\ -\frac{c}{\sqrt{c^2 + b^2}} \sin(L_n \sqrt{c^2 + b^2}) & \cos(L_n \sqrt{c^2 + b^2}) - i \frac{b}{\sqrt{c^2 + b^2}} \sin(L_n \sqrt{c^2 + b^2}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

В последние годы широкое применение оптоволокон не только в качестве линий передачи информации, но и в качестве важной части измерительных систем позволило разработать волоконные магнитооптические датчики с повышенной точностью, температуро-, помехоустойчивостью. В частности, наибольшего внимания заслуживает магнитооптический датчик с обратным отражением [6], структура оптических элементов которого приведена на рисунке 4.

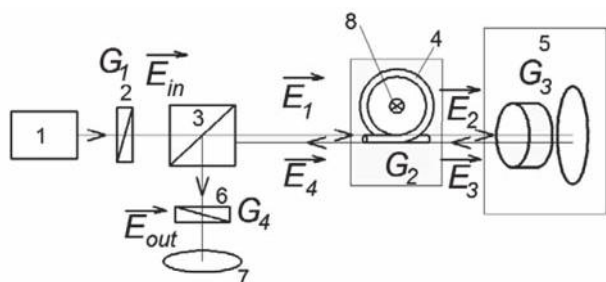


Рис. 4. Структура оптических элементов волоконного МО датчика с обратным отражением:

1 – источник излучения (лазерный диод); 2 – поляризатор; 3 – неполяризационный сплиттер; 4 – катушка оптоволокон; 5 – зеркало Фарадея; 6 – анализатор; 7 – фотодиод; 8 – проводник с током;  $\vec{E}_2$  – вектор Джонса, описывающий

$$\vec{E}_3 = G_3 \vec{E}_2 = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} \cos \rho & \sin \rho \\ -\sin \rho & \cos \rho \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \alpha + j\beta - \gamma \\ \alpha - j\beta + \gamma \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \alpha + j\beta - \gamma \\ \alpha - j\beta + \gamma \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} \alpha - j\beta + \gamma \\ -\alpha - j\beta + \gamma \end{vmatrix}. \quad (22)$$

Вектор Джонса после обратного прохождения оптоволокон:

$$\vec{E}_4 = G_2 \vec{E}_3 = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} \alpha + j\beta & -\gamma \\ \gamma & \alpha - j\beta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \alpha - j\beta + \gamma \\ -\alpha - j\beta + \gamma \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} \alpha^2 + \beta^2 - \gamma^2 + 2\alpha\gamma + j2\beta\gamma \\ \alpha^2 - \beta^2 + \gamma^2 + 2\alpha\gamma - j2\beta\gamma \end{vmatrix}. \quad (23)$$

Поляризация света на выходе датчика (ось пропускания анализатора вертикальная):

$$\vec{E}_{out} = G_4 \vec{E}_4 = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \alpha^2 + \beta^2 - \gamma^2 + 2\alpha\gamma + j2\beta\gamma \\ \alpha^2 - \beta^2 + \gamma^2 + 2\alpha\gamma - j2\beta\gamma \end{vmatrix}. \quad (24)$$

лизатора равным  $45^\circ$  (наибольшая чувствительность датчика). Вектор Джонса, описывающий состояние поляризации света на выходе МО датчика с многопроходным ЧЭ, найден в виде:

поляризацию волны света на выходе оптоволокон;  $\vec{E}_3$  – вектор Джонса, описывающий отраженную волну света на выходе магнитооптического зеркала Фарадея;  $\vec{E}_{out}$  – вектор Джонса, описывающий поляризацию волны света на выходе магнитооптического датчика;  $\vec{E}_{in}$  – вектор Джонса, описывающий поляризацию входной волны света (угол поляризации входной волны принят равным  $45^\circ$ );  $G_{1...4}$  – матрицы Джонса оптических элементов

Вектор Джонса на выходе волоконного МО датчика с обратным отражением имеет вид:

$$\vec{E}_{out} = G_4 G_3 G_2 G_1 \vec{E}_{in}. \quad (20)$$

Вектор Джонса на выходе оптоволокон:

$$\vec{E}_2 = G_2 \vec{E}_{in} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} \alpha + j\beta & -\gamma \\ \gamma & \alpha - j\beta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} \alpha + j\beta - \gamma \\ \alpha - j\beta + \gamma \end{vmatrix}, \quad (21)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – величины, по аналогии с (18) зависящие от: коэффициента кругового двулучепреломления оптоволокон, коэффициента линейного двулучепреломления оптоволокон и длины пробега луча света по оптоволокону.

Вектор Джонса после прохождения зеркала Фарадея:

## Примеры различных матриц Джонса

Оптический элемент	Матрица Джонса
Линейный поляризатор с горизонтальной осью пропускания	$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$
Линейный поляризатор с вертикальной осью пропускания	$\begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$
Линейный поляризатор с осью пропускания под углом в 45°	$\frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}$
Линейный поляризатор с осью пропускания, повернутой на угол $\varphi$	$\begin{vmatrix} \cos^2 \varphi & \sin \varphi \cos \varphi \\ \sin \varphi \cos \varphi & \sin^2 \varphi \end{vmatrix}$
Полуволновая пластинка с быстрой осью, направленной вдоль оси $x$	$\begin{vmatrix} -i & 0 \\ 0 & i \end{vmatrix}$
Четвертьволновая пластинка с быстрой осью, направленной вдоль оси $x$	$e^{i\frac{\pi}{4}} \begin{vmatrix} -i & 0 \\ 0 & i \end{vmatrix}$
Магнитооптический чувствительный элемент с углом вращения $\rho$	$\begin{vmatrix} \cos \rho & \sin \rho \\ -\sin \rho & \cos \rho \end{vmatrix}$

Таким образом, используя матричный метод Джонса, можно найти выражения для определения состояния поляризации и интенсивности света на выходе любого оптического датчика. Анализ составляющих компонент полученных выражений позволяет оценить их влияние на точностные характеристики датчиков.

Показана возможность использования матричного метода для описания формы поляризации выходного света в магнитооптических датчиках различных видов.

## Список литературы

1. Jones R.C. New calculus for the treatment of optical systems [Text] / R.C. Jones / J. Opt. Soc. Am. 31. – 1941. – P. 488–493.
2. Джеррард А. Введение в матричную оптику [Текст] / А. Джеррард, Д.М. Берч. – М.: Мир, 1978. – С. 319–329.
3. Евстафьев А.И. Магнитооптический датчик электрического тока повышенной точности [Текст] / А.И. Евстафьев, М.А. Ураксеев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – № 1. – Т. 9. – С. 84–88.
4. Рандошкин В.В. Прикладная магнитооптика [Текст] / В.В. Рандошкин, А.Я. Червоненкис. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

5. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики [Текст] / Т. Окоси. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

6. Drexler P. Utilization of Faraday Mirror in Fiber Optic Current Sensors [Text] / P. Drexler, P. Flava // Radio engineering. – Vol. 17. – № 4. – 2008. – P. 101–107.

## References

1. Jones R.C. New calculus for the treatment of optical systems [Text] / R.C. Jones / J. Opt. Soc. Am. 31. – 1941. – P. 488–493.
2. Dzherrard A. Vvedenie v matrichnuju optiku [Tekst] / A. Dzherrard, D.M. Berch. – M.: Mir, 1978. – S. 319–329.
3. Evstaf'ev A.I. Magnitoopticheskij datchik jelektricheskogo toka povyshennoj tochnosti [Tekst] / A.I. Evstaf'ev, M.A. Urakseev // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – № 1. – T. 9. – S. 84–88.
4. Randoshkin V.V. Prikladnaja magnitooptika [Tekst] / V.V. Randoshkin, A.Ja. Chervonenkis. – M.: Jenergoatomizdat, 1990. – 320 s.
5. Okosi T. Volokonno-opticheskie datchiki [Tekst] / T. Okosi. – L.: Jenergoatomizdat, 1990. – 256 s.
6. Drexler P. Utilization of Faraday Mirror in Fiber Optic Current Sensors [Text] / P. Drexler, P. Flava // Radio engineering. – Vol. 17.– № 4.– 2008. – P. 101–107.



**Романченко А.Ф.**  
**Romanchenko A.F.**

*доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Сервис транспортных  
систем» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный  
университет экономики и сервиса»,  
Россия, г. Уфа*



**Мухамадиев А.А.**  
**Mukhamadiev A.A.**

*кандидат технических наук, доцент,  
докторант кафедры «Информационно-  
измерительная техника»  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный  
авиационный технический университет»,  
Россия, г. Уфа*

УДК 621.317

## **ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКЕ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА**

В статье рассматривается формирование информационных характеристик первичных преобразователей при комплексной обработке выходного сигнала. Актуальность статьи обусловлена перспективностью коммутационных режимов функционирования первичных преобразователей в системах управления и регулирования, обеспечивающих частотный (импульсный) выходной сигнал с высоким уровнем помехозащищенности. На первичные преобразователи могут воздействовать одновременно несколько входных сигналов, каждый из которых несет определенную информацию, при этом входные воздействия часто имеют различный физический характер, и реакция первичных преобразователей на их воздействие может различаться. Оптимизация характеристик информационной системы первичных преобразователей, при действии нескольких входных воздействий, может быть обеспечена за счет комплексной обработки ряда характеристик выходного импульса с выделением за цикл преобразований информации одновременно обо всех входных воздействиях.

Получена структурная схема преобразования входных воздействий при комплексном воздействии на стационарные и нестационарные характеристики. Рассмотрены четыре режима коммутации энергетического состояния и показаны выходные импульсы первичных преобразователей при различных вариантах коммутации энергетического состояния. Разработана принципиальная схема комплексной обработки выходного сигнала, позволяющая выделить информацию, содержащуюся в каждой составляющей входного воздействия, при этом необходимо учесть, что происходит двухканальное преобразование информации.

Комплексная обработка характеристик выходного импульса, при коммутационном режиме функционирования, обеспечивает повышение пропускной способности информационной системы на базе формирования многоканального преобразования одновременно нескольких входных воздействий.

*Ключевые слова:* сигнал, первичный преобразователь, преобразование, коммутация, помехи, энергетическое состояние.

## **FORMATION OF INFORMATION CHARACTERISTICS OF PRIMARY CONVERTERS FOR COMPLEX OUTPUT SIGNAL PROCESSING**

The article deals with the formation of the information characteristics of primary converters in integrated processing of the output signal. Relevance of articles due to the prospect of switching modes of operation of the



primary converters in systems and control, providing a frequency (pulse) output signal with high noise immunity. On the primary converters may affect multiple input signals, each of which carries a certain information, wherein the input effects often have different physical nature, and the reaction of the primary converters of their effects may vary. Optimizing the characteristics of the information system of converters under the influence of several input actions can be achieved through a comprehensive treatment of a number of characteristics of the output pulse with the release of, for a series of transformations, the information at the same time on all inputs.

Received a block diagram of the conversion of input effects on the combined action of stationary and non-stationary characteristics. Considered four modes of switching energy state and shows the output pulses of primary converters in different types of switching energy state. A principal scheme of the complex output signal processor allows you to select the information contained in each component of the input exposure when it is necessary to take into account what is going on a two-channel conversion information.

Complete machining characteristics of the output pulse at the switching mode of operation, provides increased bandwidth information system based on generating a multi-conversion at the same time multiple input actions.

*Key words:* signal, the transducer, conversion, commutation, noise, energy state.

При использовании первичных преобразователей (ПП) в системах управления и регулирования перспективными являются коммутационные режимы их функционирования [1, 2], обеспечивающие частотный (импульсный) выходной сигнал с возможностью обеспечения высокого уровня помехозащищенности [3].

В процессе эксплуатации на информационную систему ПП могут воздействовать одновременно несколько входных сигналов, каждый из которых несет полезную информацию для потребителя.

Причем данные входные воздействия часто имеют различный физический характер и реакция ПП на их воздействие может различаться.

Оптимизация характеристик информационной системы ПП, при действии нескольких входных воздействий, может быть обеспечена за счет комплексной обработки ряда характеристик выходного импульса с выделением за цикл преобразований информации одновременно о всех входных воздействиях.

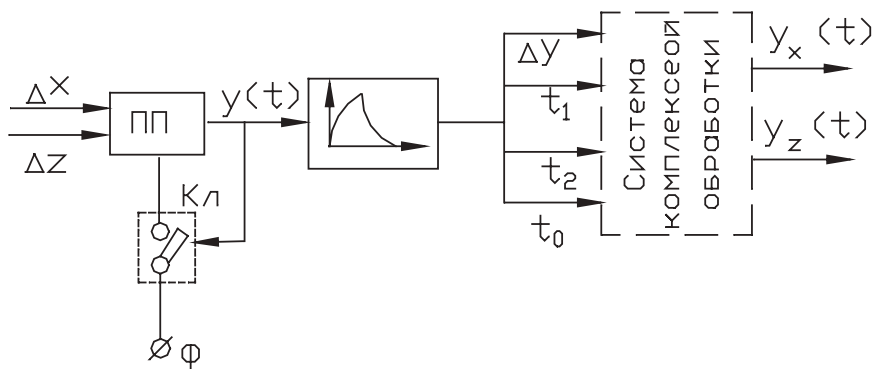


Рис. 1. Структурная схема преобразования двух разнородных по физической природе входных воздействий при комплексной обработке выходного сигнала

Широко распространен случай, когда на вход информационной системы ПП одновременно воздействуют (см. рис. 1) два входных контролируемых сигнала  $\Delta x$  и  $\Delta z$ , имеющие различную физическую природу. В процессе преобразования информационной системой данные входные воздействия участвуют в формировании выходного импульса изменения энергетического состояния информационной системы ПП (с использованием ключа «Кл») и, следовательно, влияют на контролируемые характеристики выходного импульса. Причем вследствие

различий в физическом характере воздействий  $\Delta x$  и  $\Delta z$ , что приводит к физическим особенностям их преобразования ПП, влияние их на соответствующие характеристики выходного импульса будет различным.

