

ISSN 1999-5458

# Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 4, т. 9, 2013



# Electrical and data processing facilities and systems

№ 4, v. 9, 2013



Подписной индекс:  
91824 в каталоге «Пресса России»  
18064 в каталоге «Почта России»



***Дорогие друзья, наши авторы и читатели!***

*Мы с вами провожаем в историю 2013 год. Для всех нас он был важным и значимым. Хотел бы искренне поблагодарить вас за труд, за вашу работу и ее результат, поблагодарить за доверие и поддержку. Пусть каждый запомнит только светлое и доброе, а весь негатив оставит в уходящем году. И все мы ждем, что новогодняя ночь подарит нам удачу и немного чуда, а оно, как говорят, иногда случается.*

*За столь недолгий срок наш журнал сумел зарекомендовать себя как серьезное научное издание, которое выполняет миссию развития и поддержки лучших традиций российской научной школы. Уходящий год был для нас плодотворным и насыщенным. Мы расширили свою географию по Российской Федерации, заинтересовали зарубежных коллег. Основная миссия нашего журнала – поддержка научных исследований путем распространения инновационных мыслей видных ученых, а также молодых научных деятелей и аспирантов.*

*Мы искренне надеемся, что и в будущем останемся вам интересны и что мы вместе продолжим плодотворное сотрудничество.*

Главный редактор журнала  
«Электротехнические  
и информационные  
комплексы и системы»

Семен Шапиро

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭКОНОМИКИ И СЕРВИСА

УГУЭС

№ 4, т. 9, 2013

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 техн. 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. Чернигов)



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 18064 в объединенном каталоге «Почта России»,

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, 2013

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

Тел.: +7 (347) 228-91-38.

Подписано в печать 02.12.2013 г. Формат 60×80 1/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11. Тираж 1000 экз. Заказ № 135.

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



№ 4, v. 9, 2013

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.Tech., 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 18064 in the integrated catalog of the "Russian Post",  
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, 2013

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

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

Signed for printing 02.12.2013. Format 60×80 1/8. Offset printing. 11 printed pages. Circulation is 1000 copies. Order №. 135.

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>Захарова Н.В., Татевосян А.С.</i> Экспериментальное исследование и математическое моделирование поверхностного эффекта проводника с током в ферромагнитном пазу.....	5
<i>Шабанов В.А., Шарипова С.Ф., Ахметгареев А.А.</i> Влияние частоты вращения на КПД магистрального насоса..	13
<i>Феоктистов Н.А., Феоктистов А.Н.</i> Построение систем светодиодной индикации с аналоговым оптоэлектронным датчиком давления.....	20
<i>Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р.</i> Математическая модель жерновой мельницы с двухсторонним линейным асинхронным двигателем в приводе.....	27
<i>Зикий А.Н., Зламан П.Н., Власенко Д.В.</i> Пятиоктавный синтезатор частот.....	31
<i>Рогинская Л.Э., Рахманова Ю.В., Шапиро С.В.</i> Резонансный преобразователь частоты для питания разрядно-импульсных электротехнологических комплексов.....	36
<i>Кушниц В.Г., Кошкин И.В.</i> Эффективность использования энергии ветра в Костанайской области Северного региона Казахстана в целях генерирования электрической энергии.....	49
<i>Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е.</i> Влияние неравномерности воздушного зазора на ЭДС синхронного генератора переменного тока.....	54
<i>Возмилов А.Г., Андреев Л.Н., Дмитриев А.А., Жеребцов Б.В.</i> Разработка полной методики расчета эффективности очистки воздуха от пыли, микроорганизмов и вредных газов с помощью двухступенчатого мокрого электрофильтра.....	60
<i>Муфтиев С.Р.</i> Особенности проектирования импульсного автотрансформатора системы стабилизации напряжения тяговых подстанций городского электротранспорта.....	66

## Информационные комплексы и системы

<i>Ефанов В.Н., Китабов А.Н.</i> Синтез структуры системы диагностики технического состояния погружного электрооборудования на основе IDEF-технологии.....	69
<i>Коллегаев Ю.Б.</i> Использование отрезка длиной линии для определения положения границ раздела компонентов многофазных водонефтяных смесей.....	76
<i>Артюшенко В.М., Самаров К.Л.</i> Конструирование двухмерных коррелированных моделей аддитивных и мультипликативных негауссовских помех.....	83
<i>Берг О.И., Ураксеев М.А., Баженов И.А.</i> Расчет и исследование статической характеристики преобразователя перемещений с магнитными метками.....	93
<i>Васильев А.Н., Осипов В.П., Сивакова Т.В.</i> Сетевая компьютерная лаборатория (СКЛ) как распределенная научно-образовательная среда прикладного моделирования.....	100
<i>Павлов С.В., Давлетбакова З.Л., Абдуллин А.Х.</i> Информационная система поддержки принятия решений по управлению отходами на территории Республики Башкортостан на основе базы нечетких знаний.....	113
<i>Журавлева Н.А., Долматов М.Ю., Мартынов В.В., Филосова Е.И., Ширяев О.В., Швецов А.И.</i> Информационная система оценки и прогнозирования уровня социальной напряженности.....	121
<i>Шулаева Е.А., Даминев Р.Р., Исламутдинова А.А.</i> Особенности создания имитационно-моделирующих комплексов распространенных нефтехимических процессов на примере процесса синтеза винилацетата.....	127
<i>Давыдов А.И., Мухамадиев А.А.</i> Моделирование оптической системы акустооптического преобразователя для информационно-измерительных и телекоммуникационных систем.....	135
<i>Шапиро С.В., Муфтиев С.Р.</i> Моделирование системы стабилизации напряжения тяговых подстанций городского электротранспорта в среде OrCAD 9.2.....	140

## Нанoeлектроника и квантовые информационные системы

<i>Денисова О.А., Скалдин О.А.</i> Пьезоэлектрический эффект в жидких кристаллах.....	145
<i>Долматов М.Ю., Латыпов К.Ф.</i> Нарушение квантового принципа ортогональности в атомных системах.....	153
<b>Об авторах</b> .....	162
<b>Список статей, изданных в 2013 году</b> .....	169

# CONTENT

## Electrical facilities and systems

<i>Zacharova N.V., Tatevosyan A.S.</i> Experimental investigation and mathematical modeling of surface effect in current conductor, located in ferromagnetic groove.....	5
<i>Shabanov V.A., Sharipova S.F., Ahmetgareev A.A.</i> Effect of speed on the efficiency of the main pump.....	13
<i>Feoktistov N.A., Feoktistov A.N.</i> Design and construction of the LED display with analog optoelectronic sensor pressure	20
<i>Aipov R.S., Nugumanov R.R.</i> The mathematical model of millstone devices with linear induction motor in drive .....	27
<i>Zikiy A.N., Zlaman P.N., Vlasenko D.V.</i> Five-octaves frequency synthesizer .....	31
<i>Roginskaya L.E., Rakhmanova Yu.V., Shapiro S.V.</i> The resonant converter of frequency for discharging pulse electrotechnological complexes.....	36
<i>Kushnir V.G., Koshkin I.V.</i> The efficiency of wind energy in the Kostanai region of North Kazakhstan region for the generation of electrical energy .....	49
<i>Ismagilov F.R., Khayrullin I.Kh., Vavilov V.E.</i> Effect of non-uniform air on EMF synchronous ac generator.....	54
<i>Vozmilov A.G., Andreev L.N., Dmitriev A.A., Zherebtsov B.V.</i> Working full methods of calculating efficiency of air filtrations against dust, microorganisms and harmful gases with the two-stage wet electrostatic filter.....	60
<i>Muftiev S.R.</i> Design features of the pulse transformer voltage stabilization of city electric transport traction substations .....	66

## Data processing facilities and systems

<i>Efanov V.N., Kitabov A.N.</i> Synthesis of the structure of finding the technical state electric immersion IDEF-based technology.....	69
<i>Kolegaev Yu.B.</i> The use of a segment of a long line to determine the position of the interfaces of the components of multiphase oil-water mixtures.....	76
<i>Artuschenko V.M., Samarov K.L.</i> The construction of the correlated two-dimensional models for the additive and for the multiplicative non-gaussian interferences .....	83
<i>Berg O.I., Urakseev M.A., Bazhenov I.A.</i> Teristics of displacement transducer with magnetic marks .....	93
<i>Vasilyev A.N., Osipov V.P., Sivakova T.V.</i> Network computer lab (NCL) as the distributed scientifically-educational environment of the applied information modeling .....	100
<i>Pavlov S.V., Davletbakova Z.L., Abdullin A.Kh.</i> Information system of decision-making support on waste management within the territory of the Republic of Bashkortostan .....	113
<i>Zhuravleva N.A., Dolomatov M.Yu., Martynov V.V., Filosova E.I., Shiryayev O.V., Shvetsov A.I.</i> Information system of an assessment and forecasting of social tension level.....	121
<i>Shulaeva E.A., Daminev R.R., Islamutdinova A.A.</i> Features of imitational modeling complex prevalent petrochemical processes on the example of vinyl acetate synthesis.....	127
<i>Davidov A.I., Mukhamadiev A.A.</i> Optical system modeling of acousto-optic switching transducer for Information-measuring and telecommunication systems.....	135
<i>Shapiro S.V., Muftiev S.R.</i> Modeling of the system of stabilization of voltage of traction substations of city electric transport in the system OrCAD 9.2.....	140

## Nanoelectronics and quantum data systems

<i>Denisova O.A., Scaldin O.A.</i> Piezoelectric effect in liquid crystals .....	145
<i>Dolomatov M.Yu., Latypov K.F.</i> Violation of orthogonal quantum principles in atomic systems .....	153
<b>About the authors</b> .....	165
<b>List of articles published in 2013</b> .....	172

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS



**Захарова Н.В.**  
**Zacharova N.V.**

кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Детали машин» ФГБОУ ВПО «Омский  
государственный технический университет»,  
Россия, г. Омск



**Татевосян А.С.**  
**Tatevosyan A.S.**

кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Теоретическая и общая  
электротехника» ФГБОУ ВПО «Омский  
государственный технический  
университет», Россия, г. Омск

УДК 621.313

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА ПРОВОДНИКА С ТОКОМ В ФЕРРОМАГНИТНОМ ПАЗУ

В статье приведены результаты экспериментального исследования электромагнитного поля в ферромагнитном пазу на основе разработанного лабораторного стенда, оснащенного аппаратно-программным измерительным комплексом, и численного моделирования переменного электромагнитного поля с помощью комплекса программ Elcut 5.6 (профессиональная версия).

В состав лабораторного стенда входят:

- физическая модель паза в виде штампованных листов трансформаторной стали, стянутых болтами. Глубина паза – 50 мм, ширина – 5 мм. В ферромагнитном пазу расположена медная шина (проводник), площадь поперечного сечения проводника  $50 \times 2,5 \text{ мм}^2$ ;
- силовая часть – это понижающий трансформатор, гибкий токопровод, токоограничивающее сопротивление (нагревательный элемент, изготовленный из нихрома, охлаждаемый вентилятором), сетевой выключатель;
- измерительная часть – аппаратно-программный измерительный комплекс с разработанным программным приложением «Поверхностный эффект в ферромагнитном пазу» в среде визуального программирования Borland Delphi 7.0, связанный через технологию ActiveX со средой LabVIEW, USB-осциллограф VM8020, миллитесламетр ТПУ-02, измерительная катушка, цифровой вольтметр, трансформатор тока (ТТ), измерительное сопротивление (датчик тока).

Реализована методика определения плотности тока в сечении проводника путем измерения индукции магнитного поля при погружении двух типов датчиков (бескаркасная тонкая измерительная катушка и датчик Холла цифрового миллитесламетра) на различную глубину внутрь паза. Использование измерительной катушки в качестве датчика позволяет получить распределение плотности тока по высоте проводника через процедуру интегрирования напряжения, пропорционального наведенной в измерительной

катушке ЭДС, используя цифровой интегратор, построенный в среде LabVIEW. Измерение индукции магнитного поля датчиком Холла цифрового миллитесламетра в лабораторном стенде позволяет выполнить поверку измерительной катушки и определить надежность результатов экспериментального исследования.

С помощью программно-измерительного комплекса на лабораторном стенде получено распределение плотности тока и магнитной индукции по высоте проводника в ферромагнитном пазу. Результаты экспериментального исследования поверхностного эффекта сопоставлены с результатами расчета переменного магнитного поля проводника с током в ферромагнитном пазу в комплексе программ Elcut 5.6, определены активное и индуктивное сопротивления проводника на промышленной частоте.

*Ключевые слова:* поверхностный эффект, ферромагнитный паз, проводник с током, магнитное поле, плотность тока в проводнике.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND MATHEMATICAL MODELING OF SURFACE EFFECT IN CURRENT CONDUCTOR, LOCATED IN FERROMAGNETIC GROOVE

The results of an experimental study of the electromagnetic field in a ferromagnetic groove on the basis of the developed laboratory bench, equipped hardware and software measuring complex, and numerical simulation of an alternating electromagnetic field through program's complex Elcut 5.6 (professional version) are in the article.

The structure of the laboratory bench are:

- a physical model of the groove is strapped of bolts extruded sheets of transformer steel. The depth of the groove is 50 mm, it's width – 5 mm. Copper bar ( conductor) is located in a ferromagnetic slot, conductor's cross-sectional area is 50 x 2,5 mm<sup>2</sup>;
- power section is a step-down transformer, a flexible conductor, current-limiting resistor (fan cooled nichrom's heating element), a network switch;
- measuring part – hardware and software measuring complex with the developed software application "Surface effect in a ferromagnetic slot" in a visual programming environment Borland Delphi 7.0 that is associated through technology ActiveX with area of LabVIEW, USB oscilloscope BM8020, milliteslametr TPU-02, pickup coil, digital voltmeter, a current transformer (TT), measuring resistance (current sensor).

Implemented method for determining the current density in the cross section of the conductor by measuring the magnetic field immersion of two sensor types (frameless thin pickup coil and Hall sensor digital milliteslametra) at different depths inside the groove. Using as a measuring coil in the sensor can obtain the current density distribution adjustment of the conductor through the integration procedure voltage proportional to the induced electromotive force in the measuring coil from the digital integrator, built in the medium LabVIEW. Measuring the magnetic field Hall effect sensor digital milliteslametra in laboratory bench allows you to perform verification of the measuring coil and determine the reliability of the results of the pilot study.

With the help of software and measuring complex on a laboratory bench, the distribution of current density and magnetic induction on the height of the ferromagnetic conductor groove. The results of experimental studies of the surface effect compared with the results of calculation of the alternating magnetic field of a conductor with a current in the ferromagnetic groove in complex programs Elcut 5.6, determined active and inductive resistance of the conductor at the power frequency.

*Key words:* surface effect, ferromagnetic groove, carrying conductor, the magnetic field, the current density in the conductor.

Задача изучения поверхностного эффекта в проводнике с током, расположенном в ферромагнитном пазу, относится к числу основных электротехнических задач, связанных с исследованием магнитного поля переменных токов. Несмотря на академичность представления задачи в учебных целях, ее решение имеет важное практическое значение. Сложность математического аппарата, при-

меняемого для решения задачи, не позволяет аналитическими методами обеспечить приемлемую точность инженерных расчетов [1]. В полной мере исследование поверхностного эффекта в ферромагнитном пазу может быть достигнуто совершенствованием программ численного расчета электромагнитных полей и физическим моделированием.

Данная статья посвящена разработке лабора-



торного стенда и аппаратно-программного измерительного комплекса (АПИК) для исследования поверхностного эффекта в ферромагнитном пазу. Дано сопоставление экспериментальных данных, полученных на лабораторном стенде, с результатами математического моделирования переменного магнитного поля в пазу с помощью комплекса программ Elcut 5.6 (профессиональная версия) [2].

Внедрение новых информационных технологий в измерительной технике качественно меняет состояние вопроса об экспериментальных методах исследования поверхностного эффекта в ферромагнитном пазу благодаря внедрению недорогих компонентов оборудования, имеющих собственное программное обеспечение, таких как, например, USB-осциллограф и лабораторные виртуальные приборы, разработанные в среде LabView [3].

В состав лабораторного стенда (рис. 1) входят:

- физическая модель паза в виде штампованных листов трансформаторной стали, стянутых болтами. Глубина паза  $h = 50$  мм, ширина  $b = 5$  мм. В ферромагнитном пазу расположена медная шина (проводник), площадь поперечного сечения проводника  $S_{\text{пр}} = 50 \times 2,5$  мм<sup>2</sup>;

- силовая часть – это понижающий трансформатор, гибкий токопровод, токоограничивающее сопротивление  $R_{\text{огр}}$  (нагревательный элемент, изготовленный из нихрома, охлаждаемый вентилятором), выключатель для сети переменного напряжения 220 В;

- измерительная часть (АПИК) – это ПК с разработанным программным приложением, USB-осциллограф VM8020, миллитесламетр ТПУ-02, измерительная катушка, цифровой вольтметр, трансформатор тока (ТТ) с коэффициентом трансформации  $K = 60/1 = 60$ , измерительное сопротивление  $R_{\text{изм}} = 0,1$  Ом (датчик тока).

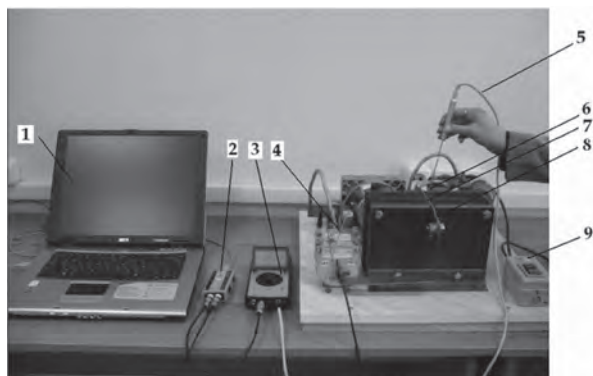


Рис. 1. Внешний вид лабораторного стенда: 1 – ПК; 2 – USB-осциллограф; 3 – цифровой миллитесламетр; 4 – трансформатор тока; 5 – сигнальный кабель; 6 – датчик Холла; 7 – ферромагнитный паз; 8 – медная шина с током; 9 – выключатель

Методика определения плотности тока в сечении проводника основывается на измерении индукции магнитного поля на поверхности проводника при погружении датчика на различную глубину внутри паза. Для этого в лабораторном стенде имеются два типа датчика, а именно:

- бескаркасная тонкая (толщиной менее 0,5 мм) измерительная катушка, изготовленная в виде вытянутой по длине паза прямоугольной рамки площадью  $5 \times 50$  мм<sup>2</sup>, имеющая небольшое число витков ( $w = 40$ ), сечением провода 0,2 мм<sup>2</sup>;
- датчик Холла (измерительный зонд) цифрового миллитесламетра.

Использование измерительной катушки в качестве датчика позволяет получить распределение плотности тока по высоте проводника через процедуру интегрирования напряжения, пропорционального наведенной в измерительной катушке ЭДС, с помощью аналогового или цифрового интегратора. Цифровой метод интегрирования напряжения на выводах измерительной катушки с помощью USB-осциллографа и виртуального интегратора, построенного в среде LabVIEW для ПК, является предпочтительным по повышению точности измерений. Работа с датчиком Холла в ферромагнитном пазу вносит дополнительные сложности, связанные с возможностью его случайной механической деформации и повреждения. Вместе с тем измерение индукции магнитного поля датчиком Холла цифрового миллитесламетра в лабораторном стенде позволяет выполнить проверку измерительной катушки и определить надежность экспериментального исследования.

На рис. 2 представлена электрическая схема лабораторного стенда.

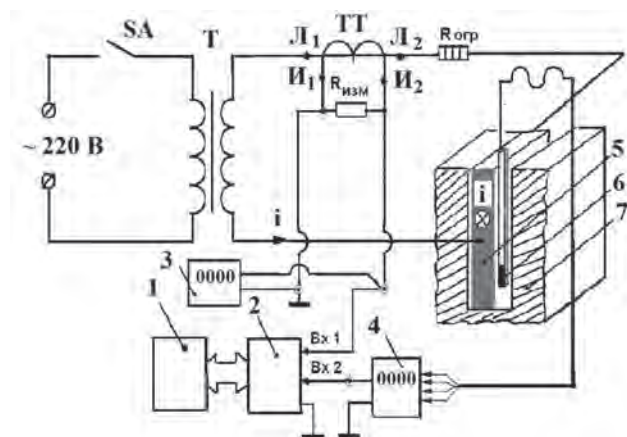


Рис. 2. Электрическая схема лабораторной установки по исследованию поверхностного эффекта в ферромагнитном пазу: 1 – ПК; 2 – USB-осциллограф; 3 – цифровой вольтметр; 4 – цифровой миллитесламетр; 5 – медная шина с током; 6 – датчик Холла; 7 – ферромагнитный паз

Программное приложение «Поверхностный эффект в ферромагнитном пазу» АПИК разработано в среде визуального программирования BorlandDelphi 7.0, связанной через технологию ActiveX со средой LabVIEW [4]. В программном приложении предусмотрено, что ток в проводнике, расположенном в ферромагнитном пазу, определяется по напряжению на измерительном сопротивлении  $R_{изм}$ , которое передается на вход  $V_{x1}$  (канал А) USB-осциллографа. На вход  $V_{x1}$  (канал В) USB-осциллографа поступает напряжение с цифрового миллесексметра, оснащенного датчиком Холла, или напряжение с измерительной катушки, используемой в качестве датчика индукции магнитного поля. Период квантования сигнала в программном обеспечении USB-осциллографа задается из условия, чтобы число точек на периоде составляло не менее 200, например, при частоте сигнала 50 Гц период квантования должен быть не более 0,1 мс. Данные на ПК поступают напрямую через стандартный высокоскоростной USB-порт. При использовании в качестве датчика магнитной

индукции измерительной катушки в программном приложении используется цифровое интегрирование напряжения на катушке с помощью построенного в среде LabVIEW виртуального интегратора (рис. 3).