При преобразовании входных сигналов на выходе системы комплексной обработки (рис. 1) выходных сигналов  $\Delta y, t_1, t_2, t_0$  ПП необходимо иметь данные об изменении входных сигналов  $\Delta x$  и  $\Delta z$  за один цикл преобразования (длительность  $t_0$  выходного импульса).

Функционирование информационной системы ПП может быть организовано таким образом, что одна из характеристик  $\Delta y$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_0$  выходного импульса не будет зависеть [3] от изменений  $\Delta x$  или  $\Delta z$ . Тогда возникает ситуация, при выделении информации по характеристикам выходного импульса, при которой характеристики выходного импульса содержат информацию о входных воздействиях  $\Delta x$  и  $\Delta z$  в разных пропорциях, а одна из характеристик выходного импульса вообще не содержит информации об одном из входных воздействий. В этом случае может быть сформировано двухканальное преобразование информации ПП.

Общая пропускная способность информационного канала  $J_k$  будет складываться из двух составляющих:

$$J_k = J_x + J_z, \quad (1)$$

где  $J_x$  – пропускная способность ПП по входной координате  $x$ ;  $J_z$  – пропускная способность ПП по входной координате  $z$ .

Следует иметь в виду, что влияние входных воздействий  $\Delta x$  и  $\Delta z$  на характеристики выходного импульса также может быть комплексным. Входные воздействия могут влиять как на уровень  $y_0$  установившегося энергетического состояния системы ПП, так и на ее динамические свойства (постоянная времени  $\tau$ ), которые определяют отклики  $y_1(t)$  и  $y_2(t)$  информационной системы ПП на входные воздействия при коммутировании энергетического состояния, лежащие в основе формирования выходного импульса с характеристиками  $\Delta y$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_0$  (см. рис. 2).

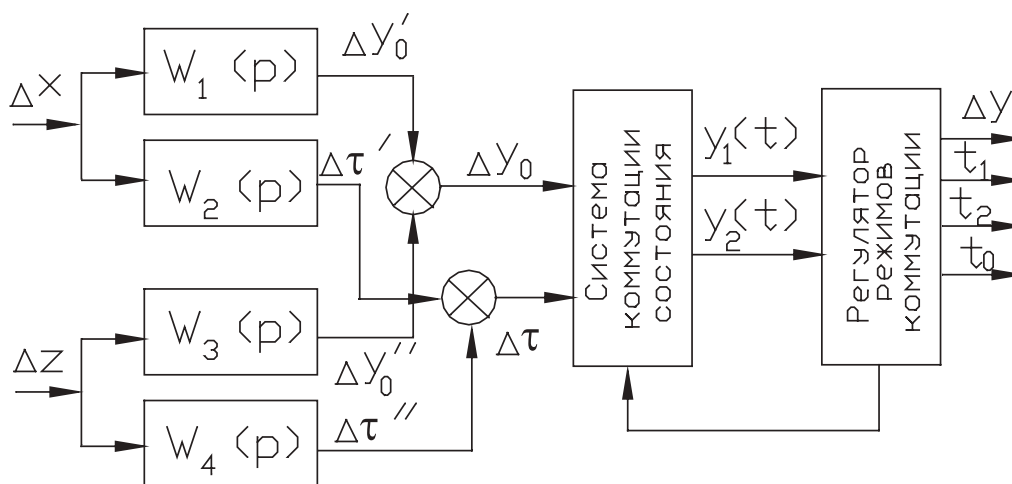


Рис. 2. Структурная схема преобразования входных воздействий при комплексном воздействии на стационарные и нестационарные характеристики  $y_0$  и  $\tau$

Вследствие различий в физическом характере воздействий  $\Delta x$  и  $\Delta z$  их влияние на изменение стационарных значений энергетического состояния  $\Delta y_0$  ПП и постоянной времени  $\Delta \tau$  ПП будет различным. Следовательно, и передаточные функции  $W_1(p)$ ,  $W_2(p)$ ,  $W_3(p)$ ,  $W_4(p)$  преобразования изменений  $\Delta x$  и  $\Delta z$  в соответствующие вариации  $\Delta y_0$  и  $\Delta \tau$  будут удовлетворять условиям:

$$W_1(p) \neq W_3(p),$$

$$W_2(p) \neq W_4(p).$$

Причем под влиянием изменений  $\Delta x$  и  $\Delta z$  соответствующие изменения  $\Delta y_0'$  и  $\Delta y_0''$ ,  $\Delta \tau'$  и  $\Delta \tau''$  могут быть как в одном, так и разных направлениях (суммироваться или вычитаться) при формировании результирующих значений характеристик  $\Delta y$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_0$  выходного импульса ПП.

В общем случае комплексная обработка, при выделении полезной информации одновременно о нескольких входных воздействиях, может осуществляться при всех возможных режимах коммутации (см. рис. 3). Однако все основные выводы по особенностям преобразователя информации, с целью ее комплексной обработки, можно сделать на основе детального рассмотрения четырех режимов изменения энергетического состояния информационной системы ПП:

- а)  $\Delta y$ -const,  $t_1$ -var,  $t_2$ -var,  $t_0$ -var;
- б)  $t_1$ -const,  $\Delta y$ -var,  $t_2$ -var,  $t_0$ -var;
- в)  $t_2$ -const,  $\Delta y$ -var,  $t_1$ -var,  $t_0$ -var;
- г)  $t_1 = t_{\text{пер}}$ ,  $\Delta y$ -var,  $t_2$ -var,  $t_0$ -var.

Рассматриваемые четыре варианта режима коммутации энергетического состояния вбирают в

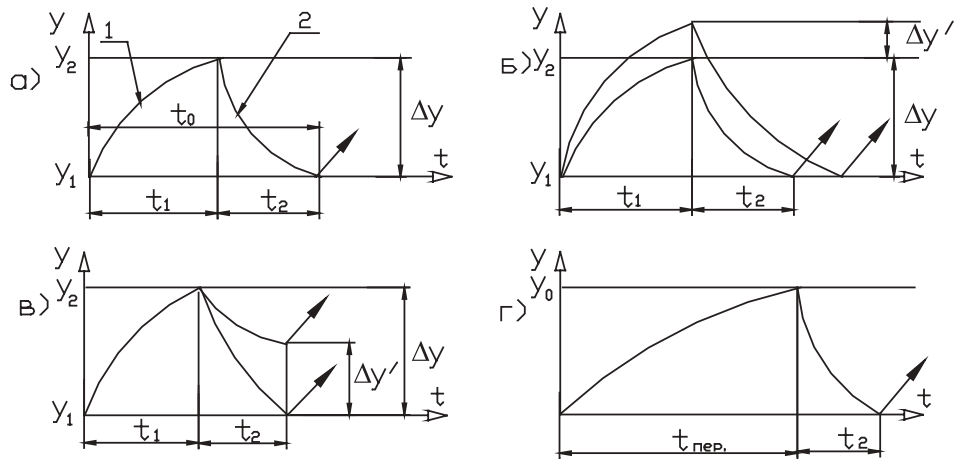


Рис. 3. Выходные импульсы ПП при различных вариантах коммутации энергетического состояния ПП

себя все компоненты формирования выходного импульса, которые присутствуют при других режимах коммутации, что позволяет при анализе выбранных вариантов сделать вывод по всему комплексу проблем.

Рассмотрим вариант «а» коммутации энергетического состояния.

Выбор режимов функционирования информационной системы ПП осуществляется из условия независимости длительности  $t_0$  выходного импульса от одной из входных координат  $x$  или  $z$ .

Пусть выполняется, например, условие

$$S_z^{t_1} = -S_z^{t_2},$$

где  $S_z^{t_1}$  – чувствительность ПП по длительности  $t_1$  импульса относительно входного воздействия  $z$ ;  $S_z^{t_2}$  – чувствительность ПП по длительности  $t_2$  импульса относительно входного воздействия  $z$ , при котором длительность  $t_0$  импульса зависит только от входного воздействия  $x$ . В то же время составляющие  $t_1$  и  $t_2$  выходного импульса зависят не только от  $x$ , но и входного воздействия  $z$ .

Это позволяет, при известных показателях чувствительности  $S_x^{t_1}$ ,  $S_x^{t_2}$ ,  $S_x$ , где:  $S_x$  – чувствительность ПП по длительности  $t_0$  импульса относительно входного воздействия  $x$ ;  $S_x^{t_1}$  – чувствительность ПП по длительности  $t_1$  составляющей импульса относительно входного воздействия  $x$ ;  $S_x^{t_2}$  – чувствительность ПП по длительности  $t_2$  составляющей импульса относительно входного воздействия  $x$ , – за один цикл преобразований (длительность  $t_0$  импульса) контролировать значения второго входного сигнала  $z$  наряду со значением входного сигнала  $x$ .

Действительно, по значению длительности  $t_0$  импульса восстанавливается значение входной контролируемой координаты  $x$ :

$$t_0 = S_x x.$$

Затем вычисляется значение  $t_1^*$  интервала времени, которое должно было быть при действии входного сигнала  $x$ , если бы не действовал сигнал  $z$  на входе ПП:

$$t_1^* = S_x^{t_1} x,$$

и определяется та разница  $\Delta t_1$  между регистрируемым значением  $t_1$  и тем значением  $t_1^*$ , которое вычислено из условия  $z=0$ :

$$\Delta t_1 = t_1 - t_1^*. \tag{2}$$

Значение второго входного сигнала  $z$  вычисляется из соотношения

$$Z = \frac{1}{S_z^{t_1}} \Delta t_1. \tag{3}$$

Если в результате вычислений выясняется, что  $\Delta t_1 = 0$ , то очевидно, что на вход ПП воздействует только один входной контролируемый сигнал  $x$  ( $z=0$ ).

При комплексной обработке характеристик выходного импульса на выходе ПП удается выделить (рис. 4) информацию, содержащуюся в каждой составляющей входного воздействия.

Если рассматривать входное воздействие  $z$  как помеху, то схема выделения значения помехи при комплексной обработке выходного сигнала ПП позволяет повышать точность информационной системы ПП за счет введения компенсационных сигналов, с целью устранения влияния помехи на точность выделения полезного сигнала на выходе ПП.

Следует отметить, что по схеме, аналогичной представленной на рис. 4, может быть выделен полезный сигнал  $z$  при комплексной обработке характеристики выходного импульса в виде интервала  $t_2$ .

Во всех рассмотренных случаях преобразования информационной системой ПП входных воздействий  $x$  и  $z$  с выделением на выходе ПП сигналов  $y_x(t)$  и  $y_z(t)$ , однозначно связанных с входными контролируемыми координатами, целесообразно рассматривать протекающие в информационной

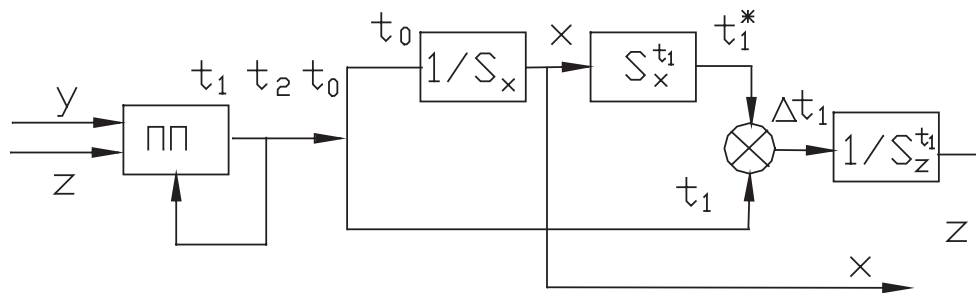


Рис. 4. Принципиальная схема комплексной обработки выходного сигнала

системе ПП как двухканальное преобразование информации (см. рис. 5).

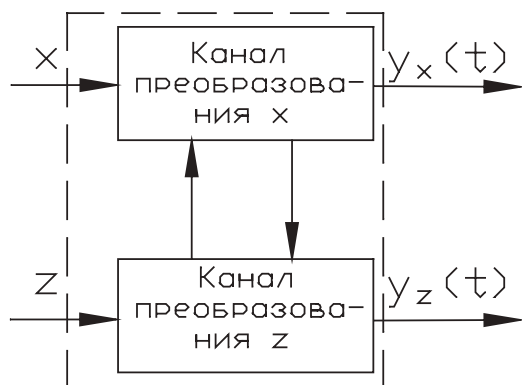


Рис. 5. Схема двухканального преобразования в информационной системе ПП при комплексной обработке выходного сигнала

При этом каждый из информационных каналов ПП обладает своей определенной пропускной способностью  $J_x$  и  $J_z$ . Общая пропускная способность информационного канала, при комплексной обработке выходного импульса (выходного сигнала ПП), будет существенно выше, чем при классическом преобразовании ПП одной входной координаты при стационарном режиме его функционирования.

Комплексная обработка характеристик выходного импульса ПП, при коммутационном режиме функционирования, обеспечивает повышение пропускной способности информационной системы ПП на базе формирования многоканального преобразования одновременно нескольких входных воздействий.

#### Список литературы

1. Романченко А.Ф. Информационно-измерительные системы нестационарного энергетического состояния [Текст] / А.Ф. Романченко. – Уфа: УТИС, 2000. – 173 с.
2. Романченко А.Ф. Принцип высокоскоростного преобразования информационных потоков первичными преобразователями [Текст] / А.Ф. Романченко // Вестник АН РБ. – 2005. – Т. 10. – № 2. – С. 12–15.
3. Романченко А.Ф. Формирование информационных характеристик первичных преобразователей с фильтрацией помех за счет организации преобразования сигнала [Текст] / А.Ф. Романченко, А.А. Мухамадиев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 3. – С. 93–96.

#### References

1. Romanchenko A.F. Informacionno-izmeritel'nye sistemy nestacionarnogo jenergeticheskogo sostojanija [Tekst] / A.F. Romanchenko. – Ufa: UTIS, 2000. – 173 s.
2. Romanchenko A.F. Princip vysokoskorostnogo preobrazovanija informacionnyh potokov pervichnymi preobrazovateljami [Tekst] / A.F. Romanchenko // Vestnik AN RB. – 2005. – T. 10. – № 2. – S. 12–15.
3. Romanchenko A.F. Formirovanie informacionnyh harakteristik pervichnyh preobrazovatelej s fil'traciej pomex za schet organizacii preobrazovanija signala [Tekst] / A.F. Romanchenko, A.A. Muhamadiev // Jelektrotehnicheskie i informacionnye kompleksy i sistemy. – 2013. – T. 9. – № 3. – S. 93–96.

# НАНОЭЛЕКТРОНИКА И КВАНТОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ NANOELECTRONICS AND QUANTUM DATA SYSTEMS



**Рудерман С.Ю.**  
**Ruderman S.Yu.**

*доктор технических наук, профессор кафедры  
«Вычислительная математика и кибернетика»  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиа-  
ционный технический университет»,  
Россия, г. Уфа*



**Нургаянова О.С.**  
**Nurgajanova O.S.**

*кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Вычислительная математика и кибернетика»  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиа-  
ционный технический университет»,  
Россия, г. Уфа*

УДК 57.087

## НАБОР ХРОМОСОМ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ О ПРЕДСТОЯЩЕМ КЛЕТКЕ ПОСТРОЕНИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ БЕЛКОВ (ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КАРТИНЫ)

Клетка любого организма представляет собой сложную систему, которая выполняет множество жизненно важных функций. Известно, что число хромосом в клетке у каждого вида свое, объем алфавита сообщений в нуклеиновых кислотах равен 4, алфавита белков – 20. Очевидно, что эти константы носят организационный характер, но какова их природа и от чего они могут зависеть, неизвестно. Одним из решающих факторов является разнообразие возможностей. Желательно, чтобы разнообразие последовательностей белков, которое можно построить, было как можно больше, а «энергетические» затраты на этот процесс как можно меньше, и при этом хотелось бы, чтобы надежность процесса построения была как можно больше. В предлагаемой статье строится и анализируется модель формирования клеткой нужной последовательности белков. Предполагается, что процесс построения очередного белка состоит из 2-х этапов:

- 1) поиска хромосомы, содержащей код белка;
- 2) процесса поиска нужного кода в найденной хромосоме (и формирования самого белка).

Предлагаемая постановка задачи позволяет ставить вопрос об оптимальном числе хромосом, которое оказывается равным 23. Тот факт, что в клетке человека наблюдаются именно 23 пары хромосом, позволяет предположить, что предлагаемая конструкция охватывает основные черты наблюдаемой сложной реальности и может помочь при поиске ее физико-химических основ.

*Ключевые слова:* клетка, белок, белковая последовательность, хромосома, случайный выбор, ДНК, поиск, разнообразие, надежность, ресурс.

## SET OF CHROMOSOMES AS A POTENTIAL SOURCE OF INFORMATION ABOUT THE UPCOMING CONSTRUCTION OF THE CELL PROTEIN SEQUENCES (OPTIMIZATION MODEL)

Cell of any organism is a complex system, which not only performs a number of vital functions, but also a source of information about the organism. It is known that the number of chromosomes in the cell of each type its volume alphabet messages in nucleic acids is 4, the alphabet protein – 20. Obviously, these constants are of an organizational nature, but what are they and what they can depend on is not known. One of the decisive factors is the variety of options.

Desirably, the sequence diversity of proteins which can be constructed as was possible, and "energy" cost of this process as possible and thus it would be desirable to construct the process reliability as large as possible. In this paper constructs and analyzes cell model of the desired protein sequences. It is assumed that the process of building another protein consists of two stages:

- 1) search the chromosome containing protein code;
- 2) process of search of the necessary code in the chromosome ( and the formation of protein).

The proposed formulation of the problem allows us to pose the question about the optimal number of chromosomes, which is equal to 23. The fact that in a human cell is observed 23 pairs of chromosomes, suggesting that the proposed design covers the main features of the observed complex reality and can help in the search for her physical and chemical bases.

*Key words:* cell, protein, protein sequence, chromosome, random selection, DNA, search, diversity, reliability, resource.

### Введение

Процесс от момента появления клетки до начала ее деления будем называть временем ее жизни. Исследования, посвященные физико-химическому анализу этого этапа, весьма многочисленны и разносторонни.

В настоящей статье мы сосредоточим основное внимание на одном из аспектов: во время своей жизни клетке предстоит сформировать определенную последовательность белков. Биосинтез белков, как установлено к настоящему времени, требует постоянного обращения к информации, записанной в ДНК. Коды белков, которые предстоит построить, хранятся в ДНК, которые, в свою очередь, находятся в специальных конструкциях, называемых хромосомами.

Для каждого вида многоклеточных организмов характерно определенное количество и структура хромосом, в частности, набор хромосом у человека состоит из 23 пар.

Обращаясь к процессу формирования белков, можно выделить две задачи, которые должна «решать» клетка:

- 1) найти нужную хромосому, содержащую код белка;
- 2) найти нужный код белка в хромосоме.

После отыскания кода белка нужно синтезировать сам белок, что осуществляется в специальных устройствах, называемых рибосомами. В настоящей статье мы рассмотрим только модели поиска

хромосомы и отыскания после этого в последней нужного кода белка.

### Поиск хромосомы

Обозначим через  $n$  число пар хромосом в клетке. В каждой из них находится ДНК, в которой записано свое количество кодов белка. Предстоит найти ту из  $n$  хромосом, в которой записан код нужного белка. Поиск нужной хромосомы будем представлять себе как случайный выбор без возвращения из  $n$  возможных до отыскания нужной. На каждом шаге такого предстоящего выбора с вероятностью  $1/n$  будет получена нужная хромосома (известно, что при случайном выборе без возвращения из  $n$  элементов безусловная вероятность получить при  $i$ -м извлечении нужный элемент независимо от номера  $i$  равна  $1/n$ ). Число шагов такого предстоящего поиска представляет собой случайную величину с возможными значениями 1, 2, 3, ...,  $n$ . Каждому из этих возможных значений соответствует вероятность  $1/n$ , вследствие чего математическое ожидание числа шагов до отыскания нужной хромосомы равно

$$1 \cdot \frac{1}{n} + 2 \cdot \frac{1}{n} + 3 \cdot \frac{1}{n} + \dots + n \cdot \frac{1}{n} = \frac{1}{n} (1 + 2 + \dots + n) = \frac{n+1}{2}. \quad (1)$$

Каждый акт случайного выбора хромосомы и определение того, найдена ли искомая, требует, как представляется, определенных затрат какого-то ресурса. О возможной физической интерпретации этого ресурса будет сказано дальше, пока же будем предполагать, что каждый шаг описанной выше

процедуры случайного выбора обходится в единицу этого ресурса, вследствие чего математическое ожидание этого ресурса, который будет потрачен на поиск нужной хромосомы, имеет вид (1).

**Поиск кода белка в хромосоме**

После того как будет найдена хромосома, хранящая в себе код нужного белка, предстоит найти этот код.

Известно, что в каждой хромосоме хранится ДНК, в которой содержится, как правило, много кодов белков, поиск нужного из них (кода) требует «энергетических» затрат. Будем предполагать, что «энергетический» ресурс, отведенный на поиск нужной хромосомы и последующий поиск кода белка, расходуется следующим образом. После отыскания нужной хромосомы (на что требуется расход ресурса, математическое ожидание которого имеет вид (1)) начинается процесс, называемый в теории вероятностей [1] многошаговой игрой на выживание. А именно на каждом шаге имеющийся ресурс с вероятностью  $\frac{1}{2}$  уменьшается на единицу либо с вероятностью  $\frac{1}{2}$  увеличивается на единицу. Процесс такого случайного изменения ресурса продолжается до тех пор, пока ресурс либо восстановится до значения, которому он был равен после окончания работы с предыдущей хромосомой (что будет означать «победу» в игре, т. е. код нужного белка будет найден), либо ресурс, имевшийся для работы с данной хромосомой, достигнет значения 0 (что будет означать «поражение» в игре, т. е. код нужного белка в этом случае не будет найден; и будем предполагать, что вся нужная цепочка белков в этом случае не будет построена, а это означает, что длина нужной цепочки белков будет равна 0).

В следующем разделе процессы поиска каждой нужной хромосомы и отыскания в ней соответствующего кода белка будут рассмотрены совместно, и в итоге окажется возможным сформулировать задачу об оптимальном числе хромосом.

**Оптимизационная модель поиска хромосом и последующего отыскания в каждой из них кода белка**

Общее число пар хромосом будем по-прежнему обозначать символом  $n$ . Число белков, которые клетке предстоит синтезировать, обозначим  $L$ . Разнообразие возможных вариантов выбора из  $n$  хромосом, нужное при создании последовательности  $L$  белков, составляет  $n^L$ . Желательно, чтобы величина  $K=n^L$  была как можно больше.

Для увеличения  $K$  при заданном  $L$  нужно увеличить  $n$ , но если  $n$  – растет, то возрастает и математическое ожидание ресурса, необходимого для

отыскания нужной хромосомы, имеющее вид (1).

Обозначим общий ресурс, которым обладает клетка для отыскания последовательности кодов белков, через  $B$ . При заданном  $L$  первоначальный ресурс, приходящийся на поиск хромосомы и работу с ней, составляет  $x = \frac{B}{L}$ .

Итак, будем предполагать, что процесс поиска каждой из хромосом и последующего поиска в ней кода белка протекает следующим образом.

В процессе отыскания первой хромосомы используется каждый из ресурсов, отведенных для всех хромосом. Поэтому после отыскания хромосомы, в которой хранится код первого белка, каждый из  $L$  одинаковых ресурсов станет равным  $x - Y_1 = \frac{B}{L} - Y_1$ , где  $Y_1$  – случайная величина с математическим ожиданием (1).

После отыскания хромосомы, в которой хранится код первого из  $L$  белков, начинается поиск 1-го кода белка, который представляет собой игру на выживание, исходом которой является либо значение первоначально отведенного ей ресурса  $x = \frac{B}{L}$ , что означает победу в игре, т. е. отыскание кода первого белка, либо значение ресурса 0, что означает поражение в игре, итогом чего является последовательность белков длины 0.

В случае победы в игре, связанной с поиском 1-го кода белка, ресурс, который отводится для поиска 1-го кода белка, выбывает из игры. В дальнейшем процессе участвуют ресурсы  $\frac{B}{L} - Y_1$ , имеющиеся для работы по поиску 2-й, 3-й, ...,  $L$ -й хромосом.

После отыскания 2-й нужной хромосомы и соответствующего кода белка в ней, если он окажется успешным, ресурс для поиска каждой из оставшихся хромосом станет равным  $\frac{B}{L} - Y_1 - Y_2$ , где  $Y_1, Y_2$  – случайные величины с математическим ожиданием (1).

После отыскания  $i$ -й по счету хромосомы для отыскания в ней  $i$ -го кода белка ресурсы для отыскания  $i$ -го,  $i+1$ -го, ...,  $L$ -го кодов белков станут равными  $\frac{B}{L} - Y_1 - Y_2 - \dots - Y_i$ . Успешное отыскание  $i$ -го кода белка эквивалентно завершению симметричного случайного блуждания, начавшегося в точке  $\left(x - \sum_{k=1}^i Y_k\right)$ , на поглощающем экране  $\left(x - \sum_{k=1}^{i-1} Y_k\right)$ , другой поглощающий экран находится в точке 0. Вероятность успешного окончания игры равна [1]:

$$\frac{x - \sum_{k=1}^i Y_k}{x - \sum_{k=1}^{i-1} Y_k} \quad (2)$$

Не надо забывать, что в нашей задаче  $Y_1, Y_2, \dots, Y_i$  – случайные величины. Успешное отыскание кода  $i$ -го белка представляет собой случайное событие, которое обозначим  $A_i$ . Построение всей последова-

тельности  $L$  белков представляет собой цепочку событий  $A_1 A_2 \dots A_L$ .

Выше было сказано, что если какой-то из кодов белка не будет найден, то длина всей цепочки кодов будет равна 0. Поэтому полная группа несовместных событий состоит из цепочек  $A_1, A_1 A_2, A_1 A_2 A_3, \dots, A_1 A_2 \dots A_{L-1} A_L, A_L, A_1 A_2 \dots A_L$ .