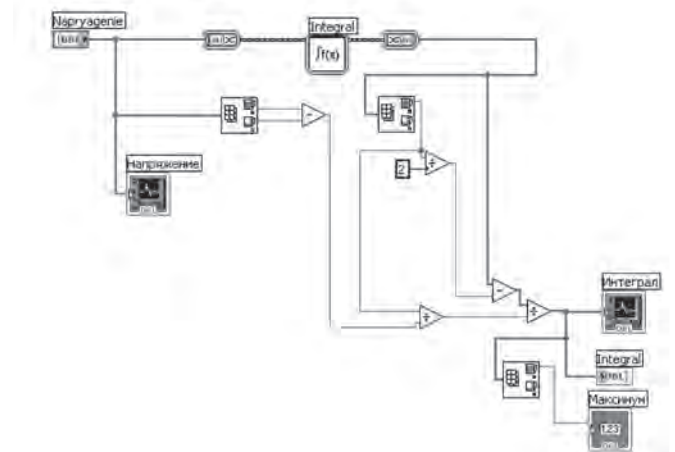


Рис. 3. Цифровой интегратор

Рабочее окно программного приложения приведено на рис. 4.

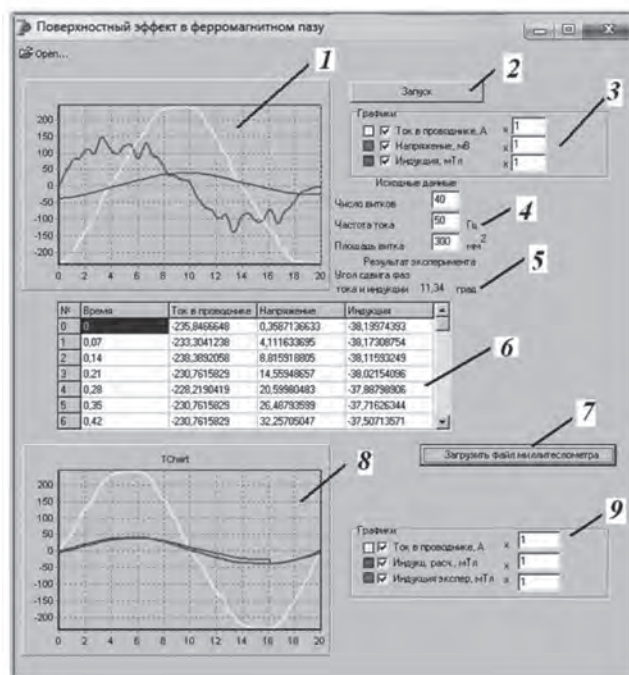


Рис. 4. Рабочее окно программного приложения «Поверхностный эффект в ферромагнитном пазу»

На рисунке даны следующие обозначения:

- 1 – временные зависимости тока, напряжения на измерительной катушке и индукции магнитного поля;
- 2 – запуск интегратора в среде LabVIEW;
- 3, 9 – изменение масштабов графиков (1, 8);
- 4 – задание параметров измерительной катушки;
- 5 – угол сдвига фаз между током в проводнике и индукцией магнитного поля  $V_x(t)$ ;
- 6 – данные АЦП на выделенном периоде;

7 – загрузка текстового файла с измеренными датчиком Холла во времени мгновенными значениями индукции магнитного поля;

8 – сравнение временных зависимостей индукции магнитного поля, полученных разными типами датчиков.

Блочная структурная схема разработанного программного приложения АПИК приведена на рис. 5.

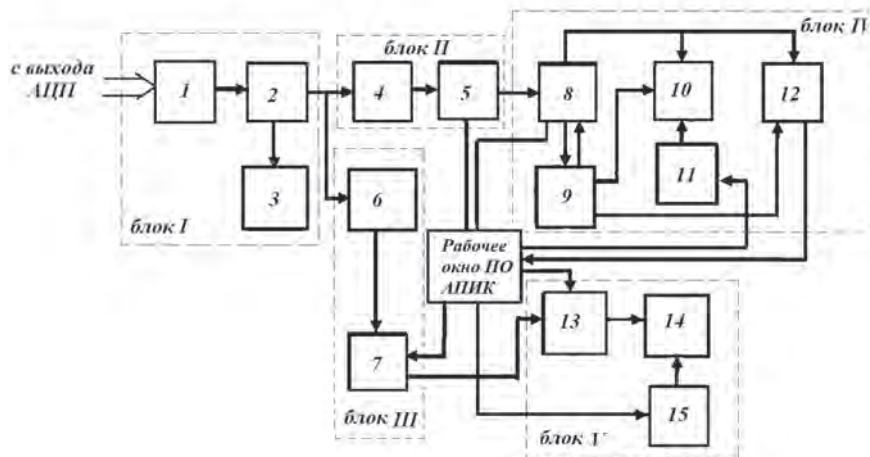


Рис. 5. Блочная структурная схема программного приложения «Поверхностный эффект в ферромагнитном пазу»

Здесь блок I означает внешние технические и программные средства: 1 – USB-порт ПК; 2 – программное обеспечение USB-осциллографа; 3 – экран монитора ПК.

Блок II – это процедуры, преобразующие данные с USB-осциллографа, полученные с использованием измерительной катушки: 4 – считывания из файла; 5 – выделения периода.

Блок III – это процедуры, преобразующие данные с USB-осциллографа, полученные с использованием датчика Холла: 6 – считывания из файла; 7 – выделения периода.

Блок IV – программное приложение для обработки экспериментальных данных, полученных с использованием измерительной катушки: 8 – процедура создания текстового файла с сохраненными данными на жестком диске (HDD) тока, напряжения на измерительной катушке и индукции магнитного поля с помощью виртуального интегратора в среде LabVIEW; 9 – цифровой интегратор напряжения; 10 – процедуры построения временных зависимостей тока в проводнике, напряжения на измерительной катушке и магнитной индукции при фиксированной глубине погружения датчика внутрь паза; 11 – процедуры масштабирования графиков тока, напряжения на выводах измерительной катушки и индукции магнитного поля с целью удобного просмотра результатов опыта; 12 – процедура вычисления угла сдвига фаз между временными зависимостями тока в проводнике и индукции магнитного поля в исследуемой точке на поверхности проводника.

Блок V – это процедуры сравнения измеренных значений индукции магнитного поля датчиком Холла и измерительной катушкой: 13 – процедура создания текстового файла с заданием одинаковой точки отсчета времени для построения временных зависимостей тока и индукции магнитного поля;

14 – процедуры построения временных зависимостей тока в проводнике и индукции магнитного поля; 15 – процедуры масштабирования временных зависимостей тока и индукции магнитного поля на поверхности проводника при фиксированной глубине погружения датчика в паз.

Распределение плотности тока  $J_z(y, t)$  по высоте проводника находится из выражения

$$J_z(y, t) = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dB_x(y, t)}{dy}.$$

Приближенно процедуру взятия производной в этом выражении можно заменить вычислением конечных разностей, тогда

$$J_m(y) \approx -\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B_m(y)}{\Delta y},$$

где  $\Delta B_m(y)$  – разность амплитудных значений магнитной индукции в точках, отстоящих друг от друга на расстоянии  $\Delta y$  по высоте проводника;  $J_m(y)$  – амплитудное значение плотности тока в сечении проводника.

Результаты физического моделирования поверхностного эффекта в ферромагнитном пазу при различных глубинах погружения измерительной катушки и датчика Холла внутри паза представлены в рабочем окне программного приложения АПИК (рис. 6).

На рис. 6 временные диаграммы соответствуют кривым: 1 – току в проводнике (А); 2 – напряжению на выводах измерительной катушки (мВ); 3 – индукции магнитного поля (мТл). Здесь же приводятся значения угла сдвига фаз между временными зависимостями тока и индукции магнитного поля при различных положениях измерительной катушки внутри паза.

Сравнение опытных данных, полученных разными типами датчиков, в рабочем окне программного приложения АПИК (рис. 7) показывает, что

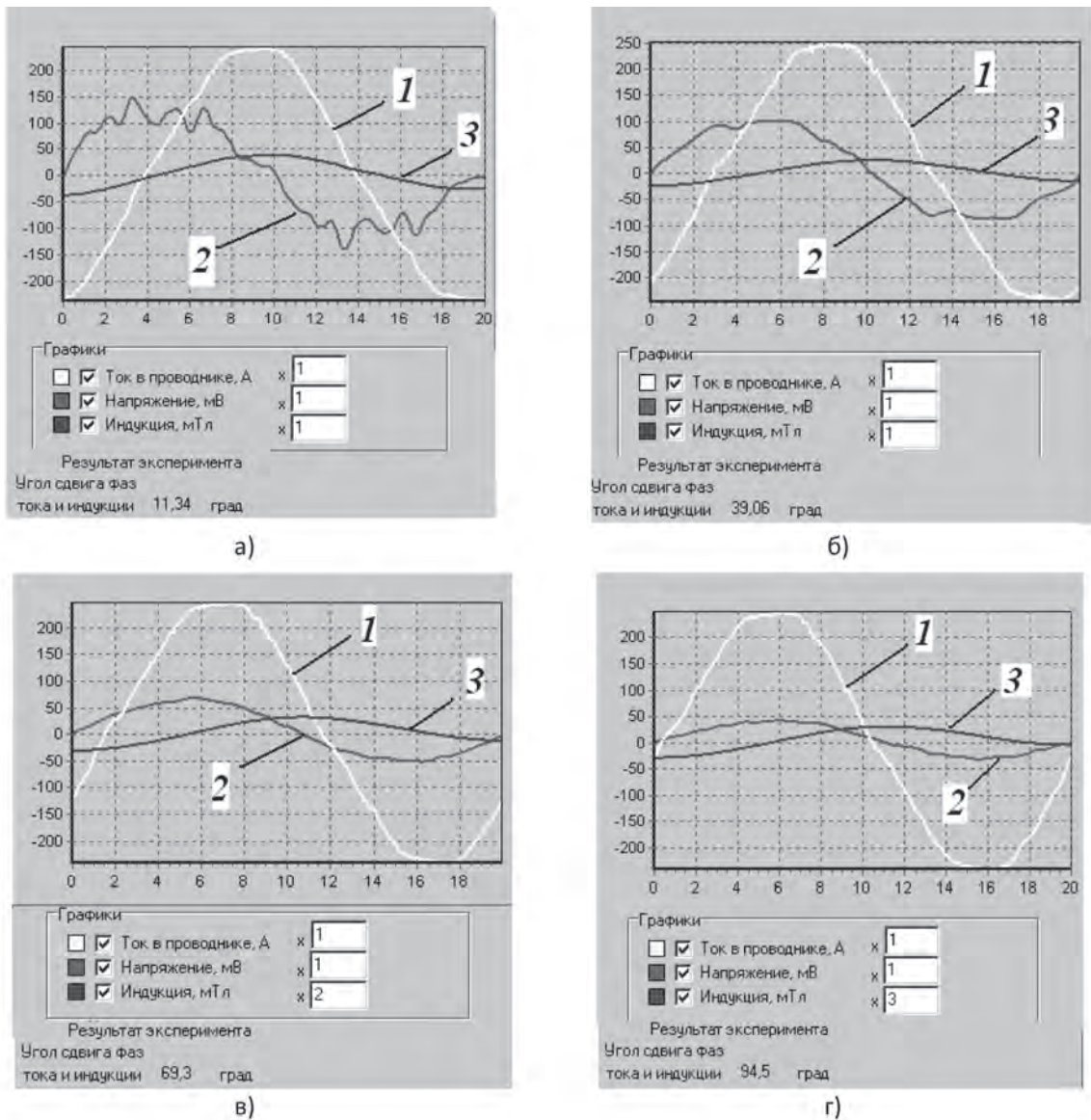


Рис. 6. Экспериментальное исследование поверхностного эффекта при различной глубине погружения измерительной катушки в паз: а – 5 мм; б – 15 мм; в – 25 мм; г – 35 мм

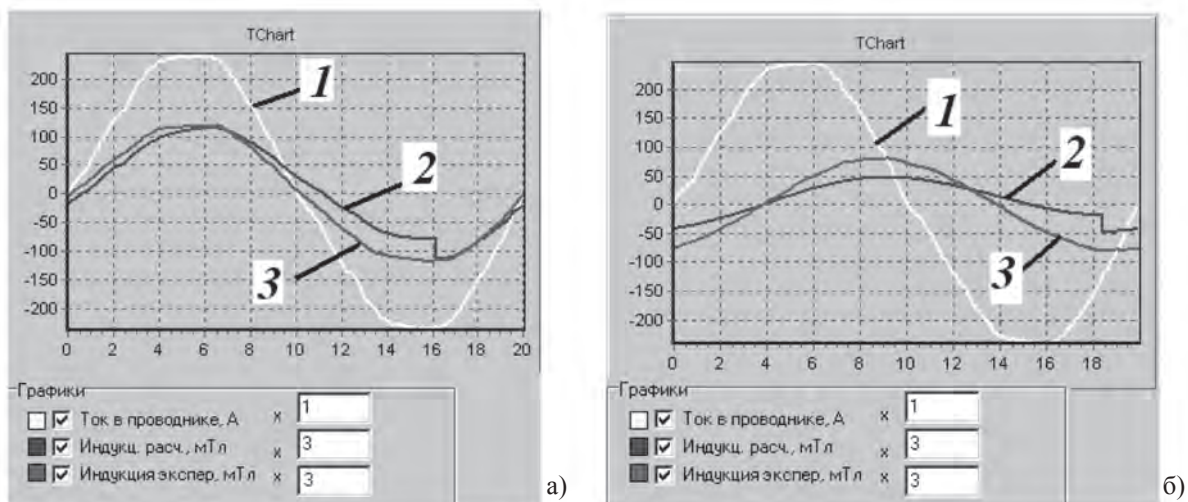


Рис. 7. Экспериментальные временные зависимости тока (кривая 1) и индукции магнитного поля, полученные измерительной катушкой (кривая 2) и датчиком Холла (кривая 3), при погружении датчика в паз на различную глубину: а – 5 мм; б – 35 мм (коэффициент масштабирования кривых 2 и 3 магнитной индукции равен 3:1)

измерение индукции магнитного поля с помощью измерительной катушки достоверно отражает физическую картину поверхностного эффекта проводника с током в ферромагнитном пазу (на графиках начало отсчета времени соответствует моменту перехода тока через нулевое значение).

Экспериментальные исследования поверхностного эффекта, выполненные на лабораторном стенде, дополняют результаты численного расчета переменного магнитного поля в комплексе программ Elcut 5.6 (плоская модель). Геометрия модели представлена на рис. 8 (все размеры указаны в миллиметрах).

Используемые исходные данные для расчета магнитного поля в пазу:

- относительная магнитная проницаемость воздуха  $\mu=1$ ;

- относительная магнитная проницаемость меди  $\mu=1$ ;
- относительная магнитная проницаемость стали  $\mu=1000$ ;
- электропроводность меди  $\sigma = 57 \cdot 10^6$  См/м;
- электропроводность стали  $\sigma = 0$  См/м (вихревые токи в шихтованном массиве стали пренебрежимо малы);
- действующее значение тока в проводнике  $I = 240$  А;
- частота тока  $f = 50$  Гц.

На границе расчетной области задаются нулевые граничные условия Дирихле, то есть магнитный потенциал  $A=A_0=0$  Вб/м.

Результаты расчета переменного магнитного поля в пазу приведены на рис. 8.

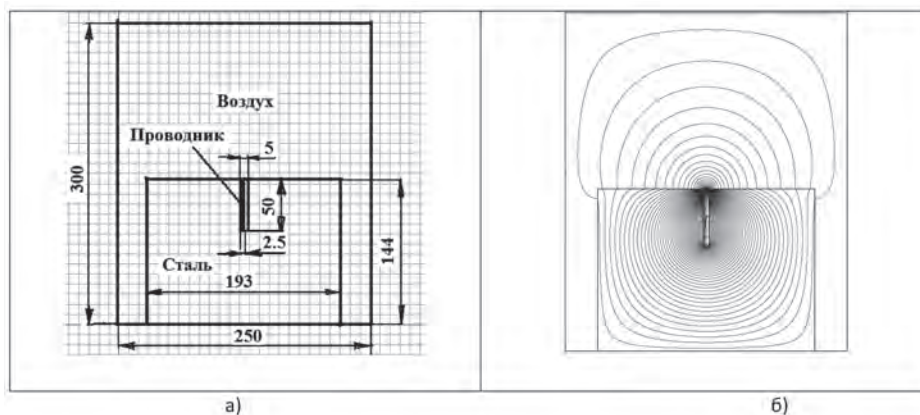


Рис. 8. Расчет переменного магнитного поля в ферромагнитном пазу: а – геометрия модели; б – картина силовых линий магнитного поля в расчетной области

Результаты расчета действующих значений индукции магнитного поля и плотности тока в проводнике в точках, отстоящих на различном удалении

от поверхности паза (в направлении, указанном стрелкой на картине магнитного поля), приведены на рис. 9.

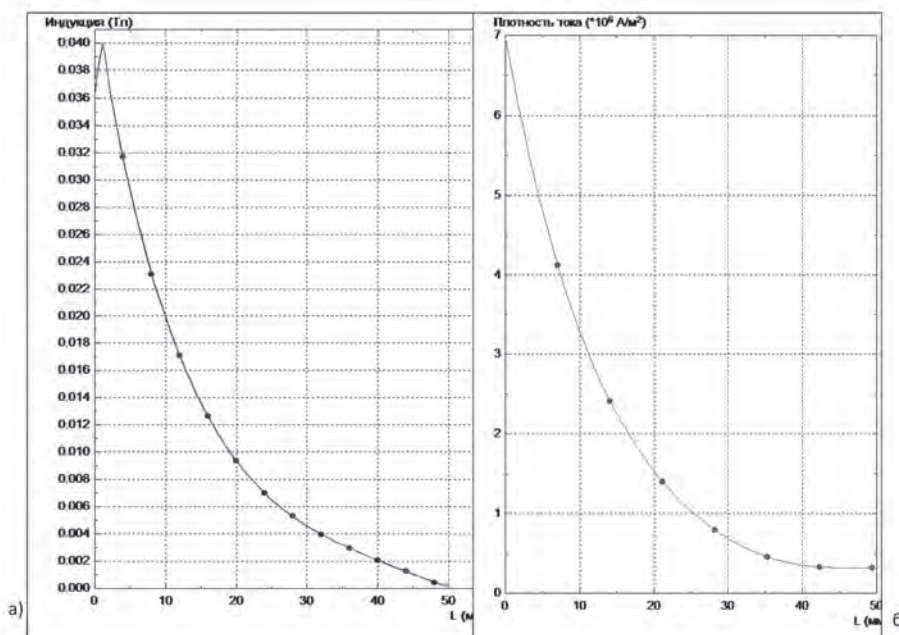


Рис. 9. Расчетные зависимости действующих значений индукции магнитного поля (а) – В (Тл) и плотности тока в проводнике (б) –  $J_z \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup> от расстояния, отсчитываемого в направлении, указанном на картине силовых линий магнитного поля

При сопоставлении результатов расчета и опыта распределения плотности тока  $J_z(y)$  по высоте проводника (рис. 10) видно, что расчетная кривая 1, соответствующая численному расчету магнитного поля в комплексе программ Elcut 5.6, хорошо согласуется с кривой 3, построенной по экспериментальным данным с использованием датчика Холла. Кривая 2, рассчитанная аналитическим методом [1], существенно расходится с кривыми 2 и 3 и может отображать качественную сторону рассматриваемого физического явления.

По окончании численного расчета переменного магнитного поля в ферромагнитном пазу «Мастером вычисления импеданса» в комплексе программ находится комплексное сопротивление (импеданс) проводника на единицу длины (рис. 11).