Учитывая, что  $Y_1, Y_2, \dots, Y_L$  – случайные величины, вероятность получить цепочку  $A_1 A_2 \dots A_L$  равна:

$$P(A_1 A_2 \dots A_L) = M\left(\frac{x - Y_1}{x} \cdot \frac{x - Y_1 - Y_2}{x - Y_1} \cdot \dots \cdot \frac{x - Y_1 - Y_2 - \dots - Y_L}{x - Y_1 - Y_2 - \dots - Y_{L-1}}\right) = 1 - \frac{n+1}{2} \cdot \frac{L}{x}, \quad (3)$$

где  $M$  – символ математического ожидания:

$$M\left(\frac{x - Y_1 - Y_2 - \dots - Y_L}{x}\right) = M\left(1 - \frac{n+1}{2} \cdot \frac{L}{x}\right) = 1 - M\left(\frac{n+1}{2} \cdot \frac{L}{x}\right). \quad (4)$$

Так как возможные значения количества найденных кодов белков есть 0 и  $L$ , то математическое ожидание разности между  $L$  и случайной длиной цепи, являющееся характеристикой ненадежности процесса построения сообщений, равно:

$$\Delta L = L^3 \cdot \left(\frac{n+1}{2B}\right) = \frac{L^3(n+1)}{2B} = \frac{n+1}{2} \cdot \frac{\ln^3 K}{\ln^3 n}. \quad (5)$$

Пусть  $Z$  – случайная длина цепи белков, которая будет построена. Возможные значения  $Z$  – 0 и  $L$ . Их вероятности:

$$P(Z=L) = P(A_1 A_2 \dots A_L) = 1 - \left(\frac{n+1}{2} \cdot \frac{L}{x}\right)$$

$$P(Z=0) = 1 - P(A_1 A_2 \dots A_L) = 1 - 1 + \frac{n+1}{2} \cdot \frac{L}{x} = \frac{n+1}{2} \cdot \frac{L}{x}. \quad (6)$$

Математическое ожидание  $Z$  равно:

$$M(Z) = 0 \cdot P\left(\frac{n+1}{2} \cdot \frac{L}{x}\right) + L \left(1 - \frac{n+1}{2} \cdot \frac{L}{x}\right) = L - L \left(\frac{n+1}{2} \cdot \frac{L}{x}\right) = L - \frac{n+1}{2} \cdot \frac{L^2}{x}. \quad (7)$$

Интересующая нас характеристика ненадежности процесса построения последовательности кодов белков равна:

$$\Delta L = M(L - Z) = L - M(Z) = L - L + \left(\frac{n+1}{2} \cdot \frac{L^2}{x}\right) = \frac{n+1}{2} \cdot \frac{L^3}{B} = \frac{(n+1) \ln^3 K}{2B \ln^3 n}. \quad (8)$$

Укажем три оптимизационные задачи относительно величины  $n$ , имеющие все одно и то же решение. Найти число хромосом  $n$ , которое:

- 1) при заданных  $B$  и  $K$  обращает в минимум  $\Delta L$ ;
  - 2) при заданных  $B$  и  $\Delta L$  обращает в максимум разнообразие  $K$ ;
  - 3) при заданных  $K$  и  $\Delta L$  обращает в минимум  $B$ .
- В каждой из этих трех задач искомое значение  $n$

обращает в минимум величину

$$\frac{n+1}{\ln^3 n} \quad (9)$$

где  $n$  – целое положительное число. Значения (9) при возможных целых положительных  $n$  представлены в нижеследующей таблице, из которой видно, что минимум (9) достигается при  $n = 23$ .

$n$	2	3	5	9	12	17	20	21	22	23	24	25	26
$\frac{n+1}{\ln^3 n}$	9,09	3	1,44	0,94	0,85	0,79	0,780	0,779	0,778	0,776	0,778	0,25	0,78



Тот факт, что в клетке человека наблюдаются именно 23 пары хромосом, позволяет предположить, что предложенная модель содержит основные черты фактически сложной реальности и может помочь при поиске ее физико-химических основ.

Остановимся теперь на вопросах реалистичности допущений модели. Предположение о случайном выборе без возвращения из имеющихся хромосом до отыскания той из них, которая содержит код нужного белка, выглядит физически естественным. Последующее поведение ресурса, отведенного для поиска кода белка в хромосоме («игра на выживание», когда этот ресурс, подобно уровню замка от вертикальной застежки-молнии, понизившись при поиске хромосомы на случайную величину, после этого, случайно колеблясь, повышается до исходного уровня (для закрытия «застежки»)), может показаться неестественным [2]. Особо загадочным для наблюдателя нашего обычного «макроскопического» мира может показаться дискретное изменение ресурса на каждом шаге на плюс-минус единичную порцию (с вероятностями  $\frac{1}{2}$ ).

В «микроскопическом», квантовом мире подобные изменения не являются «неестественными». В частности, электрон обладает спином  $\frac{1}{2}$ , с которым связан магнитный момент – вектор, проекция которого на направление внешнего магнитного поля является случайной величиной, с двумя одинаковыми по абсолютной величине, но обладающими противоположными знаками значениями. Если спин экранирован от внешнего магнитного поля, то вероятности этих значений одинаковы и равны каждой  $\frac{1}{2}$ .

Возможная интерпретация «ресурса» – проекцией магнитного момента специальной системы спинов на выделенные направления была предложена в [4] при анализе моделей образования сообщений в белках. Можно предположить, что система спинов, о которой идет речь, является составной частью некоторой структуры, подобной обнаруженным экспериментально в органических магнетиках [3]. В последних радикалы с атомами углерода, имеющими неспаренные электроны, приобретают фиксированную упорядоченную ориентацию благодаря связывающему влиянию располагающихся между ними катионов щелочного металла. Неспаренные электроны в радикалах взаимодействуют между собой через посредство катионов металла, создавая значительный суммарный магнитный момент.

Если справедлива гипотеза, что «ресурс» в принятой модели связан с магнитным моментом специальной системы спинов, то особый интерес

должна представлять его зависимость от внешнего постоянного магнитного поля. Знание этой зависимости позволило бы целенаправленно влиять на указанную систему, магнитный момент которой, в свою очередь, влияет на эффективность синтеза последовательности белков.

Мы выдвигаем гипотезу, что в основе положительного действия соответствующего постоянного магнитного поля на состояние организмов лежит процесс, количественное описание которого было дано в [2] при описании синтеза белка, а также в настоящей статье при описании построения клеткой нужной последовательности белков.

Механизм «болезни» и «лечения» (на клеточном уровне) выглядит при этом так. Наличие в клетке «загрязняющих» веществ, от которых ей в силу каких-то причин не удастся избавиться, приводит к уменьшению внутреннего магнитного момента. Скомпенсировать недостающее значение магнитного момента можно, поместив клетку в соответствующее постоянное магнитное поле. Восстановление в нем магнитного момента до нужной величины приведет к нормализации синтеза белков и нужной последовательности белков. Величина внешнего магнитного поля, которая способна оказать целебное воздействие, определяется тем значением магнитного момента клеточной среды, которое нуждается в восстановлении.

При достаточно большой величине внешнего магнитного поля индуцированный момент может стать слишком большим, что приведет к существенному замедлению как белкового синтеза [4], так и нужной последовательности белков.

Этот вывод представляет интерес для онкологии [5]: если воздействие на раковые клетки сильным магнитным полем индуцирует в них большой магнитный момент, то в итоге затормозится синтез как каждого из белков [6], так и нужной последовательности белков (проблема, которой посвящена настоящая статья).

Клетка каждого представителя многоклеточных организмов содержит свое (характерное для вида) число хромосом, в ДНК которых записаны коды белков. Так, у пчелы и голубя – 8 пар, бабочки – 190, медведя – 37, мухи – 6, огурца – 12, кролика – 22, гориллы, картофеля – 24, лошади – 32.

Пытаясь понять причины отличия этих количеств от оптимального числа 23, к которому приводит предлагаемая модель формирования последовательности кодов белков, мы вынуждены пересмотреть что-то в допущениях с целью объяснить большое разнообразие возможных ответов. Размышляя на эту тему и желая сохранить наибо-

лее существенное в сделанных допущениях, мы пришли к выводу о возможности отказа для разных видов от допущения о случайном выборе без возвращения из набора хромосом до отыскания нужной. Предположим, что этот выбор без возвращения является «пристрастным», так что математическое ожидание числа шагов до отыскания нужной хромосомы равно не  $\frac{n+1}{2}$  (как это наблюдается при случайном выборе), а равно величине  $\alpha n + \beta$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  характеризуют «пристрастие» вида при поиске нужной хромосомы.

Если для клетки человека численная характеристика ненадежности процесса оказалась равна  $\Delta L = \frac{n+1}{2} \cdot \frac{\ln^3 K}{B^3 \sqrt{n}}$ , то теперь, как мы предполагаем, она равна:

$$(\alpha n + \beta) \cdot \frac{\ln^3 K}{B^3 \sqrt{n}}. \quad (9)$$

Число хромосом  $n$ , характеризующее рассматриваемый вид, является величиной, которая обращает (9) в минимум, а коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  отражают степень «пристрастия» вида при поиске хромосомы.

Подставив в (9) вместо  $n$  фактическое число наблюдаемых хромосом в клетке  $n_0$ , мы приходим к задаче отыскания такого соотношения между  $\alpha$  и  $\beta$ , которое обращает в минимум величину  $\frac{\alpha n + \beta}{\sqrt[3]{n_0}}$ .

Дальнейший анализ, связанный с учетом физико-химических особенностей клетки, может, как представляется, помочь при обдумывании происходящих в ней процессов.

#### Список литературы

1. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. В 2-х томах. Т. 1 [Текст] / В. Феллер; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 528 с.
2. Рудерман С.Ю. Об оптимальных размерах алфавитов и возможной причине их наблюдаемости в природе [Текст] / С.Ю. Рудерман, И.А. Соломещ //

Обозрение прикладной и промышленной математики. – 1999. – Том 6. – Выпуск 2.

3. Дирак П.А.М. Пути физики [Текст] / П.А.М. Дирак. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 88 с.

4. Рудерман С.Ю. Задача выбора объема алфавита сообщений в биополимерах и статистическая термодинамика [Текст] / С.Ю. Рудерман, И.А. Соломещ // Башкирский химический журнал. – 1996. – Т. 3. – № 5–6. – С. 37–44.

5. Лоренс Р. Магнитотерапия. Альтернативный метод облегчения боли [Текст] / Р. Лоренс, П. Дж. Рош, Д. Плоуден; пер. с англ. С. Евтушенко. – М.: КРОН-ПРЕСС, 1998. – 234 с.

6. Sei-Hum Jang, Ruth Ann Bertsch, James E. Jackson, Bart Kahr // Mol. Crystallol Liquid Cryst. – 1992. – V. 211. – P. 289.

#### References

1. Feller V. Vvedenie v teoriju veroyatnostej i ejo prilozhenija. V 2-h tomah. T. 1 [Tekst] / V. Feller; per. s angl. – M.: Mir, 1984. – 528 s.

2. Ruderman S.Ju. Ob optimal'nyh razmerah alfavitov i vozmozhnoj prichine ih nabljudаемости v prirode [Tekst] / S.Ju. Ruderman, I.A. Solomeshh // Obozrenie prikladnoj i promyshlennoj matematiki. – 1999. – Tom 6. – Vypusk 2.

3. Dirak P.A.M. Puti fiziki [Tekst] / P.A.M. Dirak. – M.: Jenergoatomizdat, 1983. – 88 s.

4. Ruderman S.Ju. Zadacha vybora ob#ema alfavita soobshhenij v biopolimerah i statisticheskaja termodinamika [Tekst] / S.Ju. Ruderman, I.A. Solomeshh // Bashkirskij himicheskij zhurnal. – 1996. – T. 3. – № 5–6. – S. 37–44.

5. Lorens R. Magnitoterapija. Al'ternativnyj metod oblegchenija boli [Tekst] / R. Lorens, P. Dzh. Rosh, D. Plouden; per. s angl. S. Evtushenko. – M.: KRON-PRESS, 1998. – 234 s.

6. Sei-Hum Jang, Ruth Ann Bertsch, James E. Jackson, Bart Kahr // Mol. Crystallol Liquid Cryst. – 1992. – V. 211. – P. 289.



**Доломатов М.Ю.**  
**Dolomatov M.Yu.**

кандидат технических наук, доктор химических наук, профессор кафедры «Физика», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика электронных процессов и наноматериалов», ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа



**Телин А.Г.**  
**Telin A.G.**

кандидат химических наук, член-корреспондент РАЕН, заместитель генерального директора ООО «РН-УфаНИПИнефть», Россия, г. Уфа



**Сафуанова Р.М.**  
**Safyanova R.M.**

кандидат химических наук, главный специалист ООО «РН-УфаНИПИнефть», Россия, г. Уфа



**Борисов Г.К.**  
**Borisov G.K.**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник ООО «РН-УфаНИПИнефть», Россия, г. Уфа



**Бурханова З.И.**  
**Burhanova Z.I.**

инженер ООО «Уфимский НТЦ», Россия, г. Уфа



**Кисмерешкин С.В.**  
**Kismereshkin S.V.**

аспирант кафедры «Физика» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа



**Докичев В.А.**  
**Dokichev V.A.**

доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой общей химии ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа

УДК 535.333, 539.19

## РЕЗОНАНСНАЯ КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ ДЕСТРУКЦИЯ ВОДОРОДНЫХ СВЯЗЕЙ КАК ПРИЧИНА МЕТАСТАБИЛЬНОСТИ ЭМУЛЬСИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Известно, что при воздействии магнитного поля жидкости становятся более структурированными, в них увеличивается скорость химических реакций, улучшается коагуляция примесей. Данный эффект связывают с химической поляризацией ядер в магнитном поле и изменением констант скоростей бимо-

лекулярных реакций между частицами с неспаренными электронными спинами и триплетными молекулами. При наложении магнитных полей скорости реакций в жидкой и твердой фазах увеличиваются. Л.М. Бучаченко было установлено, что этот эффект обусловлен особенностями динамики столкновений молекул и влиянием магнитного поля на взаимодействие спинов электронных оболочек реагирующих частиц. Однако этот эффект прекращается сразу же после снятия магнитного поля, и не наблюдается проявления «памяти» о магнитной обработке жидкостей.

Несмотря на серьезные теоретические и экспериментальные исследования до сих пор не объяснены механизмы влияния низкочастотного магнитного поля (НМП) на термодинамическую устойчивость эмульсий типа «масло в воде» и «вода в масле», играющих важнейшую роль в нефтедобыче.

В настоящей работе были проведены две серии экспериментов: одна – по оценке влияния НМП на разрушение нефтяных эмульсий Гремихинского месторождения, отличающихся высоким содержанием природных эмульгаторов; другая – по определению влияния деэмульгатора и магнитного поля на вязкость эмульсий на основе дизтоплива и воды, стабилизированных синтетическим эмульгатором. Причем, если в первой серии экспериментов эмульсионная система была стабилизирована природными стабилизаторами, содержащими ферро- и парамагнитные центры, то во второй – явных активных центров по отношению к магнитному полю в системе не было.

Авторами были проведены многочисленные эксперименты по влиянию слабых постоянных и переменных магнитных полей до 0,2–0,3 Тл на динамическую вязкость и поверхностное натяжение воды и молекулярных водных растворов неионогенных ПАВ. Динамическая вязкость определялась по времени истечения жидкости через капилляр и капиллярной вязкозиметрией, поверхностное натяжение измерялось при постоянной температуре в лабораторном сталагмометре. Источниками постоянного тока были кольцевой электромагнит и постоянный ферритовый магнит.

*Ключевые слова:* низкочастотное электромагнитное поле, эмульсия, деэмульгатор, вязкость, обводненность, явление резонанса.

## **RESONANT VIBRATIONAL DESTRUCTION OF HYDROGEN BONDS AS A CAUSE META-STABLE EMULSION UNDER LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD**

It is known that when exposed to a magnetic field of the liquid become more structured, in which the rates of chemical reactions is increased, improving coagulation of impurities. This effect is attributed to chemical polarization of nuclei in a magnetic field and the change of the rate constants of bimolecular reactions between particles with unpaired electron spins and triplet molecules. When applying magnetic fields speed reactions in the liquid and solid phases increased. LM Buchachenko it was found that this effect is due to the specific dynamics of molecular collisions and the influence of magnetic field on the interaction between the spins of the electron shells of the reacting particles. However, this effect ends immediately after removal of the magnetic field, and is not observed the appearance of "memory" of the magnetic treatment of liquids.

Despite serious theoretical and experimental studies are still not explained the mechanisms of influence of low-frequency magnetic field (LMF) on the thermodynamic stability of emulsions "oil in water" and "water in oil" plays an important role in oil production.

In this paper we conducted two series of experiments: one – to assess the impact on the destruction of NRM oil emulsions Gremikhinskoye field differing high content of natural emulsifiers; the other – for determining the effect of the demulsifier and of the magnetic field on the basis of the viscosity of diesel oil emulsions and water, stabilized by a synthetic emulsifier. Moreover, if the first series of experiments, the emulsion system was stabilized natural stabilizers containing ferromagnetic and paramagnetic centers in the second – active centers apparent with respect to the magnetic field in the system was not.

Authors have conducted numerous experiments on the effect of weak constant and variable magnetic fields to 0,2–0,3 Tesla a dynamic viscosity and surface tension of water and aqueous solutions of molecular nonionic surfactants. Dynamic viscosity was determined from the flow time of the liquid through the capillary and capillary вязкозиметрией, surface tension was measured at a constant temperature in the laboratory stalagmometry. Dc sources were annular electromagnet and permanent ferrite magnet.

*Key words:* low-frequency electromagnetic field, emulsion, demulsifier, viscosity, water cut, the resonance phenomenon.

Известно, что при воздействии магнитного поля жидкости становятся более структурированными, в них увеличивается скорость химических реакций, улучшается коагуляция примесей [1]. Данный эффект связывают с химической поляризацией ядер в магнитном поле и изменением констант скоростей бимолекулярных реакций между частицами с неспаренными электронными спинами и триплетными молекулами [2]. При наложении магнитных полей скорости реакций в жидкой и твердой фазах увеличиваются. Л.М. Бучаченко было установлено, что этот эффект обусловлен особенностями динамики столкновений молекул и влиянием магнитного поля на взаимодействие спинов электронных оболочек реагирующих частиц [2]. Однако этот эффект прекращается сразу же после снятия магнитного поля, и не наблюдается явления «памяти» о магнитной обработке жидкостей [3]. Эффект действия поля объясняется воздействием на частицы, связанные силами Ван-дер-Ваальса. Магнитное поле используют для обработки жидкостей в различных технологических процессах, в частности, в технологиях добычи нефти и очистки воды от минеральных солей. Согласно В.И. Лесину [3, 4] сущность обработки воды, асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) и нефтепромысловых жидкостей заключается в разрушении надмолекулярных агрегатов микрочастиц железа при действии магнитного поля или связана с наличием в нефти парамагнитных частиц. По В.И. Классену [1] магнитное поле, действуя на воду, может разрушать содержащиеся в ней коллоидные частицы: «осколки» образуют центры кристаллизации малорастворимых солей, способствуя их удалению. Ускорение процесса кристаллизации минеральных примесей в воде, прошедшей магнитную обработку, приводит к значительному уменьшению размеров кристаллов солей магния и кальция, в результате чего их отложение снижается. При отсутствии железа в среде действие магнитного поля объясняют его влиянием на сольватную оболочку гидратированных ионов. Кроме того, предполагают, что магнитное поле оказывает воздействие на структуру ассоциатов воды [1].

Несмотря на серьезные теоретические и экспериментальные исследования до сих пор не объяснены механизмы влияния низкочастотного электромагнитного поля (НЭМП) на термодинамическую и агрегативную устойчивость эмульсий типа «масло в воде» и «вода в масле», играющих весьма важную роль в технологических процессах добычи нефти.

Проведенные нами ранее экспериментальные исследования по влиянию НЭМП на процесс термомеханического обезвоживания нефтяных эмульсий [5] показали следующее:

– воздействие поля усиливает действие синтетических деэмульгаторов, а именно: ускоряет процесс разрушения обратных эмульсий, а также способствует более глубокому разделению эмульсий на фазы при меньшей дозировке деэмульгатора;

– без добавления в эмульсию деэмульгатора магнитное поле не влияет на кинетику разделения эмульсий.

В настоящей работе были проведены две серии экспериментов: одна – по оценке влияния НЭМП на кинетику разрушения нефтяных эмульсий Грехинского и Барино-Лебяжинского месторождений, отличающихся высоким содержанием природных эмульгаторов; другая – по определению влияния деэмульгатора и НЭМП на вязкость эмульсий на основе дизтоплива и воды, стабилизированных синтетическим эмульгатором. Причем, если в первой серии экспериментов эмульсионная система была стабилизирована природными стабилизаторами, содержащими ферро- и парамагнитные центры [3, 4], то во второй – явных активных центров по отношению к электромагнитному полю в системе не было.

Результаты первой серии опытов приведены на рисунке 1 и в таблице 1.

Как видно из приведенных результатов, облучение электромагнитным полем частотой 6 Гц в течение 2 секунд позволяет ускорить процесс разрушения эмульсий в присутствии 60 и 100 г/т деэмульгатора – Реапона-4В. При этом холостая проба на воздействие НЭМП не реагирует. Следует отметить, что дозировка деэмульгатора в 60 г/т оказалась более эффективной по сравнению с добавкой 100 г/т, причем как в опытах с электромагнитным воздействием, так и без него.

Изучение влияния времени облучения эмульсии НЭМП на степень водоотделения проводили на примере 48 % эмульсии скв. 8 Барино-Лебяжинского месторождения. При этом установлено, что имеет место два экстремума по степени водоотделения – в 5 и 60 сек – отделение воды составляет 99 и 96 % соответственно (таблица 2). Данное обстоятельство позволяет сделать вывод, что процесс воздействия поля на стабилизированную природными эмульгаторами эмульсию с добавлением деэмульгатора (60 г/т) является быстрым, а два пика по эффективности косвенно указывают на его резонансный характер.

Во второй серии опытов были проведены вискозиметрические определения зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига 50 % эмульсии, полученной из дизтоплива и модели пластовой воды ( $\rho = 1,12$  г/л). В качестве стабилизатора эмульсии использовали эмульгатор Сонэкс М в дозировке

4 %. Эффективную вязкость определяли на ротационном вискозиметре Вискотестер Хааке VT-550 с системой воспринимающих элементов «цилиндр в цилиндре» (рисунок 2).

По представленным на рисунке 2 результатам замеров видно, что добавка 60 г/т деэмульгатора Decleave 1573 практически не сказывается на вязкостные свойства исходной эмульсии. Судя по шка-

ле скорости сдвига, лишь после  $10 \text{ сек}^{-1}$  это влияние существенно. Воздействие НЭМП без деэмульгатора в определенных интервалах скоростей сдвига даже усиливает вязкостные характеристики эмульсии. Одновременное воздействие деэмульгатора и НЭМП с частотой 6 Гц значительно уменьшает вязкость эмульсии во всем измеренном интервале скоростей сдвига.

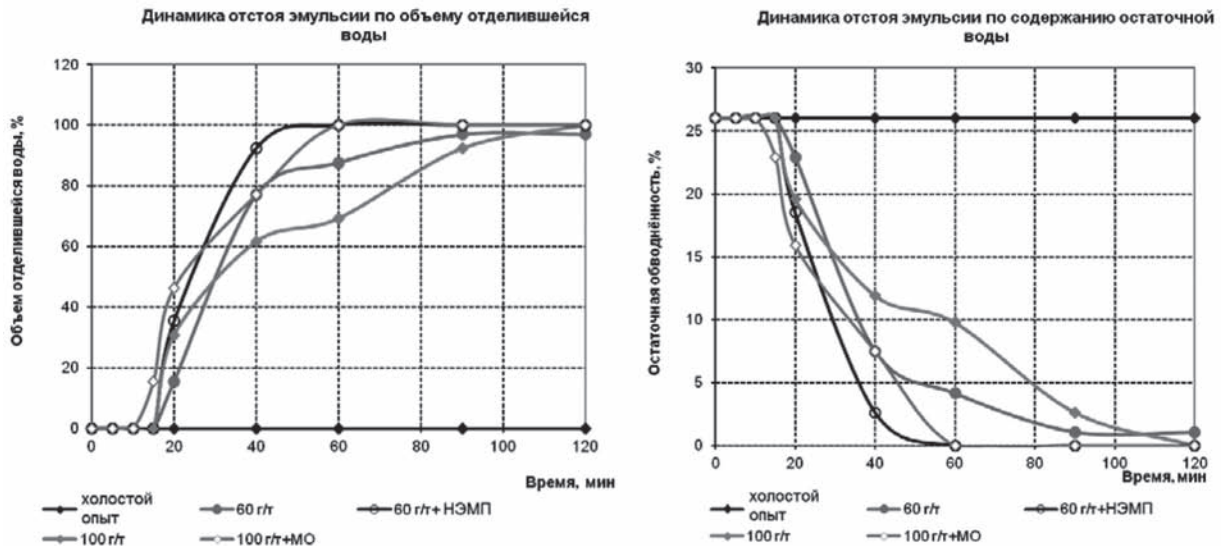


Рис. 1. Кинетика деэмульсации водонефтяной эмульсии Гремихинского месторождения (скважина 965, обводненность 26 %)

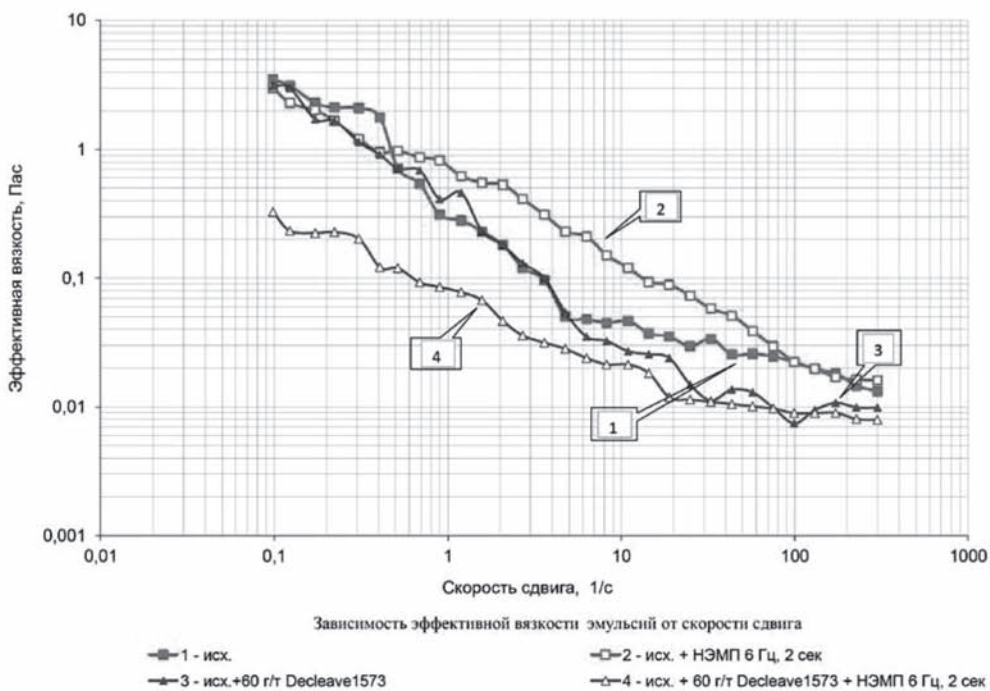


Рис. 2. Зависимость эффективной вязкости эмульсионных систем от скорости сдвига

Таблица 1

Кинетика деэмульсации эмульсии Гремixinского месторождения (скважина 965, обводненность 26 %).  
 Температура опыта 23 °С; объем эмульсии – 25 мл, содержание воды в пробе – 26 %. Дозировка Реагона-4В: 60 и 100 г/т.  
 Условия проведения опыта – статический режим, обработка эмульсии в НЭМП частотой 6 Гц в течение 2 секунд