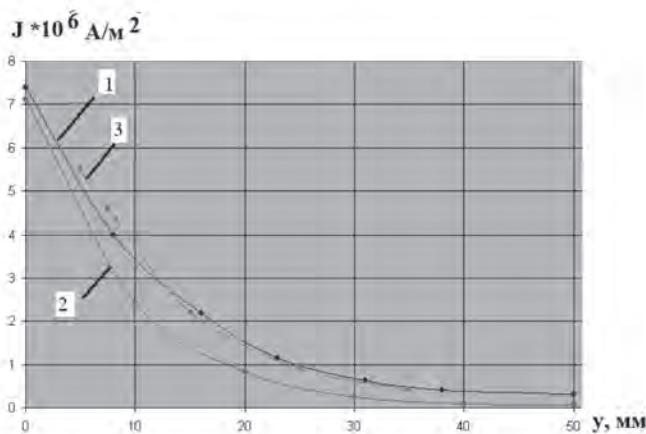


Рис. 10. Распределение действующих значений плотности тока по высоте проводника в пазу

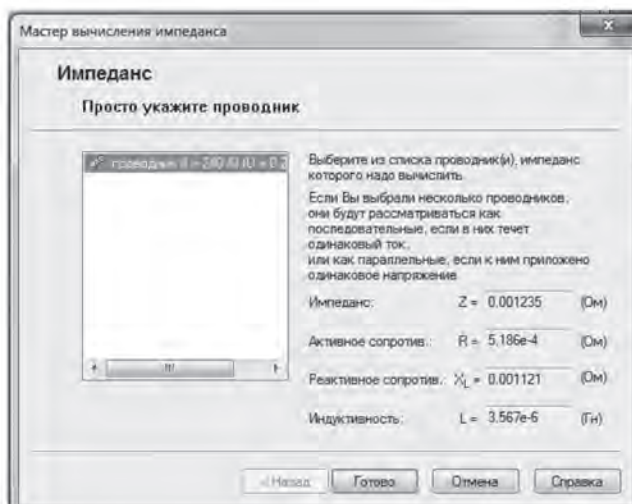


Рис. 11. Активное и реактивное сопротивления проводника с учетом поверхностного эффекта

**Выводы**

1. Преимуществами разработанного лабора-

торного стенда для исследования поверхностного эффекта в пазу с использованием АПИК являются высокая точность измерений, возможность сохранения и считывания результатов измерений в удобной для пользователя базе данных, низкие материальные затраты на изготовление лабораторного стенда.

2. Математическое моделирование поверхностного эффекта проводника с током в ферромагнитном пазу с помощью комплекса программ (профессиональная версия) является необходимым дополнением результатов экспериментального исследования физической модели паза с использованием новых современных технологий в измерительной технике.

*Список литературы*

1. *Теоретические основы электротехники*. В 3 т. Т. 3 [Текст] / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2004. – 364 с.
2. *ELCUT*. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. – СПб.: ПК TOP, 2007. – 293 с.
3. *Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы* [Текст] / Под ред. П.А. Бутырина – М.: ДМК Пресс, 2005. – 264 с.
4. *Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 19454*. Программа «Поверхностный эффект в ферромагнитном пазу» [Текст] / А.С. Татевосян, Н.В. Захарова. – Зарегистрировано в ИНИПИ РАО «Объединенный фонд электронных ресурсов «Наука и образование» 26.08.2013 г.

*References*

1. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki*. V 3 t. T. 3 /K.S. Demirchjan, L.R. Nejman, N.V. Korovkin, V.L. Chechurin. – Spb.: Piter, 2004.
2. *ELCUT*. Modelirovanie dvumernyh polej metodom konechnyh elementov. Rukovodstvo pol'zovatelya. – SPb.: PK TOP. 2007. – 293 s.
3. *Avtomatizaciya fizicheskikh issledovaniy i eksperimenta: komp'yuternye izmerenija i virtual'nye pribory* / Pod red. P.A. Butyrina. – M.: DMK Press, 2005. – 264 s.
4. *Svidetel'stvo o registracii jelektronnoho resursa № 19454*. Programma «Poverhnostnyj jeffekt v ferromagnitnom pazu» [Tekst] / A.S. Tatevosjan, N.V. Zaharova. – Zaregistriravano v INIPI RAO Obedinennyj fond jelektronnyh resursov «Nauka i obrazovanie» 26.08.2013 g.



**Шабанов В.А.**  
**Shabanov V.A.**

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



**Шарипова С.Ф.**  
**Sharipova S.F.**

*аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Россия, г. Уфа*



**Ахметгареев А.А.**  
**Ahmetgareev A.A.**

*магистрант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Россия, г. Уфа*

УДК 621.31; 62-83

## ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ НА КПД МАГИСТРАЛЬНОГО НАСОСА

В настоящее время для регулирования режима работы магистральных нефтепроводов широко используется способ циклической перекачки. При циклической перекачке трубопровод работает поочередно с разным числом насосов, обеспечивая работу нефтепровода при двух разных циклически изменяющихся значениях производительности. В режиме циклической перекачки производительность трубопровода может отличаться от номинальной подачи насосов, при этом насосы работают не в оптимальном режиме, и их коэффициент полезного действия (КПД) снижается по сравнению с номинальным значением. При этом использование циклической перекачки приводит к дополнительным потерям мощности и дополнительному непроизводительному расходу электроэнергии. Наиболее экономичным способом регулирования режимов работы магистрального нефтепровода является регулирование частоты вращения насоса с помощью частотно-регулируемого электропривода. В статье рассмотрено влияние частоты вращения магистрального насоса на его КПД. Показано, что КПД регулируемого насоса является сложной функцией, зависящей от частоты вращения. Для исследования зависимости КПД насоса от частоты вращения рассмотрен технологический участок действующего нефтепровода. Показано, что характер изменения КПД при изменении частоты вращения зависит от режима работы нефтепровода. Установлено, что в зависимости от производительности нефтепровода все режимы перекачки можно разбить на три группы. В режимах перекачки 1-й группы с производительностью, близкой к номинальному значению, регулирование производительности трубопровода путем снижения частоты вращения насоса приводит к снижению его КПД и поэтому экономически не выгодно. В режимах перекачки 2-й группы с производительностью, существенно меньшей номинального значения, КПД регулируемого насоса во всем диапазоне частот вращения остается выше, чем у нерегулируемого. Использование частотно-регулируемого электропривода в этих случаях экономически выгодно. В режимах перекачки 3-й группы, производительность в которых занимает промежуточное положение между группами 1 и 2, КПД регулируемого насоса изменяется разнонаправленно и может быть как выше, так и ниже, чем при номинальной частоте вращения.

*Ключевые слова:* частотно-регулируемый электропривод, магистральный насос, нефтепровод, коэффициент полезного действия, нефтеперекачивающая станция.

## EFFECT OF SPEED ON THE EFFICIENCY OF THE MAIN PUMP

Currently, for regulating the mode of operation of the main pipelines method of cyclic pumping widely used. When cyclic pumping pipeline works alternately with different numbers of pumps, providing work of the pipeline at

two different values of the cyclically varying performance. In the cyclic pipeline pumping performance may differ from the nominal pump flow, with the pumps are not working optimally and their efficiency is reduced compared with the nominal value. The use of cyclic pumping lead to additional losses of power and additional unproductive consumption. The most economical way to control operating modes is the main oil pump speed control with frequency-adjustable electric drive. The paper considers the influence of the rotational speed of the main pump on its efficiency. It is shown that the efficiency of the variable pump is a complex function of the speed. To investigate the efficiency of the pump depending on the speed technological section of the pipeline are considered. It is shown that the behavior of efficiency when the frequency of rotation depends on the mode of operation of the pipeline. Found that depending on the performance of all modes oil pump can be divided into three groups. In the first group of the pumping mode with a performance approximate to the nominal value, the regulation of the pipeline capacity by reducing the speed of the pump reduces its efficiency, and therefore not economically viable. In the second group of the pumping mode with a performance much smaller than the nominal value of the variable pump efficiency throughout the speed range is higher than the unregulated. Using frequency-adjustable electric drive in these cases economically profitable. In modes pumping in the third group the performance of which is intermediate between the first and the second groups, the efficiency of the variable pump varies in different directions and may be either higher or lower than the rated speed.

*Key words:* frequency-adjustable electric drive, main pump, oil pipeline, efficiency, oil pumping station.

В настоящее время основным способом регулирования режима работы магистральных нефтепроводов является подбор параметров и числа магистральных насосных агрегатов [1, 2]. В случае если подбором числа и параметров насосов невозможно установить требуемую производительность технологического участка, то используется циклическая перекачка. При циклической перекачке трубопровод работает поочередно с разным числом насосов, обеспечивая работу нефтепровода при двух разных циклически изменяющихся значениях производительности. Число насосов и время работы нефтепровода подбираются так, чтобы суммарная производительность за сутки при циклической перекачке была равна плановой. Как подбор числа насосов в пределах технологического участка, так и использование циклической перекачки приводят к дополнительным потерям мощности и дополнительному непроизводительному расходу электроэнергии. Обусловлено это тем, что и при подборе числа насосов, и в режиме циклической перекачки производительность трубопровода может отличаться от номинальной подачи насосов, при этом насосы работают не в оптимальном режиме и их коэффициент полезного действия (КПД) снижается по сравнению с номинальным значением. Наиболее экономичным способом регулирования режимов работы магистрального нефтепровода является регулирование частоты вращения насоса с помощью частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП) [3, 4, 5]. Раздельное влияние подачи и частоты вращения на КПД насоса известно [6]. Однако в условиях работы насоса на нефтеперекачивающей станции (НПС) эксплуатируемого технологического участка нефтепровода подача насоса и скорость его вращения

оказываются связанными уравнением баланса напоров, и зависимость его КПД от частоты вращения будет отличаться от теоретической. В статье исследуется влияние частоты вращения насоса на КПД в условиях работы насоса на НПС, когда перекачка нефти по технологическому участку нефтепровода ведется по системе «из насоса в насос».

При изменении частоты вращения зависимость КПД насоса от производительности трубопровода и от скорости вращения можно описать уравнением [7, 8]

$$\eta_n = \eta_{ном} - (q-v)^2 \cdot \eta_{ном} \cdot v^2, \quad (1)$$

где  $\eta_{ном}$  – номинальный КПД;

$$q = Q/Q_{ном} \quad (2)$$

– относительное значение подачи насоса;

$$v = \omega/\omega_{ном} \quad (3)$$

– относительная скорость вращения насоса;  $\omega$  – частота вращения;  $\omega_{ном}$  – номинальная частота вращения.

При перекачке нефти по трубопроводу по системе «из насоса в насос» магистральные насосы на НПС соединяются последовательно. При этом скорость вращения насоса  $v$  и производительность нефтепровода  $Q$  связаны уравнением баланса напоров. Решение уравнения баланса напоров относительно производительности можно представить в виде:

$$Q = \sqrt[2-m]{\frac{a_{II} + \sum_{i=1}^n a_i - \Delta z - h_{осм}}{1,02 fL + \left(\frac{b_{II}}{m_{II}^{2-m}}\right) + \sum_{i=1}^n b_i}}, \quad (4)$$

где  $a_{II}$ ,  $b_{II}$ ,  $a_i$ ,  $b_i$  – коэффициенты напорной характеристики подпорного и магистрального насосов;  $m$  – коэффициент режима;  $f$  – гидравлический уклон при единичном расходе;  $L$  – длина технологического участка нефтепровода;  $\Delta z$  – разность геодезиче-



ских отметок;  $h_{ocm}$  – остаточный напор в конце технологического участка.

Если на НПС технологического участка установлено  $k$  ЧРЭП насоса, то уравнение (4) принимает вид [9]

$$Q = 2^{-m} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k a_{pi} v_i^2 + A_k}{\sum_{i=1}^k b_{pi} + B_k}}, \quad (5)$$

где  $a_p$  и  $b_p$  – коэффициенты напорной характеристики  $i$ -го регулируемого насоса;  $A_k$  и  $B_k$  – коэффициенты, выражения для которых зависят от суммарного числа регулируемых насосов на всех НПС технологического участка.

При  $n$  включенных насосах, из которых  $k$  регулируемых:

$$A_k = a_{\Pi} + \sum_{i=1}^{n-k} a_i - \Delta z - h_{ocm}; \quad (6)$$

$$B_k = 1,02 fL + \left[ \frac{b_{\Pi}}{m_{\Pi}^{2-m}} \right] + \sum_{i=1}^{n-k} b_i. \quad (7)$$

В случае последовательного соединения однотипных магистральных насосов минимум затрат энергии на перекачку будет обеспечиваться при одинаковых частотах вращения регулируемых магистральных насосов на всех насосных станциях [10]. Если на НПС технологического участка установлены однотипные насосы, то, подставляя значение подачи из выражения (5) в выражение (1) и принимая частоты вращения всех регулируемых насосов одинаковыми, получим:

$$\eta_{н.} = \eta_{н.м} - \eta_{н.м} \cdot \left[ \frac{1}{Q_{НОМ}} \cdot \left( \frac{k \cdot a_p \cdot v^2 + A_k}{k \cdot b_p + B_k} \right)^{\frac{1}{2-m}} - v \right] \cdot v^2. \quad (8)$$

В уравнении (8) коэффициенты  $A_k$  и  $B_k$  определяются по уравнениям (6) и (7). Они не зависят от частоты вращения регулируемых насосов и определяются числом и коэффициентами напорных характеристик нерегулируемых насосов, а также па-

раметрами трубопровода. Поэтому в правой части уравнения (8) при заданной структуре трубопровода только одна переменная – частота вращения насосов. При этом уравнение (8) позволяет исследовать изменение КПД магистральных насосов в функции частоты вращения при любом режиме работы нефтепровода.

У области применения формулы (8) есть два ограничения. Во-первых, она справедлива только для диапазона изменения подачи насоса, в котором его напорную характеристику можно аппроксимировать уравнением

$$H = a - bQ^{2-m}. \quad (9)$$

Во-вторых, она справедлива только для рабочей области изменения частоты вращения насоса, в которой насос еще влияет на режим перекачки. При снижении частоты вращения ниже некоторого критического значения открывается обратный клапан в обвязке насоса, и весь поток жидкости в трубопроводе устремляется через обратный клапан в обход насоса. При этом насос «выключается» из режима перекачки. Частота вращения насоса, при которой это происходит, может быть найдена из уравнения [11]

$$v_{мин} = \sqrt{\frac{b_p \cdot Q^{2-m}}{a_p}}, \quad (10)$$

где  $a_p$  и  $b_p$  – коэффициенты аппроксимации напорной характеристики регулируемого насоса;  $Q$  – производительность трубопровода после открытия обратного клапана и «выключения» регулируемого насоса из режима перекачки.

В соответствии с (8) КПД регулируемого насоса является сложной функцией от частоты вращения. Для исследования зависимости КПД насоса от частоты вращения рассмотрим технологический участок нефтепровода, на головной станции которого в работе два подпорных насоса марки НПВ 5000–120, а в режиме перекачки участвуют от трех до восьми магистральных насосных агрегата марки НМ 10000–210 (рис. 1).

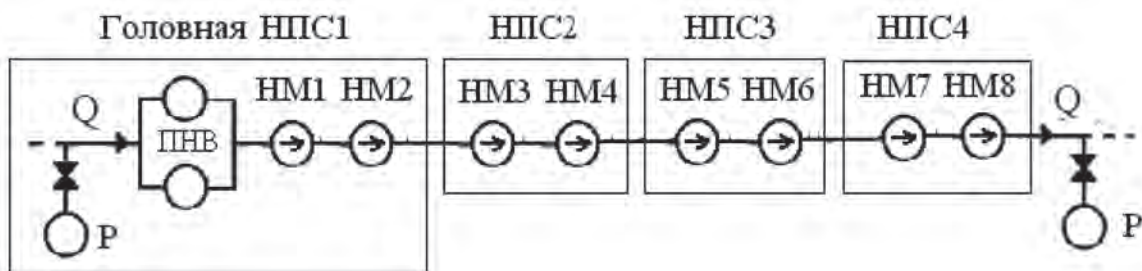


Рис. 1. Технологический участок трубопровода

Исходные данные трубопровода: длина технологического участка  $L = 900$  км; разность геодезических отметок  $\Delta z = -246$  м; гидравлический уклон

при единичной подаче  $f = 0,25 \cdot 10^{-10} \text{ л}/(\text{м}^3/\text{ч})^2$ ; остаточный напор  $h_{\text{ост.}} = 40$  м. Параметры магистральных и подпорных насосов приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Исходные данные по насосам**

Марка насоса	Номинальные параметры			Коэффициенты характеристики насоса
	Подача, м <sup>3</sup> /ч	Напор, м	КПД, %	
НМ 10000-210	10000	210	89	$a=293,7; b=8,78 \cdot 10^{-7}, \text{ м}/(\text{м}^3/\text{ч})^2$
НПВ 5000-120	5000	120	85	$a=137,7; b=1,28 \cdot 10^{-6}, \text{ м}/(\text{м}^3/\text{ч})^2$

При восьми включенных магистральных насосах по два на каждой НПС производительность трубопровода соответствует номинальной подаче насосов 10000 м<sup>3</sup>/ч. При этом КПД насосов равен номинальному значению 0,89. При снижении числа включенных насосов производительность трубопровода снижается, и КПД насосов становится

меньше номинального. Расчеты производительности трубопровода и КПД насосов при номинальной частоте вращения ( $n=1$ ), выполненные по формулам (4) и (1), приведены в табл. 2 и на рис. 2. Цифрами на графике указано число включенных магистральных насосов.

Таблица 2

**Производительность трубопровода и КПД насосов при номинальной частоте вращения**

n	8	7	6	5	4	3
Q, м <sup>3</sup> /ч	10010	9586	9114	8584	7982	7285
q	1,0	0,959	0,911	0,858	0,798	0,728
КПД	0,890	0,888	0,883	0,872	0,854	0,824

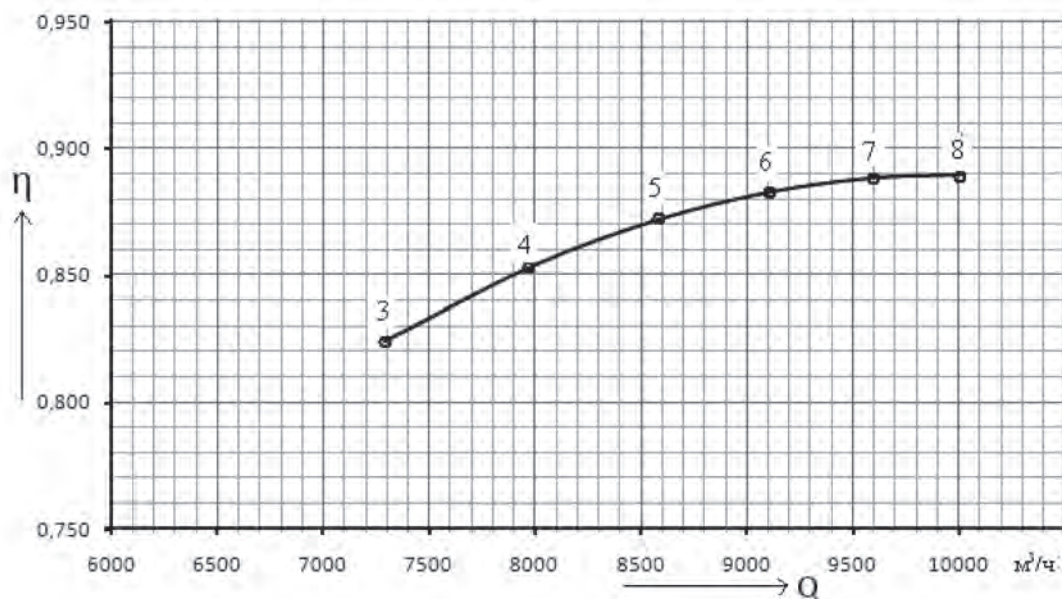


Рис. 2. График зависимости КПД насосов от подачи при номинальной частоте вращения

При изменении частоты вращения производительность трубопровода  $Q$  определяется по выражению (5), а КПД регулируемого насоса по выражению (8). Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Расчеты выполнены при одном регулируемом насосе и  $n-1$  нерегулируемых, где  $n$  – суммарное число включенных магистральных насосов на НПС технологического участка.

Таблица 3

КПД насоса при снижении частоты вращения

Число включенных насосов		q и КПД при частоте вращения $\nu$					
		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
8	q	0,959	0,962	0,972	0,981	0,990	1,0
	КПД	0,843	0,847	0,858	0,871	0,884	0,890
7	q	0,913	0,920	0,928	0,937	0,947	0,958
	КПД	0,852	0,857	0,867	0,879	0,888	0,888
6	q	0,862	0,869	0,878	0,888	0,899	0,911
	КПД	0,861	0,867	0,876	0,886	0,890	0,883
5	q	0,804	0,812	0,822	0,833	0,845	0,858
	КПД	0,869	0,876	0,884	0,889	0,888	0,872
4	q	0,738	0,747	0,758	0,770	0,783	0,798
	КПД	0,877	0,883	0,889	0,889	0,880	0,854
3	q	0,659	0,670	0,682	0,696	0,712	0,728
	КПД	0,884	0,888	0,890	0,884	0,864	0,824

На рис. 3 показаны графики изменения КПД регулируемого насоса в функции подачи и частоты вращения. Цифрами 1–8 обозначены графики изменения КПД при числе включенных насосов соответственно от 1 до 8. Цифрой 9 обозначен график изменения КПД при номинальной частоте вращения, приведенный на рис. 2. Точки 3–8 на рис. 2 соответствуют точкам  $3n-8n$  на рис. 3. В точках  $1n-8n$  частота вращения насосов равна номинальной. При снижении частоты вращения рабочая точка перемещается по кривым 1–8 в направлениях, указанных стрелкой. Все графики 1–8 построены при изменении частоты вращения от  $\nu=1,0$  до  $\nu=0,5$ .