Холостой опыт				Деэмульгатор в дозировке 60 г/т				Деэмульгатор в дозировке 60 г/т + НЭМП				Деэмульгатор в дозировке 100 г/т + НЭМП			
Время, мин	Отделившаяся вода		Остаточная обводненность, %	Время, мин	Отделившаяся вода		Остаточная обводненность, %	Время, мин	Отделившаяся вода		Остаточная обводненность, %	Время, мин	Отделившаяся вода		Остаточная обводненность, %
	мл	%			мл	%			мл	%			мл	%	
0	0,0	0,0	26,0	0	0,0	0,0	26,0	0	0,0	0,0	26,0	0	0,0	0,0	26,0
5	0,0	0,0	26,0	5	0,0	0,0	26,0	5	0,0	0,0	26,0	5	0,0	0,0	26,0
10	0,0	0,0	26,0	10	0,0	0,0	26,0	10	0,0	0,0	26,0	10	0,0	0,0	26,0
15	0,0	0,0	26,0	15	0,0	0,0	26,0	15	0,0	0,0	26,0	15	0,0	0,0	26,0
20	0,0	0,0	26,0	20	1,0	15,4	22,9	20	2,3	35,4	18,5	20	2,0	30,8	19,6
40	0,0	0,0	26,0	40	5,0	76,9	7,5	40	6,0	92,3	2,6	40	4,0	61,5	11,9
60	0,0	0,0	26,0	60	5,7	87,7	4,1	60	6,5	100,0	0,0	60	4,5	69,2	9,8
90	0,0	0,0	26,0	90	6,3	96,9	1,1	90	6,5	100,0	0,0	90	6,0	92,3	2,6
120	0,0	0,0	26,0	120	6,3	96,9	1,1	120	6,5	100,0	0,0	120	6,5	100,0	0,0

Таблица 2

Оценка влияния времени экспозиции эмульсии НЭМП на степень водоотделения

Исходная эмульсия	Эмульсия + деэмульгатор		Эмульсия + деэмульгатор + 5 сек НЭМП		Эмульсия + деэмульгатор + 10 сек НЭМП		Эмульсия + деэмульгатор + 30 сек НЭМП		Эмульсия + деэмульгатор + 60 сек НЭМП		Эмульсия + деэмульгатор + 180 сек НЭМП	
	Время наблюдения, мин	Степень водоотделения, %	Время наблюдения, мин	Степень водоотделения, %	Время наблюдения, мин	Степень водоотделения, %	Время наблюдения, мин	Степень водоотделения, %	Время наблюдения, мин	Степень водоотделения, %	Время наблюдения, мин	Степень водоотделения, %
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	20	15	16	15	37	15	0	15	46	15	38
	30	22	30	52	30	58	30	26	30	66	30	46
	60	26	60	72	60	76	60	62	60	82	60	50
	90	28	90	84	90	84	90	66	90	90	90	52
	120	30	120	99	120	88	120	78	120	120	120	55



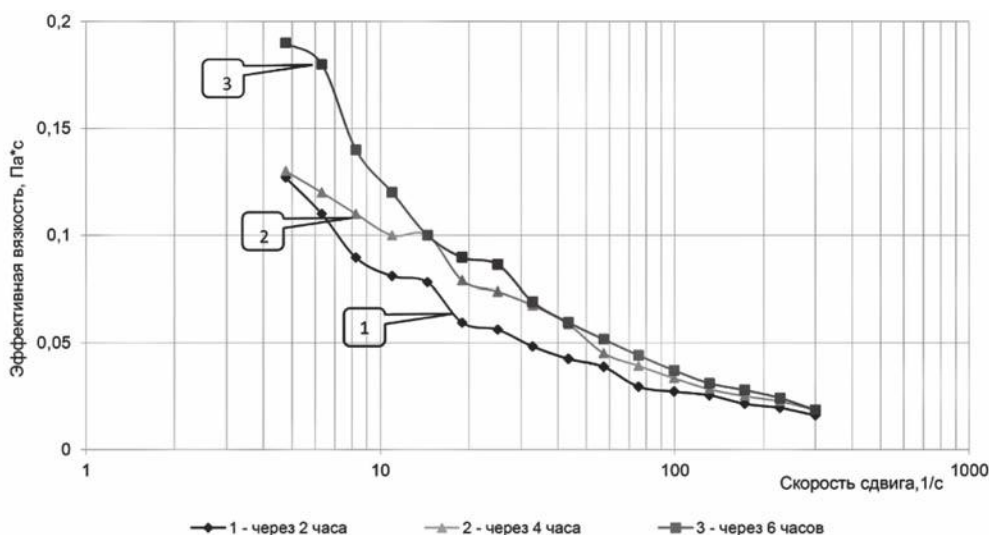


Рис. 3. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига 50 % эмульсии, обработанной деэмульгатором и НЭМП, через 2, 4 и 6 часов

Явление памяти обработанной НЭМП вышеупомянутой эмульсии наблюдали при определении реовязкостных свойств эмульсии, обработанной деэмульгатором и НЭМП, через 2, 4 и 6 часов после облучения. Из рисунка 3 видно, что эффективная вязкость при этом незначительно увеличивается.

Таким образом, одновременное воздействие деэмульгатора и НЭМП способствует более быстрому слиянию капель воды в эмульсии типа «вода в масле», чем только одного деэмульгатора. Необходимо отметить, что в данных опытах видимого воздействия одного НЭМП на обратные эмульсии не было. А при проведении вискозиметрических определений было отмечено даже увеличение структурно-механических свойств эмульсии при определенных скоростях сдвига.

Из приведенных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что имеет место взаимодействие гидрофильной части деэмульгаторов с мицеллярной структурой бронирующих оболочек эмульсии и НЭМП. Поскольку деэмульгаторы представляют собой смесь олигомер-гомологов с блоковыми фрагментами, содержащими полиоксиэтильные и полиоксипропильные части, можно предположить, что роль водородных связей в образовании промежуточных надмолекулярных систем достаточно велика.

В представленной работе в основе выдвигаемой концепции предполагаются следующие положения:

1. Процесс взаимодействия НЭМП с эмульсией адиабатический и резонансный.

2. При взаимодействии электрического вектора плоской электромагнитной волны с диполями слабых водородных связей на границах ПАВ – гидрофильная сольватная оболочка и ядро мицеллы

– ПАВ имеет место адиабатический, ангармонический резонанс водородных связей в эмульсиях.

3. Мицеллы сами становятся источниками НЭМП и дестабилизируют систему.

4. Процесс протекает за время, сравнимое со временем релаксации водородных связей, то есть является быстрым.

Предположим, что генератор электромагнитного излучения энергии  $W$  создает в среде эмульсии НЭМП в виде сферических электромагнитных волн с плотностью потока излучения  $u$ :

$$u = W / cS, \tag{1}$$

где  $c$  – скорость света;  $S$  – площадь поперечного сечения потока радиации.

Показатель переноса энергии излучения – вектор Умова – Пойтинга [6] в такой изотропной среде направлен по фронту электромагнитной волны и равен:

$$\vec{S} = uv\vec{n} = \frac{c}{4\pi} [\vec{E} \vec{H}], \tag{2}$$

где  $E$  и  $H$  – векторы напряженности электрического и магнитного поля. Этот вектор Пойтинга изменяется от нуля до максимального значения. Динамика поля описывается уравнениями Максвелла (3–4), которые имеют вид [6, 7]:

$$S_{\max} = \frac{c}{4\pi} \sqrt{\epsilon} E_0^2, \tag{3}$$

$$\text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t};$$

$$\text{rot}H = j + \frac{\partial D}{\partial t}, \tag{4}$$

где  $B$  – вектор магнитной индукции,  $j$  – плотность токов проводимости,  $D$  – вектор электрической индукции.

Из уравнений Максвелла следует, что колебания вектора магнитного поля создают в среде такое же по частоте колебание электрического поля

$$E = E_0 e^{-i(\omega t - k r)} \quad (5)$$

где  $\omega$  – циклическая частота,  $k$  – волновой вектор поля,  $r$  – вектор смещения химических связей.

Молекула в классической теории рассматривается в виде колеблющегося электрического диполя – системы двух точечных зарядов равной величины с противоположными знаками, расстояние между которыми периодически изменяется [7], поэтому внешнее магнитное поле усиливает колебание диполя химических связей. Согласно гипотезе Шапаронова М.И. [8], созданной на основе данных ультразвуковой спектроскопии, основной вклад в термодинамические свойства водородсодержащих жидкостей вносят водородные связи с энергией от 20 до 100 кДж/моль. Отсюда следует, что водородные связи играют существенную роль в формировании сольватных оболочек и адсорбционного слоя мицелл. Электрическая составляющая поля вызывает периодические колебания системы диполей водородных связей на границах ПАВ – гидрофобная среда и ПАВ – вода.

Очевидно, что при наложении гармоник колебательного движения и взаимодействия осцилляторов эти колебания являются ангармоническими и подчиняются закону колебательного движения ангармонического осциллятора с эффективной массой  $M$  и частотой  $\nu_0$  [9].

Колебательная энергия  $E_{кол}$  соответствует колебательной энергии ядер в поле электронов:  $E_{кол} = U(r - r_e) = k \times (r - r_e)^2$ , где  $r_e = r_1 + r_2$  – длина химической связи, равная сумме эффективных атомных радиусов,  $M = m_1 \times m_2 / (m_1 + m_2)$  – эффективная масса диполя. Динамика колебаний такой системы описывается следующим уравнением [7]:

$$F = M \times \ddot{r}_e = -k \times (r - r_e)^2. \quad (6)$$

Известно, что потенциальная энергия ангармонического осциллятора удовлетворительно аппроксимируется потенциалом Морзе [9]:

$$U(r - r_e) = D[1 - e^{-a(r-r_e)}]^2, \quad (7)$$

где  $U$  – потенциал Морзе;  $a = \text{const}$ , характеризующий форму потенциала;  $D$  – энергия диссоциации при  $r \rightarrow \infty$ ,  $U(r-r_e) \rightarrow D$  при  $r \rightarrow r_e : U(r-r_e) \rightarrow D [1 - a(r-r_e) + \dots]^2$ .

Решение дифференциального уравнения для ангармонического квантового осциллятора [9] дает следующее выражение для колебательной энергии:

$$E_{кол} = (v + 1/2)h\nu_0 - (h^2\nu_0^2) (v + 1/2)^2 / 4D, \quad (8)$$

$v = 0, 1, 2, \dots$  – колебательные квантовые числа;  $\Delta v = 1, 2, 3, \dots$

Очевидно, что слабое по энергии НЭМП может вызвать разрушение сольватного и адсорбционного слоев эмульсии только вследствие явления резонанса. Это возможно, когда колебательная ангармоническая энергия системы водородных связей равна энергии внешнего НЭМП. При этом необходимо затратить энергию поля, равную (9):

$$W = h\nu_0 \left(1 - \frac{h\nu_0}{4D}\right) \left(v + \frac{1}{2}\right). \quad (9)$$

По уравнению (9) проведем расчет энергии диссоциации водородных связей под действием НЭМП частотой  $10^4$  Гц, которая соответствует очень малой энергии, равной  $W = 0,13$  Дж/моль. Несмотря на небольшое значение, сравнимое с тепловой энергией, энергия НЭМП направлена в пространство и вступает в резонанс с системой водородных связей с колебательной частотой  $\nu_0 = 2500 - 3550 \text{ см}^{-1}$ , в отличие от хаотически флуктуирующей по нормальному закону кинетической тепловой энергии.

Значения колебательных частот водородных связей хорошо изучены и приведены в литературе [10] по ИК-спектроскопии (таблица 3).

Таблица 3

Энергия диссоциации водородных связей под действием НЭМП

Частота внешнего магнитного поля, Гц	Колебательная частота ОН...Н связи $\text{см}^{-1}$ ( $\nu_0$ )	Энергия диссоциации, кДж/моль	Примечание
$10^4$	3550	11,67	Прочные связи между молекулами воды
	3500	11,50	
$10^2 - 10^3$	3400	11,18	
	3200	10,52	Менее прочные связи в кислотах и спиртах
	2700	8,87	
	2500	8,23	

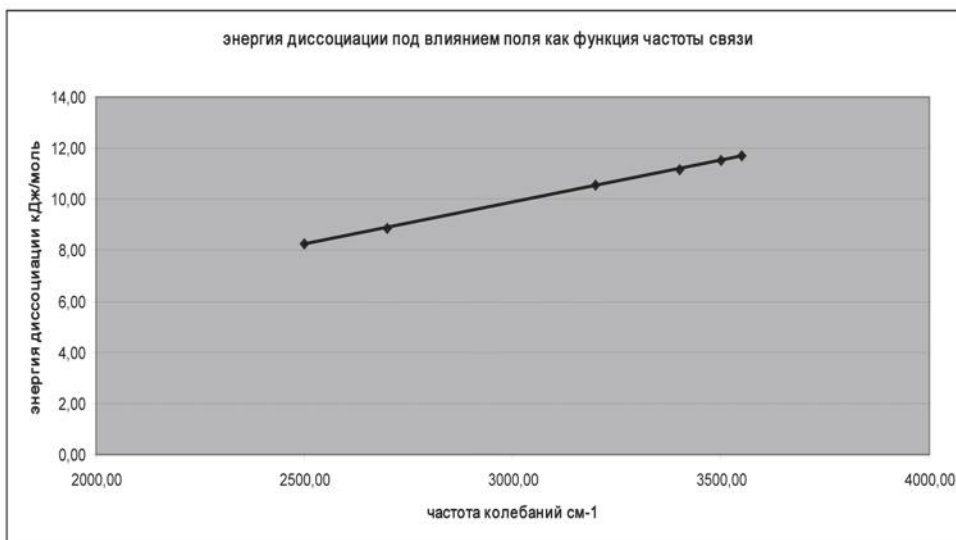


Рис. 4. Зависимость энергии диссоциации от частоты колебаний водородных связей

На рисунке 4 приведена зависимость энергии диссоциации от колебательной частоты водородных связей. Как следует из приведенных данных, зависимость является линейной. Важной особенностью является слабая зависимость энергии диссоциации от частоты магнитного поля. В слабых полях наиболее активны связи с частотами 2500–3200 см<sup>-1</sup>, поэтому эмульсии разрушаются в первую очередь. Поле только инициирует раскачивание колебательной системы, которая диссоциирует с разрушением всей колебательной системы, создавая «эффект домино». Из изложенного выше следует, что в системах, где концентрация водородных связей мала, эффекты слабого магнитного поля будут мало проявляться.