Из графиков на рис. 3 следует, что при восьми включенных насосах (кривая 8) КПД регулируемого насоса при снижении его скорости вращения снижается и остается ниже номинального значения во всем диапазоне регулирования от  $\nu=1,0$  до  $\nu=0,5$ . Следовательно, в режимах перекачки с производительностью, близкой к номинальному значению, регулирование производительности трубопровода путем снижения частоты вращения насоса приводит к снижению КПД и поэтому экономически невыгодно.

Графики 5–1 расположены выше кривой 9. Это означает, что при числе включенных насосов 5 и менее КПД регулируемого во всем диапазоне частот вращения насоса остается выше, чем у нерегу-

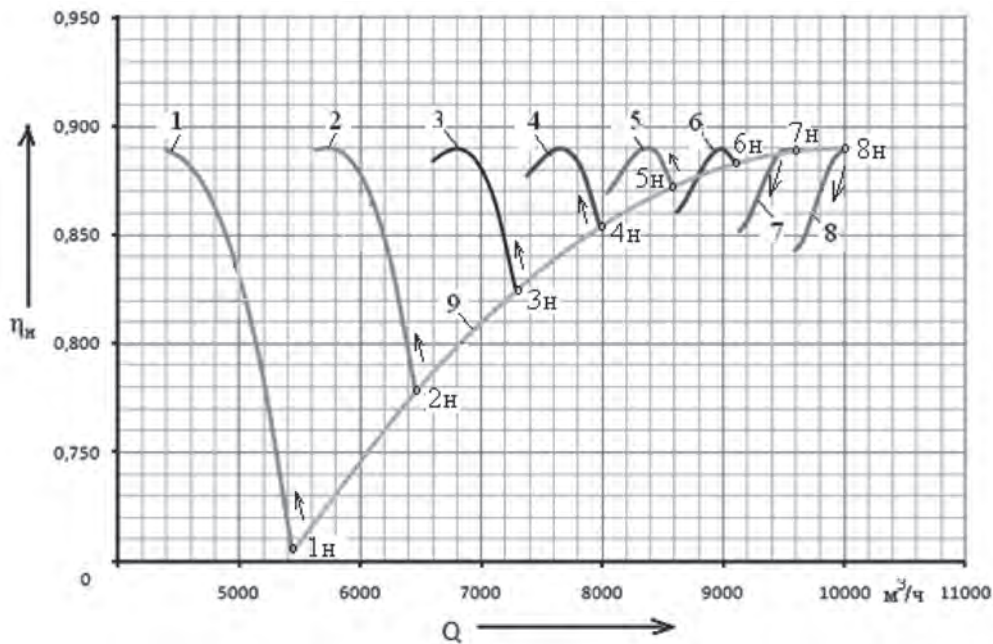
лируемого. Это означает, что при производительности трубопровода  $8600 \text{ м}^3/\text{ч}$  и менее использование ЧРЭП приводит к повышению эквивалентного КПД перекачки.

При числе насосов 6 и 7 КПД регулируемого насоса сначала повышается при снижении частоты вращения, а затем начинает снижаться и при некоторой частоте вращения  $\nu_{\text{пред}}$  становится ниже, чем КПД при номинальной частоте вращения. Это означает, что область использования частотного регулирования ограничено диапазоном от  $\nu=1,0$  до  $\nu_{\text{пред}}$ . При  $\nu < \nu_{\text{пред}}$  КПД регулируемого насоса становится ниже, чем КПД нерегулируемого, и использование ЧРЭП становится невыгодным.

#### Выводы

1. По характеру изменения КПД регулируемого насоса в функции частоты вращения все режимы перекачки можно разбить на три группы. В режимах перекачки 1-й группы с производительностью, близкой к номинальному значению, регулирование производительности трубопровода путем снижения частоты вращения насоса приводит к снижению его КПД, и поэтому экономически невыгодно.

2. В режимах перекачки 2-й группы с производительностью, существенно меньшей номинального значения (в рассмотренном примере при производительности трубопровода  $8600 \text{ м}^3/\text{ч}$  и менее),


 Рис. 3. Графики КПД =  $f(Q, \nu)$  при разном числе насосов

КПД регулируемого насоса во всем диапазоне частот вращения остается выше, чем у нерегулируемого. Это означает, что использование ЧРЭП в этих случаях экономически выгодно, так как приводит к повышению эквивалентного КПД перекачки.

3. В режимах перекачки 3-й группы, производительность в которых занимает промежуточное положение между группами 1 и 2 (в рассмотренном примере при числе насосов 6 и 7), КПД регулируемого насоса сначала повышается, а затем начинает снижаться, и при некоторой частоте вращения  $\nu_{\text{пред}}$  становится ниже, чем КПД при номинальной частоте вращения. Это означает, что область использования частотного регулирования ограничена диапазоном от  $\nu=1,0$  до  $\nu_{\text{пред}}$ .

#### Список литературы

1. Коршак А.А. Трубопроводный транспорт нефти, нефтепродуктов и газа: учеб. для вузов [Текст] / А.А. Коршак, А.М. Нечваль. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2001. – 571 с.
2. Гумеров А.Г. Эксплуатация оборудования нефтеперекачивающих станций [Текст] / А.Г. Гумеров, Р.М. Гумеров, А.С. Акбердин. – М.: ООО «Недра – Бизнес-центр», 2001. – 475 с.
3. Шабанов В.А. Достоинства и перспективы использования частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов на НПС [Текст] / В.А. Шабанов, О.В. Кабаргина // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2011. – Т. 2. – С. 63–66.
4. Шабанов В.А. Критерии эффективности

частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов на нефтеперекачивающих станциях [Текст] / В.А. Шабанов, С.Ф. Шарипова // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – № 1. – Т. 9. – С. 38–43.

5. Шабанов В.А. Оценка эффективности частотного регулирования магистральных насосов по эквивалентному коэффициенту полезного действия [Электронный ресурс] / В.А. Шабанов, О.В. Кабаргина, З.Х. Павлова // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 6. – С. 24–29. – URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov\\_8.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_8.pdf).

6. Нечваль А.М. Основные задачи при проектировании и эксплуатации магистральных нефтепроводов: учебное пособие [Текст] / А.М. Нечваль. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2005. – 81 с.

7. Гришин А.П. Коэффициент полезного действия частотно-регулируемого электронасоса [Текст] / А.П. Гришин, В.А. Гришин // Научные труды. – Том 89. – М.: ВИЭСХ, 2004. – С. 118–127.

8. Шабанов В.А. К вопросу о выборе оптимального режима работы магистрального насоса при частотно-регулируемом приводе [Текст] / В.А. Шабанов, А.А. Ахметгареев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2012. – № 3. – С. 7–10.

9. Шабанов В.А. Исследование КПД МН при ЧРЭП одного из насосов технологического участка [Текст] / В.А. Шабанов, А.А. Ахметгареев // Сборник научных трудов I Международной (IV Всероссийской) научно-технической конферен-

ции «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий». – Уфа: Нефтегазовое дело, 2013. – С. 99–108.

10. *Гольянов А.И.* О распределении напоров насосных перекачивающих станций, оборудованных насосными агрегатами с частотно-регулируемым приводом [Текст] / А.И. Гольянов, Д.А. Михайлов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2011. – № 1. – С. 6–9.

11. *Шабанов В.А.* Определение нижней границы диапазона частотного регулирования электродвигателей магистральных насосов [Электронный ресурс] / В.А. Шабанов, О.В. Кабаргина // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2010. – № 2. – URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov\\_3.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_3.pdf) – 8 с.

#### References

1. *Korshak A.A.* Truboprovodnyj transport нефти, нефтепродуктов i gaza: ucheb. dlja vuzov [Текст] / А.А. Коршак, А.М. Нечвал'. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2001. – 571 с.

2. *Gumerov A.G.* Jekspluatacija oborudovanija nefteperekachivajushhijh stancij [Текст] / А.Г. Gumerov, R.M. Gumerov, A.S. Akberdin. – М.: ООО «Nedra – Biznes-centr», 2001. – 475 с.

3. *Shabanov V.A.* Dostoinstva i perspektivy ispol'zovanija chastotno-reguliruemogo jelektro-privoda magistral'nyh nasosov na NPS [Текст] / V.A. Shabanov, O.V. Kabargina // Upravlenie kachestvom v neftegazovom komplekse. – 2011. – Т. 2. – С. 63–66.

4. *Shabanov V.A.* Kriterii jeffektivnosti chastotno-reguliruemogo jelektroprivoda magistral'nyh nasosov na nefteperekachivajushhijh stancijah [Текст] / V.A. Shabanov, S.F. Sharipova // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – № 1. – Т. 9. – С. 38–43.

5. *Shabanov V.A.* Ocenka jeffektivnosti chastotno-

go regulirovanija magistral'nyh nasosov po jekvivalentnomu kojefficientu poleznogo dejstvija [Jelektronnyj resurs] / V.A. Shabanov, O.V. Kabargina, Z.H. Pavlova // Jelektronnyj nauchnyj zhurnal "Neftegazovoe delo". – 2011. – № 6. – С. 24–29. – URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov\\_8.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_8.pdf).

6. *Nechval' A.M.* Osnovnye zadachi pri proektirovanii i jekspluatácii magistral'nyh nefteprovodov: uchebnoe posobie [Текст] / А.М. Nechval'. – Уфа: Izd-vo UGNTU, 2005. – 81 с.

7. *Grishin A.P.* Kojefficient poleznogo dejstvija chastotno-reguliruemogo jelektronasosa [Текст] / A.P. Grishin, V.A. Grishin // Nauchnye trudy. Tom 89. – М.: VIJeSH, 2004. – С. 118–127.

8. *Shabanov V.A.* K voprosu o vybore optimal'nogo rezhima raboty magistral'nogo nasosa pri chastotno-reguliruemom privode [Текст] / V.A. Shabanov, A.A. Ahmetgareev // Transport i hranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ja. – 2012. – № 3. – С. 7–10.

9. *Shabanov V.A.* Issledovanie KPD MN pri ChRJeP odnogo iz nasosov tehnologicheskogo uchastka [Текст] / V.A. Shabanov, A.A. Ahmetgareev // Sbornik nauchnyh trudov I Mezhdunarodnoj (IV Vserossijskoj) nauchno-tehnicheskoy konferencii «Jelektroprivod, jelektrotehnologii i jelektrooborudovanie predpriyatij». – Уфа: Нефтегазовое дело, 2013. – С. 99–108.

10. *Gol'janov A.I.* O raspredelenii naporov nasosnyh perekachivajushhijh stancij, oborudovannyh nasosnymi agregatami s chastotno-reguliruemym privodom [Текст] / А.И. Gol'janov, D.A. Mihajlov // Transport i hranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ja. – 2011. – № 1. – С. 6–9.

11. *Shabanov V.A.* Opredelenie nizhnej granicy diapazona chastotnogo regulirovanija jelektrodvigatelej magistral'nyh nasosov [Jelektronnyj resurs] / V.A. Shabanov, O.V. Kabargina // Jelektronnyj nauchnyj zhurnal «Neftegazovoe delo». – 2010. – № 2. – URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov\\_3.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_3.pdf) – 8 с.



**Феоктистов Н.А.**  
**Feoktistov N.A.**

*доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет дизайна и технологий», Россия, г. Москва*



**Феоктистов А.Н.**  
**Feoktistov A.N.**

*кандидат технических наук, доцент НОУ ВПО «Институт государственного управления, права и инновационных технологий», Россия, г. Москва*

УДК 621.79

## ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМ СВЕТОДИОДНОЙ ИНДИКАЦИИ С АНАЛОГОВЫМ ОПТОЭЛЕКТРОННЫМ ДАТЧИКОМ ДАВЛЕНИЯ

Рассматриваются принципы построения систем светодиодной индикации на электронных элементах с разработанным аналоговым оптоэлектронным датчиком давления применительно к электронно-водному генератору (ЭВГ). Разработан датчик, обеспечивающий высшую эксплуатационную надежность. Чувствительный элемент датчика представляет собой плоскую круглую резиновую пластину с жестким центром, способную получать изгиб под давлением. На величину перемещения чувствительного элемента, зависящего от давления, реагирует фотоприемник оптрона. Перемещение мембраны изменяет интенсивность светового потока, воздействующего на светоприемник, и величину сигнала, поступающего на схему сравнения и индикации. Предложены три варианта схем сравнения и индикации на транзисторной матрице, диодных оптронах и фототранзисторах. Выход компаратора соединен с входом усилителя сигнала рассогласования, формирующего сигнал на отпирание и запирающие регулятора давления (тока). Вместо традиционного измерения уровня электролита предлагается вариант измерения расхода воды в составе электролита путем регистрации количества электричества через электролизер. Предложены функциональная и электрическая схемы устройства расхода воды и выхода газов.

*Ключевые слова:* датчик, транзисторная матрица, диодный оптрон, фототранзистор.

## DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE LED DISPLAY WITH ANALOG OPTOELECTRONIC SENSOR PRESSURE

The principles of construction systems, the LED display on the electronic elements with the developed optoelectronic analog pressure sensor with respect to the electron-water generator. Developed sensor capable of the highest reliability. Sensing element is a flat circular plate with a hard rubber center capable of receiving pressurized bending. The magnitude of the displacement sensor, which depends on the pressure detector reacts photocoupler. Moving the diaphragm changes the light intensity acting on the light receiving signal value supplied to the comparison circuit and the display. Three options schemes comparison and display on the transistor array, diode and phototransistor photocouplers. The output of the comparator is connected to the input of the amplifier error signal, a signal is generated by unlocking and locking pressure regulator (DC). Instead of the traditional measurement of the electrolyte the variant of flow measurement within the electrolyte by recording the amount of electricity through the cell. Proposed functional and electrical system is the water flow and the gas exit.

*Key words:* sensor, transistor matrix, photocoupler diode, phototransistor.

Анализ эксплуатационных характеристик предлагаемых промышленностью датчиков давления от 0,5 до 3 кг/см<sup>2</sup> показал, что они имеют существенные недостатки: разброс параметров из-за гистерезиса, непригодность к работе в щелочно-кислотной среде, значительные массогабаритные показатели и малую эксплуатационную надежность [1, 2]. Разработан датчик, обеспечивающий высокую эксплуатационную надежность [3, 4]. Чувствительный элемент датчика представляет собой плоскую круглую резинотканевую пластину с жестким центром, способную получать заметный прогиб  $h_{из}$  под давлением рабочей силы  $P_{вых}$ . Сущность принципа действия датчика заключается в изменении интенсивности светового потока, отражаемого жестким центром. На величину перемещения чувствительного элемента, зависящего от входного давления  $P_{вх}$ , реагирует фотоприемник оптрона. Перемещение мембраны изменяет интенсивность светового потока, воздействующего на светоприемник, и величину сигнала, поступающего на схему сравнения и индикации. Предложены варианты схем сравнения и индикации на транзисторной матрице (рис. 1), диодных оптронах (рис. 2), электронных фототранзисторах (рис. 3).

С ростом давления в системе транзисторным оптроном VT1 переходит в более открытое состояние и на выходе делителя R3 транзисторной матрицы DA1. Резисторы R4–R11 подобраны таким образом, что при нижнем уровне давления электронные элементы VS1–VS4, VT2–VT5, DA1 приведенных схем переходят в открытое состояние, и в зависимости

от уровня сигнала давления загораются светодиоды VD1–VD4. При максимальном уровне давления в открытое состояние переходят все электронные элементы и загораются все светодиоды. Резисторы R2 – R15 обеспечивают нормальный режим работы электронных элементов и светодиодов VD1–VD4.

С изменением уровня давления изменяется потенциал точки 4 выхода оптрона. Сигнал с выхода оптрона подается на один из входов системы сравнения компаратора системы управления ЭВГ. По мере увеличения давления потенциал точки 4 снижается, что приводит при его определенном уровне к переходу компаратора в другое состояние. Выход компаратора соединен с входом усилителя сигнала рассогласования, формирующего сигнал на отпирание или запираание регулятора тока (давления). Переменный резистор R3 позволяет обеспечить необходимый уровень входного сигнала индикатора давления. Серьезной проблемой на пути создания автоматизированных технологических установок на базе электролизно-водных генераторов является организация системы измерения уровня электролита в электролизере. Дело в том, что этот параметр является определяющим в обеспечении стабильной и контролируемой работы электролизера, поскольку отвечает за электрические характеристики электролизера как приемника энергии. В процессе работы электролизера количество воды в нем уменьшается. Это приводит к увеличению концентрации электролита и уменьшению активной площади электродов. Чрезмерное повышение концентрации и изменение плотности тока приво-

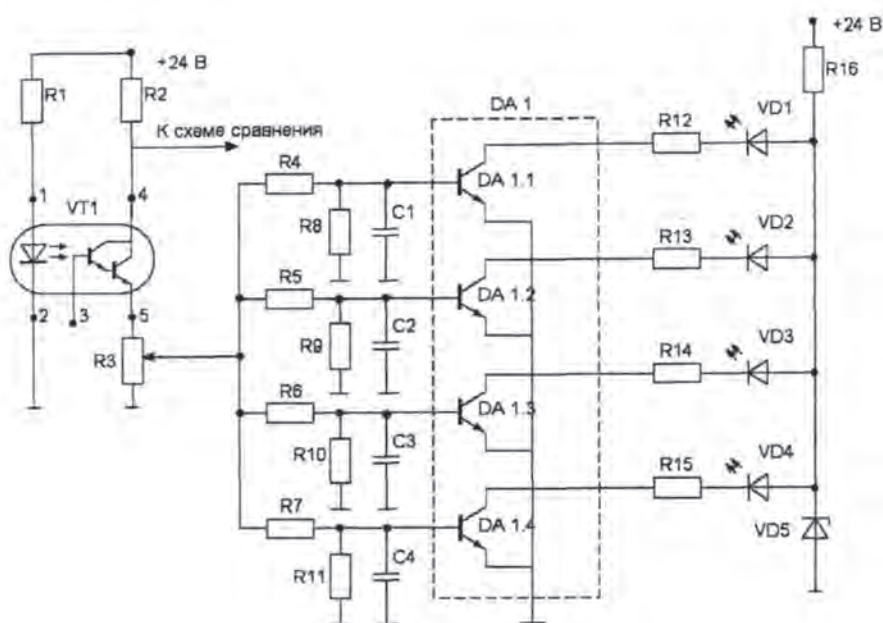


Рис. 1. Электронная схема на транзисторной матрице

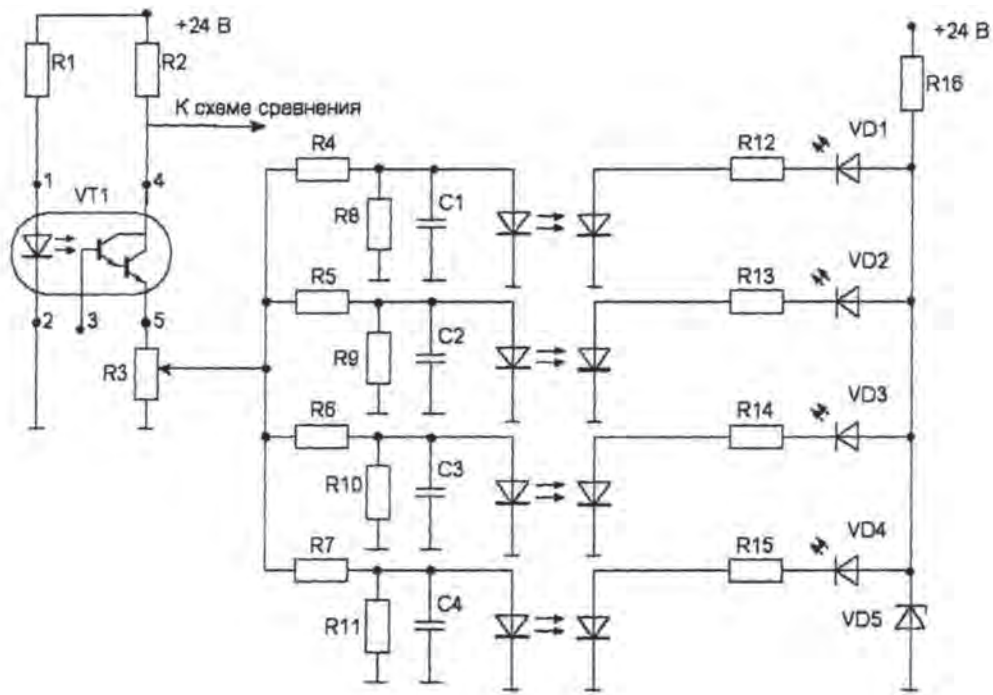


Рис. 2. Электронная схема на диодных оптронах

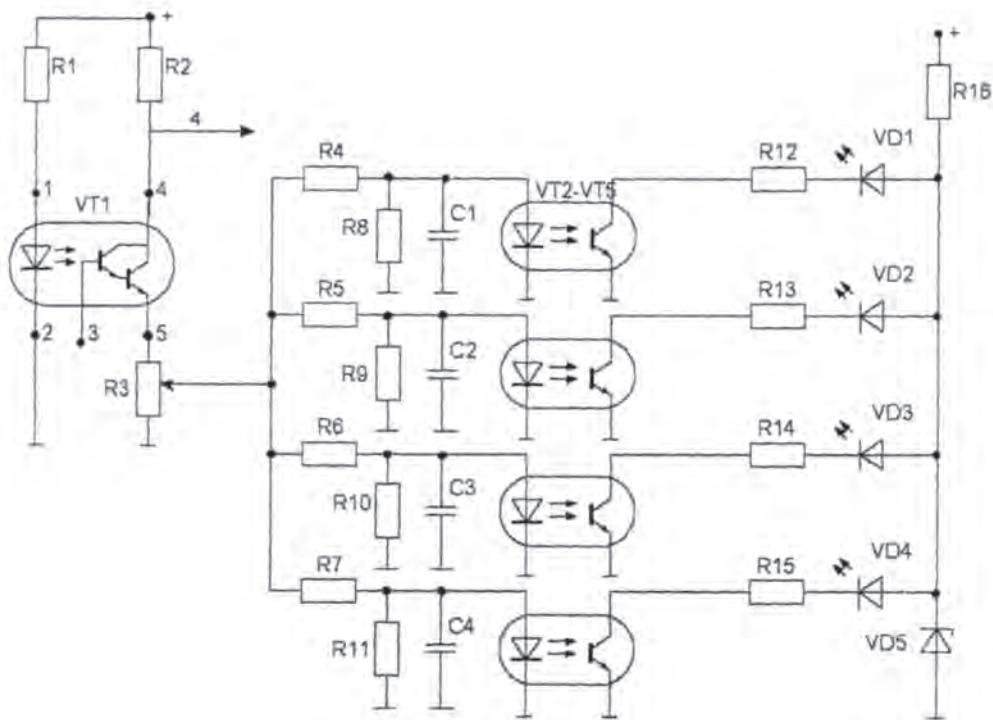


Рис. 3. Электронная схема на фототранзисторах

дит к нарушению режима работы электролизера и, соответственно, электролизно-водного генератора в целом. В химической, газовой, атомной и других отраслях [1] разработаны и применяются разнообразные датчики уровня, использующие широкий спектр принципов первичного преобразования информации в электрический сигнал, – от простейших мерных трубок и поплавковых датчиков до весьма

сложных систем с использованием ультразвукового и электромагнитного излучения, а также достижений микроэлектроники. Такие датчики широко и с успехом применяются.