С целью оценки влияния НЭМП на физические параметры истинных растворов были подготовлены системы, включающие только воду и ПАВ. Авторами были проведены многочисленные эксперименты по влиянию слабых постоянных и переменных магнитных полей до 0,2–0,3 Тл на динамическую вязкость и поверхностное натяжение водных растворов неионогенных ПАВ на границе с воздухом и керосином. Динамическая вязкость характеризовалась по времени истечения жидкости через капилляр, поверхностное натяжение измерялось при постоянной температуре в лабораторном стагмометре. Источниками постоянного тока были кольцевой электромагнит и постоянный ферритовый магнит. Установлено, что в пределах точности измерений стандартного лабораторного оборудования влияние магнитного поля на вязкость и поверхностное натяжение растворов незначимо.

Таким образом, источником разрушения эмульсий является резонансное поглощение электриче-

ской составляющей энергии электромагнитного поля, которое приводит к диссоциации водородных связей в сольватной и адсорбционной оболочках дисперсной системы. Резонансно-разрушаемые слабыми магнитными полями дисперсные системы должны включать разнообразие водородных связей. Этому критерию отвечают эмульсии типа «вода в масле», «масло в воде» и микрогетерогенные эмульсии.

Согласно законам электродинамики, колеблющийся диполь является источником электромагнитного поля, меняющегося с частотой его собственных колебаний [7]. Поэтому не исключено, что в процессе действия магнитного поля колеблющиеся водородные связи являются источниками вторичного электромагнитного излучения. Среднее значение энергии, излучаемой осциллятором в единицу времени, описывается уравнением

$$\overline{W} = \frac{16v^4 \pi^4 e^2 a_0^2}{3c^3} = \frac{16\pi^4 v^4}{3c^3} P^2, \quad (10)$$

где  $c$  – скорость света 299 792 458 м·с<sup>-1</sup>;  $e$  – заряд электрона, 1,60218×10<sup>-19</sup> Кл;  $v$  – частота колебаний, Гц;  $a_0, p$  – амплитуда и дипольный момент осциллятора соответственно.

По мере излучения запас энергии диполя уменьшается, что приводит к затуханию колебаний осциллятора, т. е. к уменьшению амплитуды колебаний. Расчет показывает, что вторичное излучение соответствует частоте 10<sup>9</sup> Гц и лежит в метровой области спектра. По-видимому, оно может быть выделено из теплового шума методами фильтрации излучения или Фурье-анализом. Это излучение может поглощаться системой связей и усиливать резонансные процессы разрушения эмульсий.

Роль этого вторичного излучения и его влияние на структурно-химическую компоненту эмульсий еще предстоит исследовать.

#### Список литературы

1. *Классен В.И.* Омагничивание водных систем [Текст] / В.И. Классен. – М.: Химия, 1988. – 240 с.
2. *Бучаченко А.Л.* Магнито-спиновые эффекты в химических реакциях [Текст] / А.Л. Бучаченко, Ю.Н. Молин, Р.З. Сагдеев, К.М. Салихов // Успехи химии. – 1995. – Т. 64. – № 6. – С. 863.
3. *Лесин В.И.* Физико-химические основы нетеплового воздействия электромагнитных и акустических полей на нефть для предотвращения отложений парафинов [Текст] / В.И. Лесин // Нефтяное хозяйство. – 2004. – № 1. – С. 37–39.
4. *Лесин В.И.* Физико-химический механизм обработки воды магнитным полем (The physico-chemical mechanism of water magnetic treatment) [Текст] / В.И. Лесин // Сб. докладов 5-го Международного конгресса «Экватэк». – Москва. – 4–7 июня 2002 г. – С. 371 (на русском и английском языках).
5. *Лесин В.И.* Изменение физико-химических свойств водных растворов под влиянием электромагнитного поля [Текст] / В.И. Лесин, А.Г. Дюнин, А.Я. Хавкин // Журнал физической химии. – 1993. – Т. 67. – № 7. – С. 1561–1562.
6. *Телин А.Г.* О влиянии низкочастотного магнитного поля на деэмульсацию стойких водонефтяных эмульсий [Текст] / А.Г. Телин, И.В. Крестелева, Г.К. Борисов, С.Р. Алимбекова, В.А. Докичев, В.Э. Свирский, Ф.Д. Шайдуллин, З.И. Бурханова // Нефть. Газ. Новации. – № 8. – 2013. – С. 68–72.
7. *Ландау Л.Д.* Электродинамика сплошных сред [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука. – 2005. – 632 с.
8. *Ландау Л.Д.* Теория поля [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 2004. – 512 с.
9. *Шахпаронов М.И.* Механизмы быстрых процессов в жидкостях: Учебное пособие для вузов [Текст] / М.И. Шахпаронов. – М.: Высшая школа, 1980. – 352 с.
10. *Хохлов Р.П.* Введение в нелинейную физику [Текст] / Р.П. Хохлов. – М.: Наука, 1990.
11. *Васильев А.В.* Инфракрасная спектроскопия органических и природных соединений. Учебное пособие [Текст] / А.В. Васильев, Е.В. Гриненко, А.О.

Щукин, Т.Г. Федулina. – СПб: СПбГЛТА, 2007. – С. 15–18.

#### References

1. *Klassen V.I.* Omagnichivanie vodnyh sistem [Tekst] / V.I. Klassen. – M.: Himija – 1988. – 240 s.
2. *Buchachenko A.L.* Magnito-spinovye efekty v himicheskikh reakcijah [Tekst] / A.L. Buchachenko, Ju.N. Molin, R.Z. Sagdeev, K.M. Salihov // Uspehi himii. – 1995. – T. 64. – № 6. – S. 863.
3. *Lesin V.I.* Fiziko-himicheskie osnovy neteplovogo vozdejstvija elektromagnitnyh i akusticheskikh polej na neft' dlja predotvrashhenija otlozhenij parafinov [Tekst] / V.I. Lesin // Neftjanoe hozjajstvo. – 2004. – № 1. – С. 37–39.
4. *Lesin V.I.* Fiziko-himicheskij mehanizm obrabotki vody magnitnym polem (The physico-chemical mechanism of water magnetic treatment) [Tekst] / V.I. Lesin // Sb. dokladov 5-go Mezhdunarodnogo kongressa «Ekvatek». – Moskva. – 4–7 ijunja 2002 g. – S. 371 (na russkom i anglijskom jazykah).
5. *Lesin V.I.* Izmenenie fiziko-himicheskikh svojstv vodnyh rastvorov pod vlijaniem elektromagnitnogo polja [Tekst] / V.I. Lesin, A.G. Djunin, A.Ja. Havkin // Zhurnal fizicheskoj himii. – 1993. – T. 67. – № 7. – S. 1561–1562.
6. *Telin A.G.* O vlijanii nizkochastotnogo magnitnogo polja na dejemul'saciju stojkih vodoneftjanyh jemul'sij [Tekst] / A.G. Telin, I.V. Kresteleva, G.K. Borisov, S.R. Alimbekova, V.A. Dokichev, V.Je. Svirskij, F.D. Shajdullin, Z.I. Burhanova // Neft'. Gaz. Novacii. – № 8. – 2013. – S. 68–72.
7. *Landau L.D.* Elektrodinamika sploshnyh sred [Tekst] / L.D. Landau, E.M. Lifshic. – M.: Nauka. – 2005. – 632 s.
8. *Landau L.D.* Teorija polja [Tekst] / L.D. Landau, E.M. Lifshic. – M.: Nauka, 2004. – 512 s.
9. *Shahparonov M.I.* Mehanizmy bystryh processov v zhidkostjah: Uchebnoe posobie dlja vuzov [Tekst] / M.I. Shahparonov. – M.: Vysshaja shkola, 1980. – 352 s.
10. *Hohlov R.P.* Vvedenie v nelinejnuju fiziku [Tekst] / R.P. Hohlov. – M.: Nauka, 1990.
11. *Vasil'ev A.V.* Infrakrasnaja spektroskopija organicheskikh i prirodnyh soedinenij: Uchebnoe posobie [Tekst] / A.V. Vasil'ev, E.V. Grinenko, A.O. Shhukin, T.G. Fedulina. – Spb: SPbGLTA, 2007. – S. 15–18.

## ОБ АВТОРАХ

*Багманов Валерий Хусаинович*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: tks@ugatu.ac.ru, Россия, г. Уфа.

*Байгускаров Ильяс Салаватович*, научный сотрудник, ООО «Научно-исследовательский институт технических систем «Пилот», e-mail: styskin.andrei@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Бобренёва Юлия Олеговна*, магистрант факультета математики и информационных технологий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Башкирский государственный университет», e-mail: byulyao12@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Борисов Георгий Константинович*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник ООО «РН-УфаНИПИнефть», e-mail: kicmer@bk.ru, Россия, г. Уфа.

*Будилов Виктор Николаевич*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационный и электронный сервис», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Поволжский государственный университет сервиса», e-mail: neugorpower@yandex.ru, Россия, г. Тольятти.

*Бурханова Зайнаб Исмагиловна*, инженер ООО «Уфимский научно-технический центр», e-mail: kicmer@bk.ru, Россия, г. Уфа.

*Виноградова Ирина Леонидовна*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: tks@ugatu.ac.ru, Россия, г. Уфа.

*Власенко Даниил Васильевич*, ассистент кафедры «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», Технологический институт Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», e-mail: vlasenko960@yandex.ru, Россия, г. Таганрог.

*Воловач Владимир Иванович*, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Информационный и электронный сервис», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Поволжский государственный университет сервиса», e-mail: ssunrise@mail.ru, Россия, г. Тольятти.

*Гончарова Татьяна Олеговна*, студентка, Технологический институт Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», e-mail: goncharova\_14@bk.ru, Россия, г. Таганрог.

*Горбунов Антон Сергеевич*, аспирант кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: freizer-anton@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Грахова Елизавета Павловна*, аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: eorlingsbest@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Губайдуллин Ирек Марсович*, д-р физ.-мат. наук, доцент, старш. научн. сотрудник лаборатории математической химии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт нефтехимии и катализа» Российской академии наук, e-mail: irekmars@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Гузев Борис Васильевич*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: borisguzeew@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Докичев Владимир Анатольевич*, д-р хим. наук, профессор, зав. кафедрой «Общая химия», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: dokichev@anrb.ru, Россия, г. Уфа.

*Доломатов Михаил Юрьевич*, канд. техн. наук, д-р хим. наук, профессор кафедры «Физика», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика электронных процессов и наноматериалов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: dolomatov@gmail.com, Россия, г. Уфа.

*Евстафьев Арсений Игоревич*, аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: arseniievst@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Зикий Анатолий Николаевич*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, главный конструктор проекта «Научно-конструкторское бюро моделирующих и управляющих систем», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», e-mail: zikiy50@mail.ru, Россия, г. Таганрог.

*Зламан Павел Николаевич*, ведущий инженер-конструктор, Научно-конструкторское бюро моделирующих и управляющих систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», e-mail: otdel24d@nkbmius.ru, Россия, г. Таганрог.

*Кисмерешкин Сергей Викторович*, аспирант кафедры «Физика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: kicmer@bk.ru, Россия, г. Уфа.

*Коледина Камила Феликсовна*, канд. физ.-мат. наук, доцент, и. о. зав. кафедрой информатики и информационно-коммуникационных технологий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: koledinakamila@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Коньков Александр Николаевич*, начальник сектора Научно-конструкторского бюро моделирующих и управляющих систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», e-mail: ssirotkin1950@mail.ru, Россия, г. Таганрог.

*Кушнир Валентина Геннадьевна*, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Машины, тракторы и автомобили» Костанайского государственного университета им. А. Байтурсынова, e-mail: valkush@mail.ru, Республика Казахстан, г. Костанай.

*Мешков Иван Константинович*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: mik.ivan@bk.ru, Россия, г. Уфа.

*Мухамадиев Айдар Асхатович*, канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: Aidar80@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Новичкова Анастасия Валерьевна*, аспирант лаборатории математической химии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт нефтехимии и катализа Российской академии наук», e-mail: stacy-pm25@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Нугаев Ильдар Фидаилевич*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроника и биомедицинские технологии», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: styskin.andrei@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Нургаянова Ольга Сергеевна*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Вычислительная математика и кибернетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: onurgayanova@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Павлов Сергей Владимирович*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Геоинформационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: psvgis@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Пентегов Игорь Владимирович*, д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела электротермии Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, e-mail: elmag@paton.kiev.ua, Украина, г. Киев.