Однако в реализованных до настоящего времени технологических установках на базе электролизно-водных генераторов системы регистрации и измерения уровня электролита ограни-



чены простейшими устройствами для визуального контроля. Связано это, на наш взгляд, с электропроводностью и чрезвычайно высокой проникающей способностью используемого электролита, а также с возможностью загрязнения электролита и с пенообразованием. При работе с горелкой вручную оператор, как правило, имеет возможность визуально контролировать уровень электролита, а также изменять, при необходимости, режим работы горелки. В автоматическом режиме система должна как минимум сигнализировать о чрезмерном расходе дистиллированной воды в электролизере.

В связи с изложенным выше мы считаем целесообразным рассмотреть вариант измерения не уровня электролита, а расхода воды в составе электролита, начиная с момента начальной зарядки (максимальный рабочий уровень электролита). В этом случае измерение расхода электроэнергии позволяет нам (в соответствии с законом Фарадея) определить с хоро-

шей точностью (около 98%) расход воды, а также выход газов (водород, кислород, «гремучий газ» ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ )). Если сказать более корректно, то задача сводится к регистрации количества электричества, проходящего через электролизер. Это может быть сделано, в принципе, как по цепи постоянного, так и по цепи переменного тока (до выпрямителя) с соответствующим пересчетом на количество электричества. В соответствии с теорией на одну пару электродов (анод + катод) электролизера при электролизе диссоциирует  $0,9 \cdot 10^{-7}$  кг/Кл воды и генерируется  $11,8 \cdot 10^{-5}$  л/Кл водорода,  $6 \cdot 10^{-5}$  л/Кл кислорода (при нормальном давлении) и  $17,8 \cdot 10^{-5}$  л/Кл смеси газов ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ).

Для построения электрической схемы устройства целесообразно использовать функциональную схему, приведенную на рис. 4. Основным узлом схемы является трансформатор тока (1). От него зависит корректность проводимых измерений.

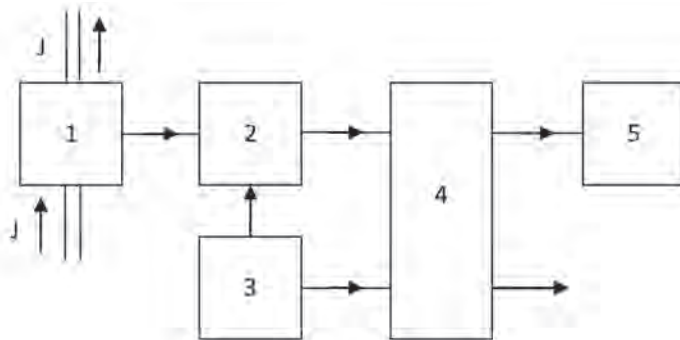


Рис. 4. Функциональная схема устройства для измерения расхода воды и выхода  $\text{H}_2$  и  $\text{O}_2$ :  
1 – трансформатор тока; 2 – интегратор; 3 – блок управления интегратором; 4 – микроконтроллер;  
5 – индикатор расхода воды и газов;  $J$  – электрический ток, протекающий через электролизер

На трансформатор тока возлагаются две основные функции: передача тока из первичной (силовой) цепи во вторичную, по возможности без искажений и с необходимым для измерений коэффициентом трансформации, а также обеспечение надежной изоляции первичной и вторичной (измерительной) цепи. Выбор типа трансформатора тока определяется исходя из принятой системы регулирования потребляемой электролизером мощности. Так, при управлении по углу зажигания кривая тока и на стороне переменного тока, и в цепи постоянного тока, непосредственно питающей электролизер, носит явно несинусоидальный характер. Для этого случая необходимо использовать один из вариантов трансформатора постоянного тока [5]. В случае использования классического варианта трансформатора постоянного тока на базе ферромагнитных магнитоприводов с регулируемой индукцией реализуется функция изоляции измерительной цепи от силовой, однако здесь необходим дополнительный

изолированный источник переменного тока повышенной частоты. Возможно использование одного из вариантов оптоэлектронного трансформатора тока [5]. Такие трансформаторы постоянного тока могут с минимальными искажениями передать в измерительную цепь в аналоговой форме информацию о токе, протекающем в первичной цепи. Однако и здесь требуется дополнительный изолированный от измерительной цепи источник питания. На рис. 5 в качестве иллюстрации приведена принципиальная схема оптоэлектронного трансформатора тока на базе линейного оптрона HCNR200/1 фирмы «Avago».

Если ориентироваться на числоимпульсное регулирование электролизера [6, 7, 8], когда сила тока через электролизер неизменна и равна оптимальной для данной конструкции величине, а момент включения и выключения определяется датчиками давления, то задача организации системы регистрации количества электричества, проходящего через элек-

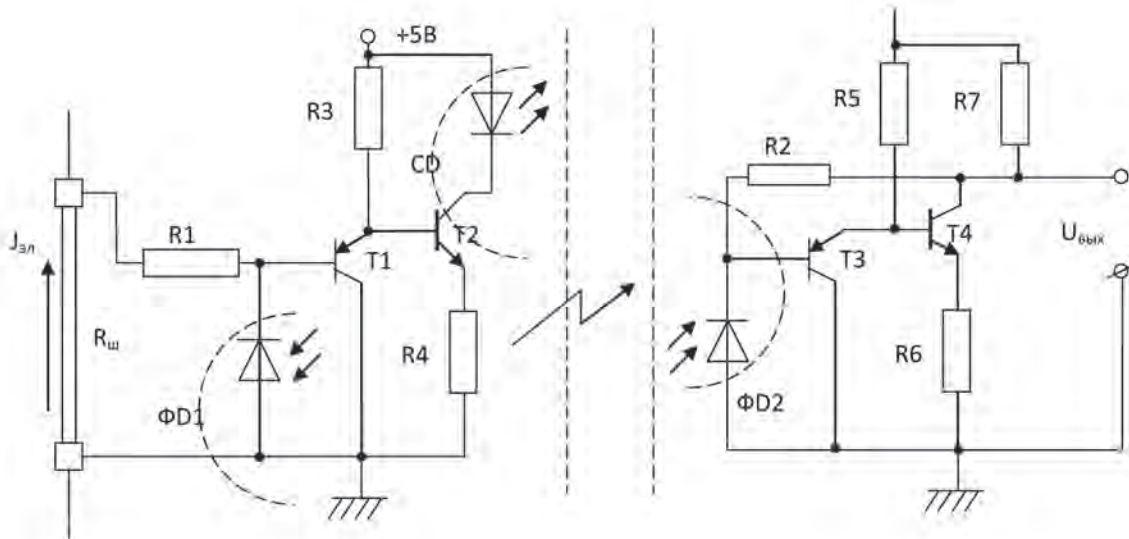


Рис. 5. Схема трансформатора постоянного тока на базе линейного оптрона HCNR200/1:  
 $J_{эл}$  – ток, протекающий через электролизер;  $R_{ш}$  – сопротивление шунта; CD – светодиод оптрона HCNR200/1;  
 ΦD1 – фотодиод обратной связи оптрона; ΦD2 – сигнальный фотодиод оптрона

тролизер, упрощается. Действительно, поскольку в этом случае в цепи питания электролизера до выпрямителя протекает преимущественно синусоидальный электрический ток, можно использовать классический трансформатор тока с последующим выпрямлением его в режиме близком к режиму короткого замыкания. Далее, в соответствии со схемой (рис. 6) электрический ток интегрируется (блок 2), результаты интегрирования обрабатываются микроконтроллером (блок 4) и индицируются (блок 5). С целью расширения диапазона измерений в функциональной схеме предусмотрен управляющий блок (блок 3), который по сигналу от микроконтроллера обнуляет аналоговую память интегратора при ее переполнении, что сопровождается соответствующей записью в памяти микроконтроллера (блок 4). Таким образом, достаточно просто решается проблема контроля расхода воды в автоматизированных установках на базе электролизно-водных генераторов.

На рисунке штрихпунктирной линией выделены основные функциональные блоки схемы измерений. Электрический сигнал, пропорциональный протекающему по электролизеру току, поступает на вход интегратора (блок 1), собранный на базе отечественного операционного усилителя КП1407УДЗ, и заряжает конденсатор С4. Информация о накопленном заряде (аналоговое значение напряжения  $U$  на конденсаторе) через формирователь (блок 2) поступает на аналоговый вход микроконтроллера (блок 3), преобразуется в цифровую форму и сравнивается с записанным в памяти контроллера некоторым значением напряжения  $U_0$ . При достижении  $U \geq U_0$  в

накопительную память контроллера записывается единица («1»). Это есть одна «порция» количества электричества.

Одновременно на выходной порт контроллера поступает сигнал логической «1», который открывает оптоэлектронное реле КП293КП1А (блок 1). Контакты реле «замыкаются», и конденсатор С4 разряжается за некоторое время ( $t_{разр}$ ). По истечении этого времени сигнал «лог1» с выходного порта снимается, контакты оптоэлектронного реле «размыкаются», и вновь начинается процесс зарядки конденсатора С4. При достижении  $U \geq U_0$  процесс записи и обнуления повторяется. Одновременно с этим осуществляется опрос памяти (где записано число «порции» количества электричества). При получении команды индикации интегрального расхода электроэнергии с пульта управления (рис. 3) решается уравнение:

$$Q_n = K_m \cdot C \cdot U_0 \cdot N,$$

где  $K_m$  – коэффициент трансформации;  $C$  – емкость конденсатора С4;  $U_0$  – пороговое напряжение на конденсаторе;  $N$  – число циклов зарядки конденсатора. По интегральному расходу электроэнергии определяется расход воды за время работы:

$$W_n = Q_n \cdot 0,9 \cdot 10^{-7}, \text{ кг}$$

и соответствующие выходы газовой смеси  $\alpha_C = 17,8 \cdot 10^{-5} \cdot Q_n$ , водорода  $\alpha_{H_2} = 11,8 \cdot 10^{-5} \cdot Q_n$  и кислорода  $\alpha_{O_2} = 6 \cdot 10^{-5} \cdot Q_n$  в литрах, при нормальном давлении.

Текущий расход смеси, водорода и кислорода определяется путем подсчета числа «порций» электричества за определенный отрезок времени (например, за 1 минуту) и отображается на индикаторе при наличии соответствующей команды. В схеме

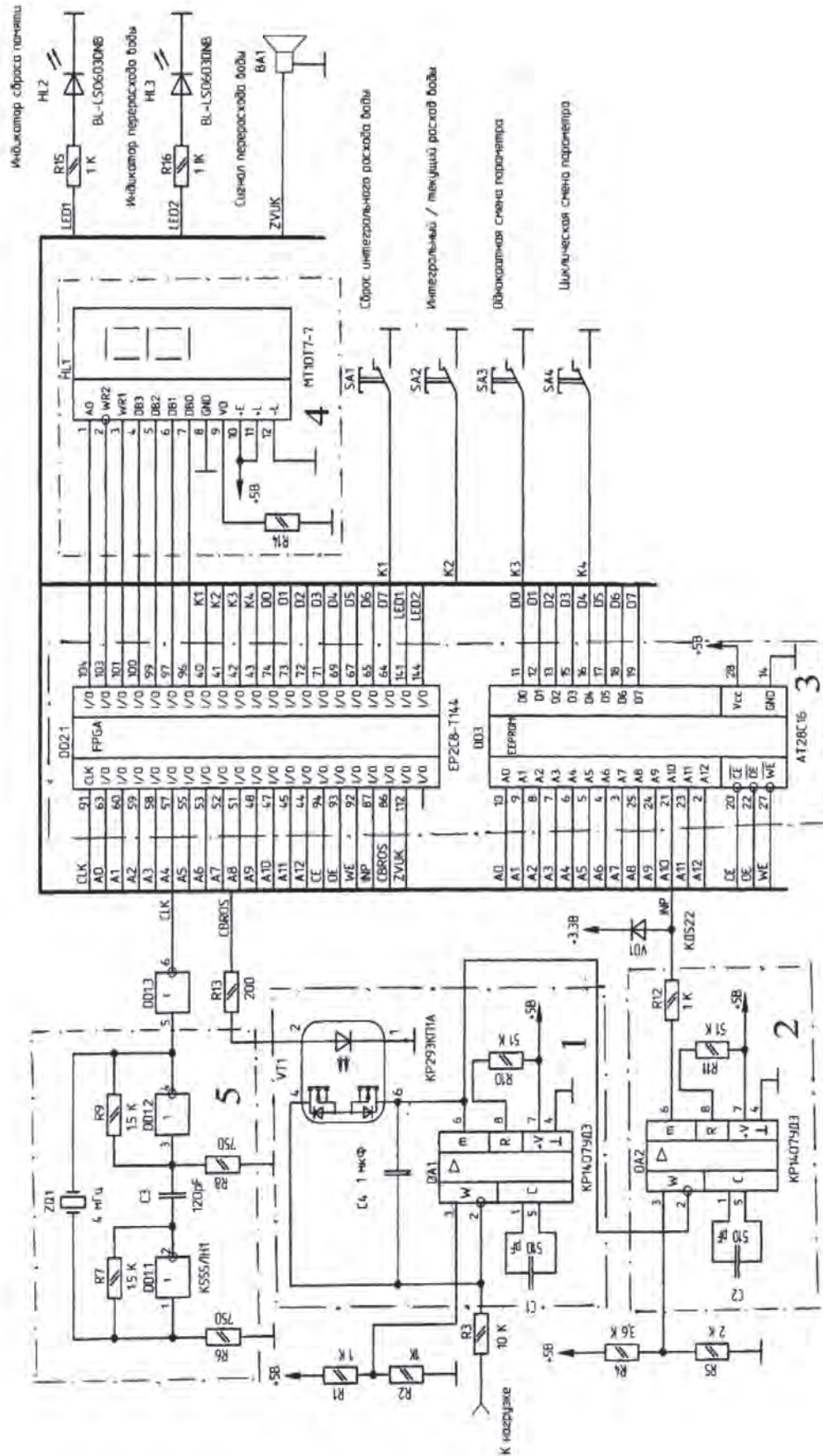


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема системы измерения расхода воды и выхода газов:  
 1 – блок интеграции; 2 – блок формирования сигнала; 3 – микропроцессорный блок;  
 4 – блок индикации; 5 – тактовый генератор

предусмотрена выдача светового и звукового сигналов при перерасходе воды.

В заключение заметим, что измеренное значение выхода газов показало достаточно хорошее совпадение с результатами измерений традиционными расходомерами.

#### Список литературы

1. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств [Текст] / М.В. Кулаков. – М.: Машиностроение, 1983. – 424 с.
2. Шкатов Е.Ф. Технологические измерения и КИП на предприятиях химической промышленности [Текст] / Е.Ф. Шкатов. – М.: Химия, 1986. – 320 с.
3. Варламов И.В. Научные основы создания оптоэлектронного датчика давления бытового электролизно-водного генератора обработки металлов [Текст] / И.В. Варламов, А.Н. Феоктистов // сб. трудов «Современные средства управления бытовой техникой». – М.: МГУс, 2006.
4. Феоктистов А.Н., Варламов И.В. Принципы построения и схемные решения оптоэлектронных датчиков давления бытового ЭВГ для сварки и пайки [Текст] / И.В. Варламов, А.Н. Феоктистов // Материалы 11-й Международной НПК «Наука сервису». – М.: МГУс, 2006.
5. Афанасьев В.В. Трансформаторы тока [Текст] / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель, И.М. Сирота. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.
6. Феоктистов А.Н. Потребляемый ток и коэффициент мощности при пакетном включении числоимпульсных модуляторов [Текст] / А.Н. Феоктистов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2006. – № 3.
7. Феоктистов Н.А. Режимы работы систем управления источников электропитания бытовых ЭВГ [Текст] / Н.А. Феоктистов, И.В. Варламов, Н.Н. Теодорович. – М., МГУс, 2004.
8. Феоктистов Н.А. Система управления и автоматического регулирования режимов работы электролизно-водного генератора с применением

микроЭВМ [Текст] / Н.А. Феоктистов, И.В. Варламов, А.Н. Феоктистов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – № 3. – Т. 9. – С. 31–36.

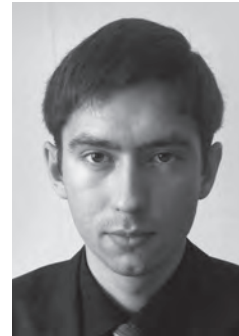
#### References

1. Kulakov M.V. Tehnologicheskie izmerenija i pribory dlja himicheskikh proizvodstv [Tekst] / M.V. Kulakov. – M.: Mashinostroenie, 1983. – 424 s.
2. Shkatov E.F. Tehnologicheskie izmerenija i KIP na predpriyatijah himicheskoy promyshlennosti [Tekst] / E.F. Shkatov. – M.: Himija, 1986. – 320 s.
3. Varlamov I.V. Nauchnye osnovy sozdaniya optojelektronnogo datchika davlenija bytovogo jelektrolizno-vodnogo generatora obrabotki metallov [Tekst] / I.V. Varlamov, A.N. Feoktistov // Sb. trudov «Sovremennye sredstva upravlenija bytovoj tehnikoj». – M.: MGUs, 2006.
4. Feoktistov A.N., Varlamov I.V. Principy postroenija i shemnye reshenija optojelektronnyh datchikov davlenija bytovogo JeVG dlja svarki i pajki. [Tekst] / I.V. Varlamov, A.N. Feoktistov // Materialy 11–j Mezhdunarodnoj NPK «Nauka servisu». – M.: MGUs, 2006.
5. Afanas'ev V.V. Transformatory toka [Tekst] / V.V. Afanas'ev, N.M. Adon'ev, V.M. Kibel', I.M. Sirota. – L.: Jenergoatomizdat, 1989. – 416 s.
6. Feoktistov A.N. Potrebljaemyj tok i koeficient moshhnosti pri paketnom vkljuchenii chisloimpul'snyh moduljatorov [Tekst] / A.N. Feoktistov // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2006. – № 3.
7. Feoktistov N.A. Rezhimy raboty sistem upravlenija istochnikov jelektropitanija bytovyh JeVG [Tekst] / N.A. Feoktistov, I.V. Varlamov, N.N. Teodorovich. – M., MGUs, 2004.
8. Feoktistov N.A. Sistema upravlenija i avtomaticheskogo regulirovanija rezhimov raboty jelektrolizno-vodnogo generatora s primeneniem mikroJeVM [Tekst] / N.A. Feoktistov, I.V. Varlamov, A.N. Feoktistov // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – № 3. – Т. 9. – С. 31–36.



***Aipov P.S.***  
***Aipov R.S.***

*доктор технических наук, профессор  
кафедры «Электрические машины  
и электрооборудование» ФГБОУ ВПО «Башкир-  
ский государственный аграрный университет»,  
Россия, г. Уфа*



***Нугуманов Р.Р.***  
***Nugumanov R.R.***

*аспирант кафедры «Электрические машины  
и электрооборудование»  
ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный  
аграрный университет», Россия, г. Уфа*

УДК 621.313: 621.926

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЖЕРНОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ С ДВУХСТОРОННИМ ЛИНЕЙНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ В ПРИВОДЕ**

Жерновые мельницы имеют преимущества перед существующими вальцовыми. Минеральные вещества сохраняются в муке, помолотой из цельных зерен. В муке обойной и второго сорта содержатся витамины В1, В2, РР и Е, в муке высшего и первого сортов их почти нет. Недостаток в организме, к примеру, витамина Е вызывает серьезные нарушения обмена веществ и бесплодие. В муке находятся также различные ферменты, которые оказывают большое влияние на приготовление хлеба. Хлеб, приготовленный по старым рецептам из свежесмолотого зерна, является источником необходимых человеку веществ, таких как калий, кальций, магний, цинк, натрий, медь, фосфор, железо, а также он содержит пищевую клетчатку (волокна). Клетчатка выводит излишки ферментов желудочного сока, уменьшает риск заболевания атеросклерозом, нормализует перистальтику кишечника и уровень сахара в крови, понижает давление и улучшает пищеварение.

Для производства этого ценного продукта необходима низкая частота вращения жерновов мельницы, а также своя рациональная частота вращения, которая требуется для помола определенного вида зерна.

Однако в настоящее время электрические двигатели вращения, используемые в приводе жерновых мельниц, не позволяют получить требуемую низкую частоту вращения с возможностью ее плавного регулирования без усложнения конструкции (использования ременных, клиноременных передач, преобразователей частоты, редукторов и т. д.).

В статье рассматривается жерновая мельница, защищенная патентом Российской Федерации, имеющая двухсторонний линейный асинхронный двигатель (ЛАД) в приводе, и математическая модель привода. Математическая модель привода составлена на основе уравнения движения жернова и статической механической характеристики ЛАД. Решение дифференциального уравнения движения выполнено в квадратурах. Получены зависимости установившейся частоты вращения жернова мельницы от перемещения индуктора относительно оси вращения при разных критических силах ЛАД. Найдены выражения для периферической скорости жернова.

*Ключевые слова:* математическая модель, двухсторонний линейный асинхронный двигатель, электропривод; жерновая мельница, частота вращения жернова.

## **THE MATHEMATICAL MODEL OF MILLSTONE DEVICES WITH LINEAR INDUCTION MOTOR IN DRIVE**

Millstone mills have advantages compared to existing Roller mills. Mineral substances in the flour milled from whole

grains are saved. In whole meal flour and second grade contain vitamins B1, B2, PP and E, in the higher flour and first grade are almost none. Lack of vitamin E causes severe violation of metabolism and infertility. Various ferments which have a great influence on the cooking of bread are contained in flour. Bread, prepared on the old recipes from freshly-ground grain is required source for the person substances such as potassium, calcium, magnesium, zinc, sodium, copper, phosphorus, iron and it also comprises dietary fiber. Fiber outputs excess gastric juice, reduces the risk of atherosclerosis, normalizes intestinal peristalsis and blood glucose levels, lowers blood pressure and improves digestion.

For the production of this valuable product requires low frequency of rotation of millstones mill and its rational speed, which is required for grinding a particular type of grain.

However, the current electric motors of rotation used in drive millstones of mills do not provide the required low frequency of rotation, with the ability to smooth control without complicating the construction (use of belt, V-belt transmission, frequency converters, reducers, etc.).

In the article the millstone mill, patent of Russian Federation and having double – sided linear induction motor (LIM) in drive and its mathematical model. Mathematical model of the drive is composed on the basis of the equation of motion millstone and static mechanical characteristics of LIM. The solution of the differential equation of motion performed in quadrate. Dependences the millstone mill's steady frequency of rotation from moving of inductor comparatively to axis of rotation at the different critical forces of LIM is obtained. The expressions for peripheral velocity of millstone are founded.

*Key words:* mathematical model, double-sided linear induction motor, millstone mill, electric drive, frequency of rotation of millstone.

На сегодняшний день вальцовые мельницы полностью вытеснили жерновые мельницы. Однако при помоле в вальцовых мельницах происходят потери ценных витаминов, ароматических веществ и ферментов, являющихся необходимыми для здоровья человека. В жерновых мельницах зерно подвергается многократному воздействию рабочих поверхностей (жерновов) и продвижению по спиралевидному пространству (бороздкам), благодаря чему все важнейшие составляющие зерна сохраняются.

В статье рассматривается жерновая мельница для получения «живой» муки с двухсторонним ЛАД в приводе [1, 2].

С целью анализа возможностей повышения эффективности работы жерновой мельницы с двухсторонним линейным асинхронным двигателем необходимо разработать математическую модель привода.

На рисунке 1 приведена кинематическая схема жерновой мельницы с двухсторонним ЛАД в приводе.

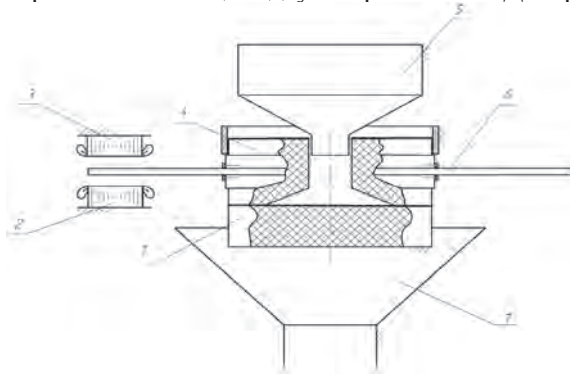


Рис. 1. Кинематическая схема жерновой мельницы с двухсторонним ЛАД в приводе: 1 – нижний неподвижный жернов; 2, 3 – индукторы ЛАД; 4 – верхний подвижный жернов; 5 – загрузочный бункер; 6 – вторичный элемент ЛАД; 7 – разгрузочный бункер

Мельница работает следующим образом. При подаче блоком управления трехфазной системы напряжений на обмотки индукторов 2 и 3 ЛАД появляются бегущие магнитные поля. Под действием бегущих магнитных полей во вторичном элементе 6 ЛАД, который выполнен в виде диска из электропроводного немагнитного материала, наводятся электродвижущие силы и токи. При взаимодействии токов вторичного элемента 6 с бегущими магнитными полями создается электромагнитная сила, приложенная к вторичному элементу и направленная в сторону бегущего поля. Под действием этой силы вторичный элемент 6 начинает вращаться относительно индукторов ЛАД, передавая вращение верхнему подвижному жернову 4. Материал, подлежащий измельчению, подается через загрузочный бункер 5 в рабочую зону, образованную соприкасающимися поверхностями верхнего подвижного 4 и нижнего неподвижного 1 жерновов. При вращении жернова 4 зерно, попав в рабочую зону, превращается в муку, которая сходит с периферии плоских поверхностей жерновов в разгрузочный бункер 7.

Уравнение, описывающее движение рабочего органа (жернова), может быть представлено в виде:

$$m \cdot \ddot{x} = F(\dot{x}) - \beta \dot{x} - N, \quad (1)$$

где  $m$  – масса верхнего жернова с зерном в рабочей зоне, кг;  $\ddot{x}(t)$ ,  $\dot{x}(t)$  – вторая и первая производные пути перемещения рабочего органа во времени;  $F(\dot{x})$  – сила, развиваемая ЛАД, Н;  $\beta$  – коэффициент вязкого трения, определяемый параметрами перерабатываемого зерна и характером рабочих поверхностей жерновов;  $N$  – сила сухого трения, определяемая видом зерна и характеристиками материала жерновов, Н.

Мельница работает в установившемся режиме, поэтому для определения силы, развиваемой ЛАД, может быть использовано уравнение Клосса, составленное по схеме замещения двигателя [3]:

$$F(\dot{x}) = \frac{F_k(2+q)S_k(V_1 - \dot{x})V_1}{S_k^2 V_1^2 + (V_1 - \dot{x})^2 + S_k(V_1 - \dot{x})qV_1}, \quad (2)$$

где  $F_k$  – критическая сила ЛАД, Н;  $S_k$  – критическое скольжение ЛАД;  $V_1$  – синхронная скорость ЛАД, м/с;  $q$  – параметр двигателя.

Система уравнений (1) и (2) решается только методами численного интегрирования.

$$B_0 = \frac{0.5S_k(2+q)}{(0.25 + S_k^2 + 0.5qS_k)^2} + \frac{0.5S_k(2+q)(S_k^2 - 0.25)}{(0.25 + S_k^2 + 0.5qS_k)^2} + \frac{S_k(2+q)(0.5 + 0.5qS_k)^2}{(0.25 + S_k^2 + 0.5qS_k)^3} - \frac{S_k(2+q)(0.5 + 0.5qS_k) + 0.25S_k(2+q)}{(0.25 + S_k^2 + 0.5qS_k)^2};$$

$$B_1 = -2\left[\frac{0.5S_k(2+q)(S_k^2 - 0.25)}{(0.25 + S_k^2 + 0.5qS_k)^2} + 2\frac{S_k(2+q)(0.5 + 0.5qS_k)^2}{(0.25 + S_k^2 + 0.5qS_k)^3}\right]/v_1;$$

$$B_2 = 4\left[\frac{S_k(2+q)(0.5 + 0.5qS_k)^2}{(0.25 + S_k^2 + 0.5qS_k)^3} - \frac{S_k(2+q)(0.5 + 0.5qS_k) + 0.25S_k(2+q)}{(0.25 + S_k^2 + 0.5qS_k)^2}\right]/v_1^2.$$

После подстановки (3) в (1) дифференциальное уравнение движения жернова имеет вид:

$$m\ddot{x} = F_k B_0 - N + (F_k B_1 - \beta)\dot{x} + F_k B_2 \dot{x}^2 \quad (4)$$

Уравнение (4) представляет собой дифференциальное уравнение Рикатти [6], которое решается относительно периферической скорости и ускорения жернова в квадратурах и имеет вид:

$$\dot{x}(t) = Y \left( \frac{2}{k_0 e^{t/T} - 1} + 1 \right) - \frac{d}{2f}, \quad (5)$$

где  $k_0 = \frac{2Y}{d/2f - Y} + 1$ ;

$$Y = \sqrt{\frac{(\beta - F_k B_1)^2}{4(F_k B_2)^2} - \frac{F_k B_0 - N}{F_k B_2}};$$

$$T = -\frac{m}{2F_k B_2 Y}; \quad \frac{d}{2f} = -\frac{\beta - F_k B_1}{2F_k B_2}.$$

Результаты расчетов периферической скорости и ускорения жернова мельницы в зависимости от критической силы ЛАД представлены на рисунке 2, ( $Fk = 350$  Н;  $Fk' = 550$  Н;  $Fk'' = 750$  Н;  $s_k = 0,87$ ;  $v_1 = 6$  м/с;  $N = 28$  Н;  $\beta = 21$  Нс/м).

Из графиков, представленных на рисунке 2, следует, что установившиеся скорости жернова ( $V_{ycm}$ ) при  $Fk = 350$  Н имеет значение  $V_{ycm} = 5,1$  м/с через  $t = 12$  с; при  $Fk' = 550$  Н –  $V'_{ycm} = 5,6$  м/с через  $t = 9$  с; при  $Fk'' = 750$  Н –  $V''_{ycm} = 5,8$  м/с через  $t = 8$  с. Чем больше

Для обеспечения приводом требований энергетической эффективности необходимо обеспечить после включения наибольшее ускорение. При этом уменьшается время перехода мельницы в установившийся режим. Известно, что наибольшее ускорение при включении привода обеспечивает ЛАД с  $S_k = 0,8 \div 1$  [4].

Для этих значений  $S_k$  сила ЛАД может быть описана зависимостью [5]:

$$F(\dot{x}) = F_k (B_0 + B_1 \dot{x} + B_2 \dot{x}^2), \quad (3)$$

где

значение критической силы ЛАД, тем меньше время разгона жернова мельницы до установившейся скорости.

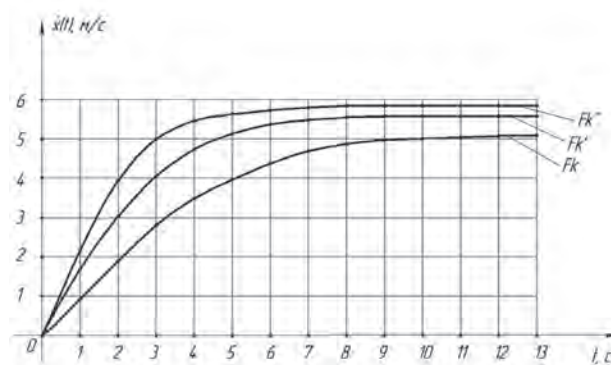


Рис. 2. Результаты расчетов периферической скорости жернова мельницы в зависимости от критической силы ЛАД

Частота вращения жернова определяется следующим образом:

$$n = \frac{V}{2\pi R} 60, \quad (6)$$

где  $R$  – расстояние расположения ЛАД от оси жернова, м.

Результаты расчетов установившейся частоты вращения жернова от перемещения индуктора ЛАД относительно оси жернова при разных критических силах ЛАД представлены на рисунке 3.

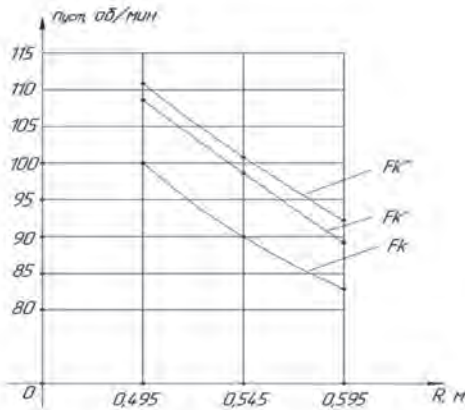


Рис. 3. Результаты расчетов установившейся частоты вращения жернова от перемещения индуктора относительно оси жернова при разных критических силах ЛАД

Из рисунка 3 следует, что жерновая мельница с двухсторонним линейным асинхронным двигателем в приводе имеет возможность регулирования частоты вращения перемещением ЛАД относительно оси жернова. Причем, чем дальше расположен индуктор ЛАД от оси жернова, тем меньше частота вращения жернова, и наоборот, чем ближе индуктор ЛАД к оси мельницы, тем выше частота вращения жернова. Отмеченный момент является очень важным свойством для жерновых мельниц, так как ни один другой привод не позволяет обеспечить плавное регулирование частоты вращения без использования дополнительного оборудования (клиноременные передачи, редукторы, преобразователи частоты и т. д.).

**Выводы:**

- 1) разработана математическая модель жерновой мельницы с двухсторонним линейным асинхронным двигателем в приводе;
- 2) получены неизвестные ранее зависимости параметров движения жернова от характеристик перерабатываемого зерна (масса, влажность, вид зерна), материала и характеристик жерновов и от характеристик ЛАД ( $F_k, s_k, v, q$ );
- 3) установлено, что мельница с ЛАД в приводе имеет возможность плавного регулирования частоты вращения, необходимой для получения «живой» муки.

*Список литературы*

1. Аипов Р.С. Мельница для производства «живой» муки [Текст] / Р.С. Аипов, Р.Р. Нугуманов // Сельский механизатор. – 2012. – № 8. – С. 27.
2. Патент № 2482920, Российская Федерация, МПК7 В02С7/16. Устройство для измельчения твердых материалов [Текст] / Р.С. Аипов, Р.Р. Нугуманов; заявитель и патентообладатель Р.С. Аипов, Р.Р. Нугуманов (RU). – № 2012106826/13; заявл. 24.02.2012; опубл. 27.05.2013. – Бюл. № 15. – 7 с.
3. Сипайлов Г.А. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / Г.А. Сипайлов, А.В. Лоос. – М.: Высшая школа, 1980. – 176 с.
4. Аипов Р.С. Основы построения и теории линейных асинхронных приводов с упругими накопителями энергии [Текст] / Р. С. Аипов. – Уфа: БГАУ, 2006. – 330 с.
5. Аипов Р.С. Линейные электрические машины и приводы на их основе [Текст] / Р.С. Аипов. – Уфа: БГАУ, 2003. – 201 с.
6. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 831 с.

*References*

1. Aipov R.S. Mel'nica dlja proizvodstva «zhivoj» muki [Tekst] / R.S. Aipov, R.R. Nugumanov // Sel'skij mehanizator. – 2012. – № 8. – S. 27.
2. Patent № 2482920, Rossijskaja Federacija, MPK7 B02C7/16. Ustrojstvo dlja izmel'chenija tverdyh materialov [Tekst] / R.S. Aipov, R.R. Nugumanov; zajavitel' i patentoobladatel' R.S. Aipov, R.R. Nugumanov (RU). – № 2012106826/13; zajavl. 24.02.2012; opubl. 27.05.2013. – Bjul. № 15. – 7 s.
3. Sipajlov G.A. Matematicheskoe modelirovanie jelektricheskikh mashin [Tekst] / G.A. Sipajlov, A.V. Loos. – M.: Vysshaja shkola, 1980. – 176 s.
4. Aipov R.S. Osnovy postroenija i teorii linejnyh asinhronnyh privodov s uprugimi nakopiteljami jenergii [Tekst] / R. S. Aipov. – Ufa: BGAU, 2006. – 330 s.
5. Aipov R.S. Linejnye jelektricheskie mashiny i privody na ih osnove [Tekst] / R.S. Aipov. – Ufa: BGAU, 2003. – 201 s.
6. Korn G. Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov [Tekst] / G. Korn, T. Korn. – M.: Nauka, 1984. – 831 s.





**Зикий А.Н.**  
**Zikiy A.N.**

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



**Зламан П.Н.**  
**Zlaman P.N.**

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



**Власенко Д.В.**  
**Vlasenko D.V.**

ассистент кафедры «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» Технологического института ФГБОУ ВПО «Южный федеральный университет», Россия, г. Таганрог

УДК 621.396.6

## ПЯТИОКТАВНЫЙ СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТ

Гетеродин широкодиапазонного приемника является его важнейшей составной частью. Часто гетеродин-синтезатор частот оказывается сложнейшей составной частью приемника. В последние годы фирма Analog Devices создала микросхему синтезатора частот ADF4350, которая работает в диапазоне частот 137,5–4400 МГц с перекрытием в 32 раза по частоте, при этом имеет встроенный ГУН. Такая микросхема позволяет создавать широкодиапазонные приемники с существенно большим перекрытием по частоте, чем раньше, поэтому исследование синтезатора частот на основе БИС ADF4350 является актуальным. Особенно большой интерес это исследование имеет при разработке приемников для радиомониторинга.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование основных характеристик синтезатора частоты на основе БИС ADF4350.

Объектом исследования является пробная плата фирмы Analog Devices. Представлены результаты экспериментального исследования синтезатора частот ADF4350EB1Z, работающего в диапазоне от 137 до 4400 МГц. Дана оценка паразитных продуктов в спектре выходного сигнала. Представлены фото спектра выходного сигнала, демонстрирующего малую ширину спектральной линии. Измеренная погрешность установки частоты на двух экземплярах синтезатора не превышает 1 кГц. Проведено измерение выбега частоты за 13 минут после включения. Показано, что выбег частоты составляет не более 200 Гц. Перечислены достоинства исследованной модели синтезатора частот по сравнению с другими: широкий диапазон частот, низкая стоимость, дружественный интерфейс. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании приемо-передающей аппаратуры связи, приемников для радиомониторинга, передатчиков для подавления линий связи, измерительной аппаратуры, в том числе измерительных генераторов, анализаторов спектра, анализаторов цепей классов X1, P2 и P4. Статья расширяет представление о линейке синтезаторов частот фирмы Analog Devices, демонстрирует высокую динамику роста электрических и других параметров продукции этой фирмы.

*Ключевые слова:* синтезатор частот с петлей ФАПЧ, стабильность частоты, спектр выходного сигнала, СВЧ.

## FIVE-OCTAVES FREQUENCY SYNTHESIZER

Heterodyne is the most important part of wideband radioreceiver. Often heterodyne or frequency synthesizer is the most difficult part of receiver. In recent years Analog Devices company made frequency synthesizer chip

ADF4350, which works in 137,5 – 4400 MHz band with frequency overlap in frequency by 32 times and has integrated voltage-controlled oscillator. Such chip allows us to create wideband receivers with significantly greater frequency overlapping than before. So, experimental research of main characteristics of frequency synthesizers based on ADF4350 is actual. This research is of great interest for development of radio monitoring receivers.