*Поезжалов Владимир Михайлович*, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и физика», Костанайский государственный университет имени А. Байтурсынова, e-mail: valkush@mail.ru, Казахстан, г. Костанай.

*Рогинская Любовь Эммануиловна*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика», Федеральное го-

государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: elm.ugatu@gmail.com, Россия, г. Уфа.

*Романченко Анатолий Федорович*, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Сервис транспортных систем», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: romanchenko@rambler.ru, Россия, г. Уфа.

*Рудерман Семен Юрьевич*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Вычислительная математика и кибернетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: onurgayanova@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Рябишина Лилия Амировна*, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: ryabli@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Самойлов Александр Сергеевич*, начальник группы ОАО «Газпром газораспределение Уфа», e-mail: al\_ufa@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Сафин Рашид Рафаилович*, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Математика и математическое моделирование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: safin\_rg@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Сафуанова Резеда Мавлетьяновна*, канд. хим. наук, главный специалист ООО «РН-УфаНИПИнефть», e-mail: kicmer@bk.ru, Россия, г. Уфа.

*Сироткин Сергей Леонидович*, канд. техн. наук, ведущий инженер-конструктор, Научно-конструкторское бюро моделирующих и управляющих систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», e-mail: ssirotkin1950@mail.ru, Россия, г. Таганрог.

*Стыскин Андрей Владиславович*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: styskin.andrei@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Телин Алексей Герольдович*, канд. хим. наук, член-кор. РАЕН, заместитель генерального директора ООО «РН-УфаНИПИнефть», e-mail: kicmer@bk.ru, Россия, г. Уфа.

*Третьяк Андрей Андреевич*, студент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», e-mail: tret-a@mail.ru, Россия, г. Таганрог.

*Уразбахтина Нэля Гиндулаевна*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: urazbah@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Ураксеев Марат Абдуллович*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: uma1941@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Хакимьянов Марат Ильгизович*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: hakimyanovmi@gmail.com, Россия, г. Уфа.

*Ялалова Зульфия Ильгизовна*, аспирант кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: yagodka-z@rambler.ru, Россия, г. Уфа.

*Яруллин Ринат Бариевич*, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Машины, аппараты, приборы и технологии сервиса», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: rin.yarullin@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

## ABOUT THE AUTHORS

*Bagmanov Valery Kh.*, dr. sci. tech., professor chair of «Telecommunication systems», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: tks@ugatu.ac.ru, Russia, Ufa.

*Bobreneva Yuliya O.*, undergraduate faculty of «Mathematics and Information Technologies», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Bashkir State University», e-mail: byulyao12@mail.ru, Russia, Ufa.

*Borisov Georgij K.*, cand. sci. tech., senior researcher, LLC «RN-UfaNIPIneft», e-mail: kicmer@bk.ru, Russia, Ufa.

*Budilov Viktor N.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Information and Electronic Service», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Volga Region State University of Service», e-mail: neuropower@yandex.ru, Russia, Togliatty.

*Burhanova Zajnab I.*, engineer, LLC «Ufa Scientific-Technical Center», e-mail: kicmer@bk.ru, Russia, Ufa.

*Byguskarov Ilyas S.*, researcher LLC «Engineering Systems Research institute «Pilot», e-mail: styskin.andrei@yandex.ru Russia, Ufa.

*Dokichev Vladimir A.*, dr. sci. chem, professor, head chair of «General chemistry», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: dokichev@anrb.ru, Russia, Ufa.

*Dolomatov Michail Yu.*, cand. sci. tech., dr. sci. chem, professor chair of «Physics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state university of economics and service», head of the laboratory «Physics of electronic processes and nanomaterials», e-mail: dolomatov@gmail.com, Russia, Ufa.

*Evstafev Arsenii I.*, post-graduate student chair of «Information and measuring technics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: arseniievst@yandex.ru, Russia, Ufa.

*Goncharova Tatyana O.*, student Institute of technology Federal state autonomous educational institution of higher professional education «Southern Federal University», e-mail: goncharova\_14@bk.ru, Russia, Taganrog.

*Gorbunov Anton S.*, post-graduate student chair of «Electromechanics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: freizer-anton@yandex.ru, Russia, Ufa.

*Grakhova Elizaveta P.*, post-graduate student chair of «Telecommunication systems», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: eorlingsbest@mail.ru, Russia, Ufa.

*Gubaidullin Irek M.*, dr. tech. phys.-math., associate professor, senior researcher laboratory «Mathematical chemistry», Federal state budgetary institution of science «Institute of Petrochemistry and Catalysis» Russian academy of sciences, e-mail: irekmars@mail.ru, Russia, Ufa.

*Guzeev Boris V.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Electrical engineering and electrical equipment of enterprises», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: borisguzeew@yandex.ru, Russia, Ufa.

*Hakimyanov Marat I.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Electrical engineering and electrical equipment of enterprises», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: hakimyanovmi@gmail.com, Russia, Ufa.

*Kismereshkin Sergej V.*, post-graduate student chair of «Physics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state university of economics and service», e-mail: kicmer@bk.ru, Russia, Ufa.

*Koledina Kamila F.*, cand. sci. phys.-math., associate professor, head chair of «Computer science and information and communication technology», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state university of economics and service», e-mail: koledinakamila@mail.ru, Russia, Ufa.

*Konkov Aleksandr N.*, head of sector «Scientific design bureau modeling and control systems», Federal state autonomous educational institution of higher professional education «Southern federal university», e-mail: ssirotkin1950@mail.ru, Russia, Taganrog.



*Kushnir Valentina G.*, dr. sci. tech., professor, head chair of «Machinery, tractors and automobiles», Kostanay state university named after A. Baitursynov, e-mail: [valkush@mail.ru](mailto:valkush@mail.ru), Republic of Kazakhstan, Kostanay.

*Meshkov Ivan K.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Telecommunication systems», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: [mik.ivan@bk.ru](mailto:mik.ivan@bk.ru), Russia, Ufa.

*Mukhamadiev Aydar A.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Information and measuring technics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: [Aidar80@mail.ru](mailto:Aidar80@mail.ru), Russia, Ufa.

*Novichkova Anastasiya V.*, laboratory «Mathematical chemistry», Federal state budgetary institution of science «Institute of Petrochemistry and Catalysis» Russian academy of sciences, e-mail: [stacy-pm25@mail.ru](mailto:stacy-pm25@mail.ru), Russia, Ufa.

*Nugaev Ildar F.*, dr. sci. tech., professor chair of «Electronics and biomedical technologies», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: [psvgis@mail.ru](mailto:psvgis@mail.ru), Russia, Ufa.

*Nurgajanova Olga S.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Computational mathematics and cybernetics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: [onurgayanova@yandex.ru](mailto:onurgayanova@yandex.ru), Russia, Ufa.

*Pavlov Sergei V.*, dr. sci. tech., professor chair of «Geographic information systems», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: [psvgis@mail.ru](mailto:psvgis@mail.ru), Russia, Ufa.

*Pentegov Igor V.*, dr. sci. tech., professor, leading researcher department «Electroheat» the E.O.Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: [elmag@paton.kiev.ua](mailto:elmag@paton.kiev.ua), Ukraine, Kiev.

*Poezshalov Vladimir M.*, cand. sci. phys.-math., associate professor chair of «Electric Power and Physics», Kostanay state university named after A. Baitursynov, e-mail: [valkush@mail.ru](mailto:valkush@mail.ru), Казахстан, Republic of Kazakhstan, Kostanay.

*Roginskaya Ljubov E.*, dr. sci. tech., professor chair of «Electromechanics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: [tananda21@yandex.ru](mailto:tananda21@yandex.ru), e-mail: [elm.ugatu@gmail.com](mailto:elm.ugatu@gmail.com), Russia, Ufa.

*Romanchenko Anatoly F.*, dr. sci. tech., associate professor, professor chair of «Service of transport systems», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state university of economics and service», e-mail: [romanchenko@rambler.ru](mailto:romanchenko@rambler.ru), Russia, Ufa.

*Ruderman Semen Yu.*, dr. sci. tech., professor chair of «Computational mathematics and cybernetics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: [onurgayanova@yandex.ru](mailto:onurgayanova@yandex.ru), Russia, Ufa.

*Ryabishina Lilija A.*, cand. sci. tech., senior lecturer chair of «Electrical engineering and electrical equipment of enterprises», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: [ryabli@yandex.ru](mailto:ryabli@yandex.ru), Russia, Ufa.

*Safin Rashit R.*, dr. sci. tech., associate professor, head chair of «Mathematics and mathematical modeling», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state university of economics and service», e-mail: [safin\\_rr@mail.ru](mailto:safin_rr@mail.ru), Russia, Ufa.

*Safuanova Rezeda M.*, cand. sci. chem., main specialist of LLC «RN-UfaNIPIneft», e-mail: [kicmer@bk.ru](mailto:kicmer@bk.ru), Russia, Ufa.

*Samoylov Aleksandr S.*, head of group OJSC «Gazprom gas distribution Ufa», e-mail: [al\\_ufa@mail.ru](mailto:al_ufa@mail.ru), Russia, Ufa.

*Sirotkin Sergei L.*, cand. sci. tech., lead design engineer «Scientific design bureau modeling and control systems», Federal state autonomous educational institution of higher professional education «Southern federal university», e-mail: [ssirotkin1950@mail.ru](mailto:ssirotkin1950@mail.ru), Russia, Taganrog.

*Styskin Andrey V.*, cand. sci. tech., associate professor, associate professor chair of «Electromechanics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: [styskin.andrei@yandex.ru](mailto:styskin.andrei@yandex.ru), Russia, Ufa.

*Telin Aleksej G.*, cand. sci. chem., deputy of general director LLC «RN-UfaNIPIneft», e-mail: [kicmer@bk.ru](mailto:kicmer@bk.ru), Russia, Ufa.

*Tretyak Andrey A.*, student, federal state autonomous educational institution of higher professional education «Southern federal university», e-mail: tret-a@mail.ru, Russia, Taganrog.

*Urakseev Marat A.*, dr. sci. tech., professor chair of «Information and measuring technics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: uma1941@mail.ru, Russia, Ufa.

*Urazbakhina Nelja G.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Electromechanics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: urazbah@mail.ru, Russia, Ufa.

*Vinogradova Irina L.*, dr. sci. tech., professor chair of «Telecommunication systems», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: tks@ugatu.ac.ru, Russia, Ufa.

*Vlasenko Daniil V.*, assistant chair of «Information security of telecommunication systems» Institute of technology federal state autonomous educational institution of higher professional education «Southern Federal University», e-mail: vlasenko960@yandex.ru, Russia, Taganrog.

*Volovach Vladimir I.*, cand. sci. tech., associate professor, head chair of «Information and Electronic Service», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Volga Region State University of Service», e-mail: ssunrise@mail.ru, Russia, Togliatty.

*Yalalova Zulfija I.*, post-graduate student chair of «Electromechanics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: yagodka-z@rambler.ru, Russia, Ufa.

*Yarullin R.B.*, dr. aci. tech., associate professor, prof. chair of «Machines, apparatuses, devices and service technologies», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state university of economics and service», e-mail: rin.yarullin@yandex.ru, Russia, Ufa.

*Zikiy Anatoliy N.*, cand. sci. tech., senior researcher, chief designer of the project «Scientific design bureau modeling and control systems», Federal state autonomous educational institution of higher professional education «Southern federal university», e-mail: zikiy50@mail.ru, Russia, Taganrog.

*Zlaman Pavel N.*, lead design engineer, «Scientific design bureau modeling and control systems», Federal State autonomous educational institution of higher professional education «Southern federal university», e-mail: otdel24d@nkbmius.ru, Russia, Taganrog.

## **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 7.1-2003 или 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: **uop-ugaes@mail.ru**.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельным файлом.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (до 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 ВПО «УГУЭС» электронной версии своей статьи, опубликованной в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы».
10. Графический и табличный материал должен быть представлен в **черно-белом** варианте в приложении к WORD. Например, Microsoft Graph, без использования сканирования; для диаграмм применять различную штриховку, размер шрифта 10 или 11 pt, математические формулы оформляются через редактор формул Microsoft Equation, а их нумерация проставляется с правой стороны. Таблицы, диаграммы, рисунки подписываются 12 шрифтом в правом верхнем углу.
11. Сокращение слов, имен и названий, как правило, не допускается. Разрешаются лишь общепринятые сокращения мер физических, химических и математических величин и терминов и т. д.
12. Поступившие в редакцию статьи в обязательном порядке будут проходить рецензирование. Рецензии отклоненных работ высылаются авторам и содержат аргументированный отказ от публикации. В рецензиях работ, отправленных на доработку, указываются замечания к статье.
13. Все статьи, поступившие в редакцию, в обязательном порядке проходят проверку в системе «Антиплагиат».
14. С аспирантов плата за публикацию не взимается. При отправлении статьи на электронный адрес также необходимо отправить отсканированную справку из аспирантуры, заверенную отделом кадров.

### **Памятка авторам**

В статье настоятельно рекомендуется:

- НЕ использовать табуляцию (клавиша Tab);
- НЕ устанавливать свои стили абзацев (кроме принятых по умолчанию);
- НЕ расставлять автоматические списки (при нумерации строк и абзацев);
- НЕ ставить двойные, тройные и т. д. пробелы между словами.

Рекомендуется применять в статье только один тип кавычек («»).

Помните 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.**