The intent of this article is experimental research of main characteristics of frequency synthesizer based on ADF4350 chip.

The object of research is test PCB company Analog Devices.

The results of experimental research of ADF4350EB1Z frequency synthesizer for 137-4400 MHz band are presented. Value of spurious products in output spectrum is assessed. Photos of output spectrum show narrow spectral width of output signal are presented. Measured error of frequency setting of two copies of frequency synthesizer does not exceed 1 kHz. It is shown that frequency drift does not exceed 200 Hz. Following advantages of researched model are listed: wide band, low cost, user-friendly interface. The results of research could be used for development of receiving and transmitting equipment, radio monitoring receivers, communication links suppression transmitters, measurement equipment including test generators, spectrum analyzers and circuit analyzers of class H1, R2, R4. This article extends the idea of the line of frequency synthesizers by Analog Devices company and demonstrates high growth dynamics of electrical and many other parameters of production of this company.

*Key words:* frequency synthesizer with PLL, frequency stability, output spectrum, microwave.

На рисунке 1 можно видеть фото синтезатора частоты ADF4350EB1Z [1–6].

Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 2. Пи-

тание синтезатора осуществлялось по интерфейсу USB. В качестве индикатора выходного сигнала использован анализатор спектра типа 8564ЕС фирмы Agilent Technology.

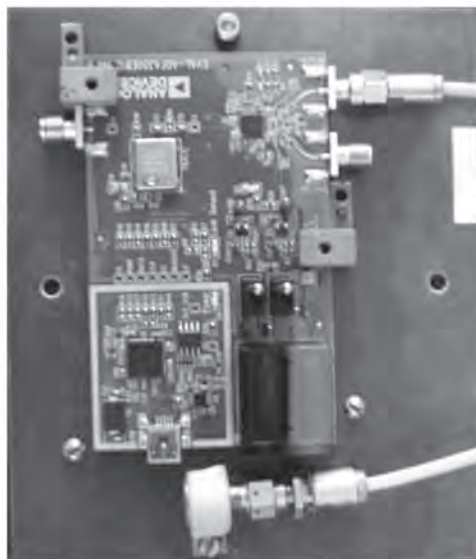


Рис. 1. Плата синтезатора ADF4350EB1Z



Рис. 2. Структурная схема измерительной установки

Управление синтезатором частоты производится от компьютера с помощью специального программного обеспечения, поставляемого фирмой Analog Devices вместе с платой синтезатора. В данном случае была установлена частота 1 ГГц и мощ-

ностью 3,7 дБм.

В ходе эксперимента проводилось фотографирование спектра сигнала при различных полосах обзора. Результаты фотографирования представлены на рисунках 3–9.

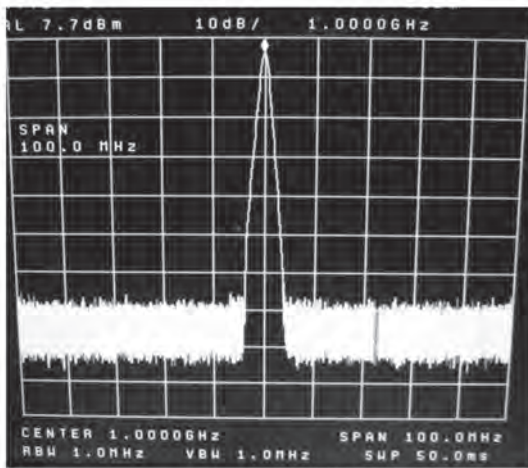


Рис. 3. Спектр сигнала при полосе обзора 100 МГц

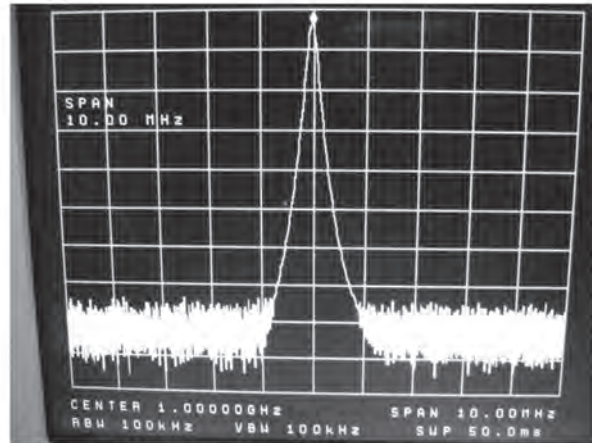


Рис. 4. Спектр сигнала при полосе обзора 10 МГц

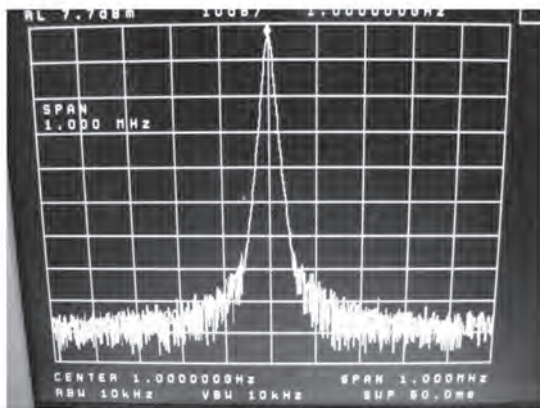


Рис. 5. Спектр сигнала при полосе обзора 1 МГц

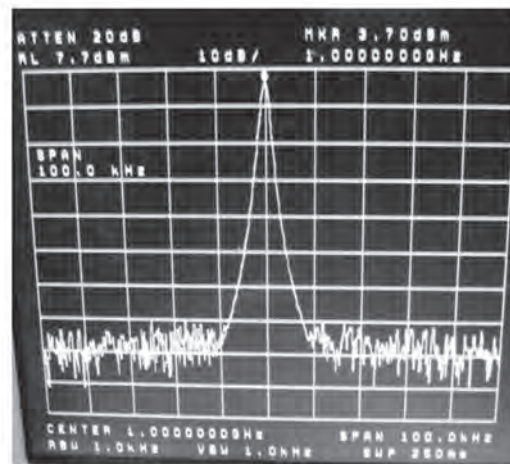


Рис. 6. Спектр сигнала при полосе обзора 100 кГц

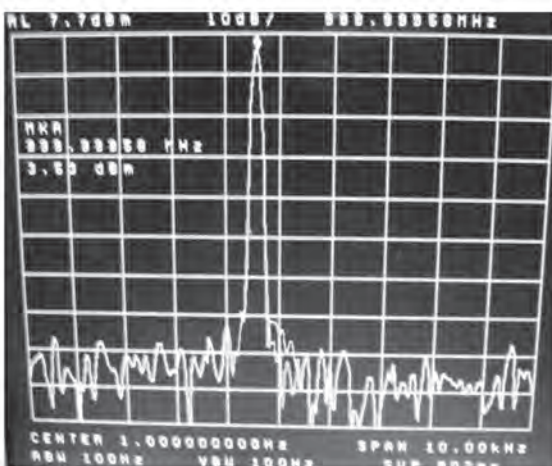


Рис. 7. Спектр сигнала при полосе обзора 10 кГц

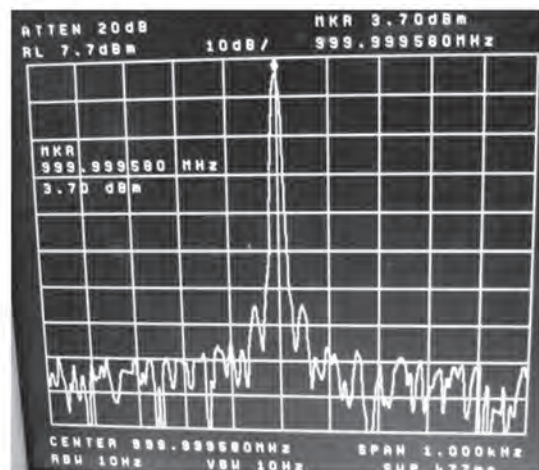


Рис. 8. Спектр сигнала при полосе обзора 1 кГц

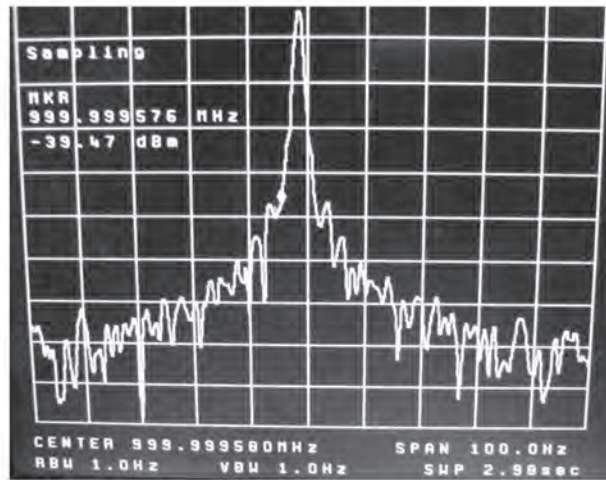


Рис. 9. Спектр сигнала при полосе обзора 100 Гц

Во втором эксперименте проводилось измерение погрешности установки частоты на двух экземплярах синтезаторов (СЧ1 и СЧ2). Результаты

занесены в таблицу 1, из которой видно, что СЧ1 имеет погрешность установки частоты 311 Гц, а СЧ2 – 911 Гц.

Таблица 1

**Результаты измерений точности установки частоты**

СЧ2		СЧ1	
Задано, МГц	Измерено, МГц	Задано, МГц	Измерено, МГц
970	970,000261	1215	1215,000911
990	990,000256	1200	1200,000904
1010	1010,000268	1180	1180,000890
1030	1030,000273	1160	1160,000873
1110	1110,000287	1140	1140,000851
1130	1130,000290	1100	1100,000818
1150	1130,000305	1020	1020,000746
1170	1170,000316	1000	1000,000736
1190	1190,000317	980	980,000726
1210	1210,000311	960	960,000706

В третьем эксперименте проводилось измерение выбега частоты СЧ1. Результаты занесены в таблицу 2 и на рисунок 10, из которого видно, что

выбег частоты за 13 минут после включения составляет не более 200 Гц.

Таблица 2

**Результаты измерения выбега частоты**

Время, час - мин	Частота, МГц
16 <sup>47</sup>	1215,000815
16 <sup>48</sup>	1215,000860
16 <sup>49</sup>	1215,000893
16 <sup>50</sup>	1215,000911

Время, час - мин	Частота, МГц
16 <sup>51</sup>	1215,000941
16 <sup>52</sup>	1215,000959
16 <sup>53</sup>	1215,000971
16 <sup>54</sup>	1215,000981
16 <sup>55</sup>	1215,000985
16 <sup>56</sup>	1215,000989
16 <sup>57</sup>	1215,000996
16 <sup>58</sup>	1215,000987
16 <sup>59</sup>	1215,000977
17 <sup>00</sup>	1215,000966

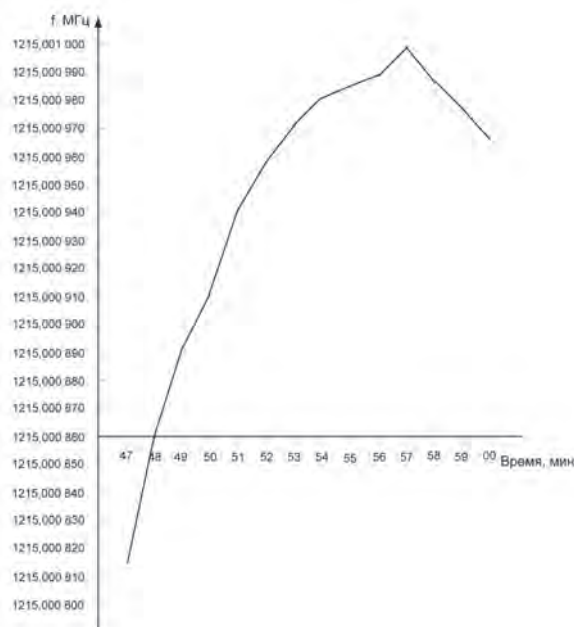


Рис. 10. Выбег частоты синтезатора за 13 минут

### Выводы

1. Исследованный синтезатор частот имеет следующие характеристики:

- диапазон рабочих частот 137–4400 МГц;
- шаг сетки частот 100 кГц;
- подавление паразитных продуктов в спектре выходного сигнала не менее 70 дБ;
- паразитные дискретные составляющие в спектре не наблюдаются;
- ширина спектральной линии менее 10 Гц на уровне минус 30 дБ от максимума;
- погрешность установки частоты не превышает 1 кГц;
- выбег частоты составляет не более 200 Гц за 13 минут после включения на частоте 1215 МГц.

2. Дополнительным преимуществом данного

синтезатора является его относительно низкая стоимость (150–200 долларов США) на рынке России, в то время как отечественные аналоги, с худшими параметрами, предлагаются по цене более 1000 долларов США.

### Список литературы

1. *Wideband Synthesizer with Integrated VCO ADF4350* [Electronic resource]. – URL: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADf4350.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADf4350.pdf) (дата обращения 21.05.2013).

2. *Evaluation Board for Fractional – N/Integer – PLL Frequency Synthesizer ADF4350EB1Z* [Electronic resource]. – URL: [http://www.analog.com/static/imported-files/user\\_guides/UG-109.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/user_guides/UG-109.pdf) (дата обращения 24.05.2013).

3. *Широкополосный* синтезатор частот с ФАПЧ и встроенным ГУН [Текст] // Мир электронных компонентов. – 2009. – № 1. – с. 6.

4. *Никитин Ю.* Полный радиочастотный синтезатор с дробным коэффициентом деления ADF4350 [Текст] / Ю. Никитин, С. Дмитриев // Компоненты и технологии. – 2010. – № 3. – С. 32–38.

5. *Рембовский А.М.* Радиомониторинг. Задачи, методы, средства. [Текст] / А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин; под ред. А.М. Рембовского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 492 с.

6. *Evaluation Board User Guide UG-110 ADF4350EB2Z.* – Analog Devices. – 12 p.

*References*

1. *Wideband Synthesizer with Integrated VCO ADF4350* [Electronic resource]. – URL: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADf4350.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADf4350.pdf) (data obrashhenija 21.05.2013).

2. *Evaluation Board for Fractional – N/Integer - PLL Frequency Synthesizer ADF4350EB1Z* [Electronic resource]. – URL: [http://www.analog.com/static/imported-files/user\\_guides/UG-109.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/user_guides/UG-109.pdf) (data obrashhenija 24.05.2013).

3. *Shirokopolosnyj* sintezator chastot s FAPCh i vstroennym GUN [Tekst] / Mir jelektronnyh komponentov. – 2009. – № 1. – s. 6.

4. *Nikitin Ju.* Polnyj radiochastotnyj sintezator s drobnym kojefficientom delenija ADF4350 [Tekst] / Nikitin Ju., Dmitriev S. // Komponenty i tehnologii. – 2010. – № 3. – S. 32–38.

5. *Rembovskij A.M.* Radiomonitoring. Zadachi, metody, sredstva. [Tekst] / A.M. Rembovskij, A.V. Ashihmin, V.A. Koz'min; pod red. A.M. Rembovskogo. – М.: Gorjachaja linija – Telekom, 2006. – 492 s.

6. *Evaluation Board User Guide UG-110 ADF4350EB2Z.* – Analog Devices. – 12 s.



**Рогинская Л.Э.  
Roginskaya L.E.**

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



**Рахманова Ю.В.  
Rakhmanova Yu.V.**

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



**Шапиро С.В.  
Shapiro S.V.**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа

УДК 621.365.5

**РЕЗОНАНСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ПИТАНИЯ РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Рассмотрены разрядно-импульсные технологии, использующие энергию, накопленную в электрическом поле конденсатора. К ним можно отнести электросинтез озона, лазерную технику, электроимпульсную и магнитно-импульсную обработку материалов. Применение подобных технологий для электросинтеза озона объясняется тем, что он является экологически чистым окислителем, применяемым, например, для подготовки питьевой воды и очистки отходящих газов, а использование импульсных технологических лазеров позволяет осуществлять высокоточную обработку материалов. Причем эти технологии являются энергосберегающими. Для согласования вольт-амперных характеристик источников питания с импульс-

ной нагрузкой используются емкостные накопители энергии, устройства, в которых мощность, отдаваемая нагрузке во время разряда, во много раз превышает мощность, потребляемую от первичного источника питания. Так как электромагнитные процессы при соответствующих допущениях в источниках питания для обоих технологических процессов за период изменения тока аналогичны, рационально применить одинаковые источники питания, содержащие, наряду с полупроводниковым преобразователем, согласующий повышающий трансформатор. Частота источников питания ограничивается величиной 10 кГц, так как в первом случае дальнейшее увеличение частоты приводит к снижению выхода озона, а во втором – к ухудшению энергетических показателей высоковольтного согласующего трансформатора. В результате схематического моделирования источников питания и расчета математической модели было доказано, что силовой модуль системы источник питания – повышающий трансформатор – разрядно-импульсная нагрузка может быть использован для анализа электромагнитных процессов, при которых потребляется энергия, накопленная в электрическом поле конденсатора. Наличие реального согласующего трансформатора изменяет амплитуды токов и напряжений резонансного нагрузочного контура, уменьшает величину выходной мощности и увеличивает значение потребляемой. Полученные в результате анализа и математического моделирования соотношения, могут быть использованы для определения параметров модулей, входящих в систему источник питания – повышающий трансформатор – нагрузка.

*Ключевые слова:* разрядно-импульсная технология, озонатор, резонансный контур, емкостной накопитель энергии, электромагнитный модуль.

## THE RESONANT CONVERTER OF FREQUENCY FOR DISCHARGING PULSE ELECTROTECHNOLOGICAL COMPLEXES

Considered discharge - pulse technologies that use energy stored in the electric field of the capacitor. These include electrosynthesis ozone, laser technology, electro-pulse and magnetic-pulse processing of materials. The use of such technologies for electrosynthesis of ozone due to the fact that it is environmentally friendly oxidants used, for example, for drinking water preparation and purification of exhaust gases and the use of pulsed lasers allow to carry out high-precision processing of materials. Also moreover, these technologies are energy-efficient. For the coordination of volt-ampere characteristics of power sources with pulse load used capacitive energy storage devices, in which power, output load at the time of discharge, many times greater than the power consumed from the primary power source. As electromagnetic processes at the relevant assumptions in power supplies for both technological processes for current period changes are similar to efficiently apply the same power sources, containing, along with semiconductor converter, matching up transformer. Frequency of power sources is limited to the value of 10 kHz, as in the first case, a further increase in the frequency leads to a decrease in the output of ozone, and in the second - to the deterioration of the energy parameters of high-voltage matching transformer. As a result of circuit simulation of power sources and calculation of the mathematical model was proven that the power system module power supply - up transformer - discharge-pulse load can be used for analysis of electromagnetic processes in which consumed the energy stored in the electric field of the capacitor. Availability of real-matching transformer changes the amplitude of currents and voltages resonance load circuit reduces the output capacity and increases the consumption value. Obtained from the analysis and mathematical modelling ratio, can be used to define the parameters of modules included in the system of power supply - up transformer load.

*Key words:* digit and pulse technology, ozonizer, resonant contour, capacitor energy store, electromagnetic module.

### Введение

К разрядно-импульсным технологиям, потребляющим энергию, накопленную в электрическом поле конденсатора, можно отнести электросинтез озона, лазерную технику, электроимпульсную и магнитно-импульсную обработку материалов. Применение подобных технологий для электросинтеза озона объясняется тем, что он является экологически чистым окислителем, применяемым, например, для подготовки питьевой воды и очистки отходящих газов, а использование импульсных технологических лазеров позволяет осуществлять

высокоточную обработку материалов, причем эти технологии являются энергосберегающими [1].

В обоих случаях повышение частоты улучшает энергетические показатели установок. Действительно, активная мощность барьерного разряда при синусоидальном напряжении связана с параметрами источника питания и озонатора следующей зависимостью [2]:

$$P = 4 \cdot f C_{\sigma} U_z \left[ U_M - U_z \left( 1 + \frac{C_{pn}}{C_{\sigma}} \right) \right], \quad (1)$$

где  $f$  – частота синусоидального напряжения;  $C_{\sigma}$  и

$C_{pn}$  – емкости диэлектрического барьера и разрядного промежутка;  $U_c$  – величина напряжения на разрядном промежутке при наличии разряда;  $U_M$  – амплитуда напряжения питания.

Из (1) следует, что увеличение мощности разряда без увеличения напряжения возможно при увеличении частоты.

Для согласования вольт-амперных характеристик источников питания с импульсной нагрузкой используются емкостные накопители энергии (ЕНЭ) – устройства, в которых мощность, отдаваемая нагрузке во время разряда, во много раз превышает мощность, потребляемую ими от первичного источника питания, так как  $t_p \leq t_s$ . Увеличение напряжения на накопительном конденсаторе  $\Delta U'_{cn}$ , приведенное к первичной обмотке трансформатора, за период изменения тока при питании от автономного резонансного инвертора равно:

$$\Delta U'_{cn} = \frac{8U_d C_k}{C_n} \quad (2)$$

В (2)  $C_k$ ,  $C'_n$  – емкость коммутирующего конденсатора инвертора и приведенная к первичной обмотке трансформатора емкость накопительного конденсатора, причем  $C_k \leq C'_n$ . Очевидно, чем меньше период, то есть, чем больше частота колебаний, тем быстрее произойдет заряд конденсатора.

Частота источников питания ограничивается величиной 10 кГц, так как в первом случае дальнейшее увеличение частоты приводит к снижению вы-

хода озона [2], а во втором – к ухудшению энергетических показателей высоковольтного согласующего трансформатора [3].

Так как электромагнитные процессы при соответствующих допущениях в источниках питания для обоих технологических процессов за период изменения тока аналогичны, рационально применить одинаковые источники питания, содержащие, наряду с полупроводниковым преобразователем, согласующий повышающий трансформатор [4]. Работы, связанные с изучением влияния согласующих высокочастотных трансформаторов на электромагнитные процессы в схемах силовой электроники, проводились профессором НГТУ И.В. Блиновым, которым был предложен ряд имитационных моделей подобных устройств [5, 6].

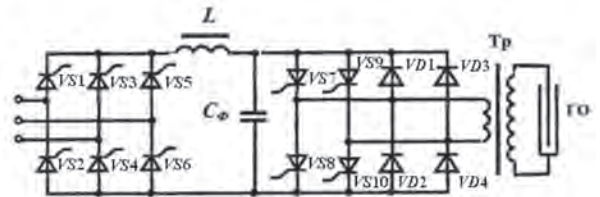


Рис. 1. Силовой модуль схемы электросинтеза озона

Силовой модуль схемы электросинтеза озона приведен на рисунке 1. В этой схеме роль коммутирующей индуктивности играет индуктивность рассеяния трансформатора, а коммутирующей емкости – емкость барьера генератора озона [7].

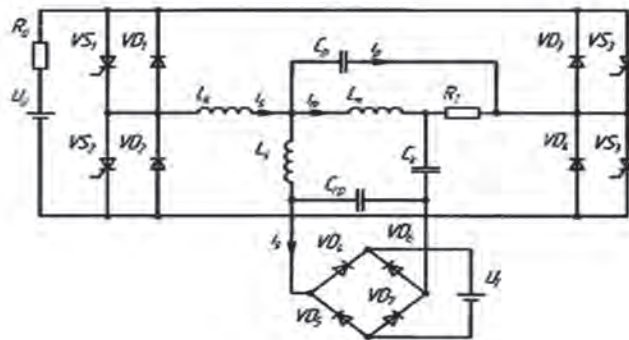
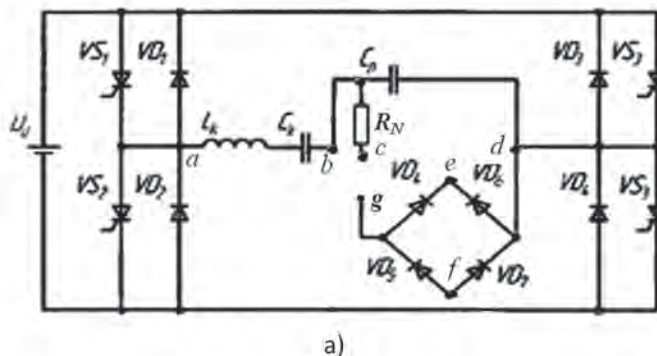


Рис. 2. Схема замещения силовой части электросинтеза озона





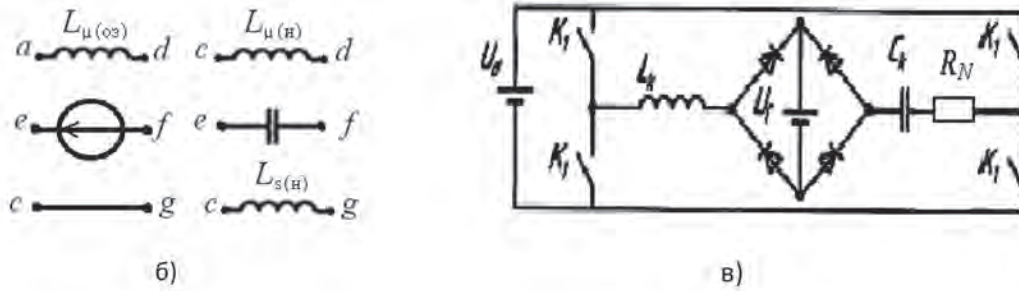


Рис. 3. Схема замещения источника питания для разрядно-импульсного электротехнологического комплекса: а) общая часть схемы; б) элементы схемы замещения озонатора и ЕНЭ; в) с учетом потерь

Если представить трансформатор и нагрузку в виде схем замещения, а первичное напряжение в виде источника постоянного напряжения, принципиальная схема силового модуля озонатора будет иметь вид, приведенный на рисунке 2.

Силовой модуль представляет собой соединение трех блоков: резонансного тиристорного (или транзисторного) инвертора, высоковольтного повышающего трансформатора и нагрузки. Нагрузкой могут быть озонатор или высоковольтный выпрямитель, нагруженный на накопительный конденсатор (рис. 3, а). Параметры нагрузки приведены к первичной обмотке трансформатора. Схема замещения озонатора представляет собой две последовательно

соединенные емкости:  $C_o$  и  $C_{pn}$ , ( $C_{pn} \leq C_o$ ), причем к зажимам подключен диодный выпрямитель, нагруженный на противо-ЭДС, равную напряжению пробоя  $U_z$ . Элементы схем замещения показаны на рисунке 3, б [8]. Для идеального трансформатора ( $L_\mu = \infty$ ,  $C_p = C_{pn} = 0$ ,  $R_N = 0$ ) электромагнитные процессы в преобразователе практически идентичны в обоих случаях. Они могут быть исследованы решением дифференциального уравнения с переменной правой частью для одного периода изменения тока. При  $\pi \geq \omega_0 t \geq 0$  правая часть равна  $U_0 - U_z$ , при

$$2\pi \geq \omega_0 t \geq \pi \text{ правая часть } -U_0 + U_z, \text{ а } \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_K C_K}} \text{ или } \frac{1}{L_S C_o}$$

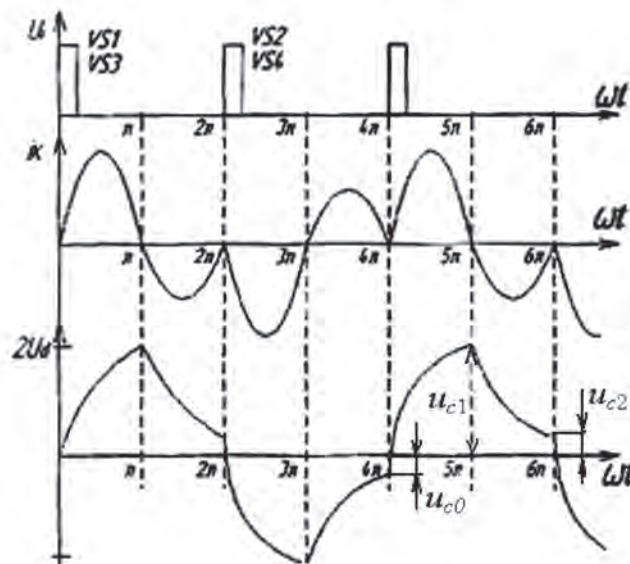


Рис. 4. Осциллограммы тока в коммутующей индуктивности и напряжения на коммутующей емкости

Расчетные осциллограммы тока в коммутующей индуктивности и напряжения на коммутующей емкости приведены на рис 4. Основные фор-

мулы для определения тока и напряжения в схеме приведены в таблице 1 в абсолютных единицах, а в таблице 2 – в относительных.

**Уравнения и величины, характеризующие параметры токов и напряжений генераторов озона емкостных накопителей без учета потерь**

Характерные точки	Мгновенные значения
$u_{c0} = -2U_2 \text{ или}$ $u_{c0} = -2u_{cN} \text{ или}$ $u_{c0} = u_{c2} = -2U_{cN};$ $u_{c1} = 2U_0;$ $I_{\max} = \frac{U_0 + U_2}{\rho}$ $\text{или } I_{\max} = \frac{U_0 + U_{cN}}{\rho}.$	$\frac{d^2 U_c}{dt^2} + \frac{U_c}{L_S C_{\delta}} = \frac{U_0 - U_2}{L_S C_{\delta}};$ $u_c = U_0 - U_2 + (U_0 + U_2) \cos \omega_0 t;$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_S C_{\delta}}} \text{ или } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_K C_K}};$ $i = \frac{U_0 + U_2}{\rho} \sin \omega_0 t; L_S \rightarrow L_K, C_{\delta} \rightarrow C_K;$ $\rho = \sqrt{\frac{L_S}{C}} \text{ или } \rho = \sqrt{\frac{L_K}{C_K}}.$
$2\pi \geq \omega t \geq \pi; \pi \geq \omega \left( t - \frac{\pi}{\omega_0} \right) = \omega_0 t_1 \geq 0; \pi \geq \omega_0 t_1 = \omega_0 t - \pi \geq 0.$	
$u_{c2} = 2U_2;$ $I_{\min} = -\frac{U_0 - U_2}{\rho}$ $\text{или } I_{\min} = -\frac{U_0 - u_{cN}}{\rho}$	$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{u_c}{L_S C_{\delta}} = U_0 + U_2 \text{ или } \frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{u_c}{L_S C_{\delta}} = U_0 + U_{cN};$ $i = -\frac{u_0 - u_c}{\rho} \sin \omega_0 t_1 \text{ или } i = -\frac{U_0 - U_{cN}}{\rho} \sin \omega_0 t_1;$ $u_c = U_0 + U_2 + (U_0 - U_2) \cos \omega_0 t_1 \text{ или}$ $u_c = U_0 + U'_{cN} + (U_0 - U'_{cN}) \cos \omega_0 t_1.$

При расчетах использовались следующие базовые величины:  $U_{\text{баз}} = u_0, R_{\text{баз}} = \rho, \omega_{\text{баз}} = \frac{1}{\sqrt{L_S C_{\delta}}}$ , или  $\omega_{\text{баз}} = \frac{1}{\sqrt{L_K C_K}}, \rho = \sqrt{\frac{L_S}{C}}$ , или  $\rho = \sqrt{\frac{L_K}{C_K}}$ .

**Уравнения и величины, характеризующие параметры токов и напряжений генераторов озона  
или емкостных накопителей энергии без учета потерь в относительных единицах**

Характерные точки	Мгновенные значения
$\pi \geq t_* \geq 0$	
$u_{c0*} = -2U_{z*}$ или $U_{c0*} = -2u_{cN*}$ ;  $u_{c1*} = 2$ ;  $I_{\max} = 1 + U_{z*}$ или $I_{\max} = 1 + u_{cN*}$ .	$\frac{d^2 u_{c*}}{dt_*^2} + u_{c*} = 1 - U_{z*}; i_{k*} = \frac{du_{c*}}{dt_*};$  $u_{c*} = 1 - U_{z*} - (1 + U_{z*}) \cos t_*$ или $u_{c*} = 1 - u_{cN*} - (1 + u_{cN*}) \cos t_*;$  $i_{k*} = (1 + U_{z*}) \sin t_*$ или $i_{k*} = (1 + u_{cN*}) \sin t_*.$
$2\pi \geq t_* \geq \pi, t_{1*} = t_* - \pi, \pi \geq t_{1*} \geq 0.$	
$u_{c2*} = 2U_{z*}$ или $u_{c2*} = 2U_{cN*}$ ;  $I_{\min} = -(1 - u_{z*})$ или $I_{\min} = -(1 - u_{cN*}).$	$\frac{d^2 u_{c*}}{dt_{1*}^2} + u_{c*} = 1 + u_{z*}$ или $\frac{d^2 U_{c*}}{dt_{1*}^2} + u_{c*} = 1 + u_{cN*};$  $u_{c*} = 1 + u_{z*} + (1 - u_{z*}) \cos t_{1*}$ или $u_{c*} = 1 + u_{cN*} + (1 - u_{cN*}) \cos t_{1*};$  $i_{k*} = -(1 - u_{z*}) \sin t_{1*}$ или $i_{k*} = -(1 - u_{cN*}) \sin t_{1*}.$

В идеальном случае длительность протекания тока в обоих полупериодах одинакова, его амплитуда при работе управляемого вентиля больше, чем при работе диода, причем в генераторе озона она от периода к периоду не меняется, в ЕНЭ в первом по-

лупериоде растет, а во втором – убывает. Длительность заряда ЕНЭ определяется соотношением  $C_N/C_K$  и увеличивается с его увеличением. Для одного периода эта зависимость имеет вид:

$$\Delta U'_{CN} = \frac{1}{C_N \omega_0} \left[ \int_0^{\pi} \frac{u_0 + U'_{CN}}{\rho} \sin(\omega_0 t) d\omega_0 t + \int_0^{-\pi} \frac{U_0 - U'_{CN}}{\rho} \sin(\omega_0 t) d\omega_0 t \right]; \Delta U'_{CN} = \frac{4U_0 C_K}{C_N}, \quad (3)$$

где  $\Delta U'_{CN}$  – увеличение заряда накопительного конденсатора за период изменения тока.

Согласно (3) число периодов коммутации, необходимое для заряда конденсатора, равно:

$$N = \frac{C'_N}{8C_K}. \quad (4)$$

Уравнения и величины, характеризующие параметры токов и напряжений генераторов озона емкостных накопителей с учетом потерь

Мгновенные значения	Характерные точки
1	2
$\pi \geq \omega t \geq 0$	
$u_c = U_0 - U_2 - 2e^{-\delta t} \frac{U_0 + U_2 e^{-a\pi}}{1 + e^{-2a}} \times$ $\times \left( \cos \omega t + \frac{\delta}{\omega} \sin \omega t \right);$ $i_k = 2 \frac{(U_0 + U_2 e^{-a}) e^{-\delta t}}{\omega L_s (1 + e^{-2a})} \sin \omega t;$ $\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{R}{L_s} \frac{du_c}{dt} + \frac{u_c}{L_s C_\delta} = \frac{U_0 - U_2}{L_s C};$ $\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \left( \frac{R}{\rho} \right)^2}.$	$u_{c0} = - \frac{U_0 (1 - e^{-2a}) + U_2 (1 + e^{-a})^2}{1 + e^{-2a}};$ $u_{c1} = u_0 - u_2 + \frac{2(u_0 + u_2 e^{-a})}{1 + e^{-2a}};$ $i_k \left( \omega t = \frac{\pi}{2} \right) = \frac{2(U_0 + U_2 e^{-a})}{\omega L_s (1 + e^{-2a})} e^{-\frac{\delta \pi}{\omega 2}}.$
$2\pi \geq \omega t \geq \pi, \pi \geq \omega t = \omega t - \pi \geq 0$	
$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{R}{L_s} \frac{du_c}{dt} + \frac{u_c}{L_s C_\delta} = \frac{U_0 + U_2}{L_s C};$ $u_c = U_0 + U_2 + 2e^{-\delta t} \frac{u_0 e^{-a\pi} - u_2}{1 + e^{-2a}} \times$ $\times \left( \frac{\delta}{\omega} \sin \omega t + \cos \omega t \right);$ $i_k = -2e^{-\delta t} \frac{u_0 e^{-a\pi} - u_2}{\omega L_s (1 + e^{-2a})} \sin \omega t.$	$u_{c2} = -u_{c0} = - \frac{U_0 (1 - e^{-2a}) + U_2 (1 + e^{-a})^2}{1 + e^{-2a}};$ $i_k \left( \omega t = \frac{\pi}{2} \right) = -2 \frac{u_0 e^{-a} - u_2}{\omega L_s (1 + e^{-2a})} e^{-\frac{\delta \pi}{2\omega}}.$
$\delta = \frac{R}{2L_s} \text{ или } \delta = \frac{R}{2L_k}, \omega = \omega_0 \sqrt{1 - \left( \frac{R}{\rho} \right)^2}, a = \frac{\pi \delta}{\omega} = - \frac{R\pi}{\rho \omega_*}, \omega_* = \sqrt{1 - \left( \frac{R}{\rho} \right)^2}.$	

Токи и напряжения коммутирующего конденсатора в системе преобразователь частоты – нагрузка с учетом потерь в относительных единицах

Мгновенные значения	Характерные точки
1	2
$\pi \geq \omega_* t_* \geq 0$	
$u_{c*} = 1 - u_{z*} \frac{2 \left( 1 + u_{z*} e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} \right)}{1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}}} \times$ $\times \frac{Dt_*}{e^2} \left( \cos \omega_* t_* + \frac{D}{2\omega_*} \sin \omega_* t_* \right)$ <p>или</p> $u_{c*} = 1 - U_{cN*} \frac{2 \left( 1 + U_{cN*} e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} \right)}{1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}}} \times$ $\times \frac{Dt_*}{e^2} \left( \cos \omega_* t_* + \frac{D}{2\omega_*} \sin \omega_* t_* \right)$ $i_{k*} = \frac{2 \left( 1 + u_{z*} e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} \right)}{\left( \omega_* 1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}} \right)} e^{-\frac{Dt_*}{2}} \sin \omega_* t_*$ <p>или</p> $i_{k*} = \frac{2 \left( 1 + U_{cN*} e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} \right)}{\omega_* \left( 1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}} \right)} e^{-\frac{Dt_*}{2}} \sin \omega_* t_*$	$u_{c0*} = - \frac{\left[ \left( 1 - e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}} \right) + u_{z*} \left( 1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}} \right)^2 \right]}{1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}}}$ $u_{c1*} = 1 - u_{z*} + \frac{2 \left( 1 + u_{z*} e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} \right)}{1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}}} \text{ или}$ $u_{c1*} = 1 - U_{cN*} + \frac{2 \left( 1 + U_{cN*} e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} \right)}{1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}}}$ $i_{k*}(\omega_* t_*) = \frac{\pi}{2}$ $i_{k*} = e^{-\frac{D\pi}{4}} \frac{2 \left( 1 + u_{z*} e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} \right)}{\omega_* \left( 1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}} \right)}$
$2\pi \geq \omega_* t_* \geq \pi \quad \pi \geq \omega_* t_* \geq 0$	

Мгновенные значения	Характерные точки
<b>1</b>	<b>2</b>
$u_{c*} = 1 + u_{z*} - \frac{2 \left( e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} + u_{z*} \right)}{1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}}} \times e^{-\frac{Dt_*}{2}} \left( \cos \omega_* t_* + \frac{D}{2\omega_*} \sin \omega_* t_* \right)$	$u_{c2*} = -u_{c0*} = 1 + u_{z*} - \frac{2 \left( e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} - u_{z*} \right)}{1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}}}$
или	
$u_{c*} = 1 + U_{cN*} - \frac{2 \left( e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} + U_{cN*} \right)}{1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}}} \times e^{-\frac{Dt_*}{2}} \left( \cos \omega_* t_* + \frac{D}{2\omega_*} \sin \omega_* t_* \right)$	$i_{k*}(\omega_* t_*) = \frac{\pi}{2}$
$i_{k*} = - \frac{2 \left( e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} - u_{z*} \right)}{\omega_* \left( 1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}} \right)} e^{-\frac{Dt_*}{2}} \sin \omega_* t_*$	$i_{k*} = e^{-\frac{D\pi}{4}} \frac{2 \left( e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} - u_{z*} \right)}{\omega_* \left( 1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}} \right)}$
или	
$i_{k*} = - \frac{2 \left( e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} - U_{cN*} \right)}{\omega_* \left( 1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}} \right)} e^{-\frac{Dt_*}{2}} \sin \omega_* t_*$	$i_{k*} = e^{-\frac{D\pi}{4}} \frac{2 \left( e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} - U_{cN*} \right)}{\omega_* \left( 1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}} \right)}$

Наличие реального повышающего трансформатора (как видно из рис. 2 и 3а) влияет на характер электромагнитных процессов. При этом активное сопротивление, имитирующее потери (рис. 3, в), влияет на амплитудные значения напряжений и токов, изменяя их длительность, однако, как видно из таблиц 3 и 4, длительность полупериодов протекания тока при открытых тиристорах и диодах одинакова. Изменение напряжений  $U_{c1}$  и  $U_{c2}$  при изменении  $R_N$  приведено на рис. 5, а и б. С ростом потерь  $U_{c1}$  уменьшается, а  $U_{c2}$  растет, то есть их значения сближаются, а следовательно уменьшается

мощность.

Выходная и потребляемая мощности преобразователя также изменяются при наличии потерь. В идеальном случае обе мощности одинаковы и равны: для озатора:

$$P_1 = P_2 = \frac{2U_d U_c}{\pi r}, \quad (5)$$

для ЕНЭ:

$$P_1 = P_2 = \frac{2U_d U_{CN}}{\pi r}. \quad (5')$$

Так как  $U_{CN}$  увеличивается от периода к периоду по линейному закону, то по такому же закону увеличивается и мощность.

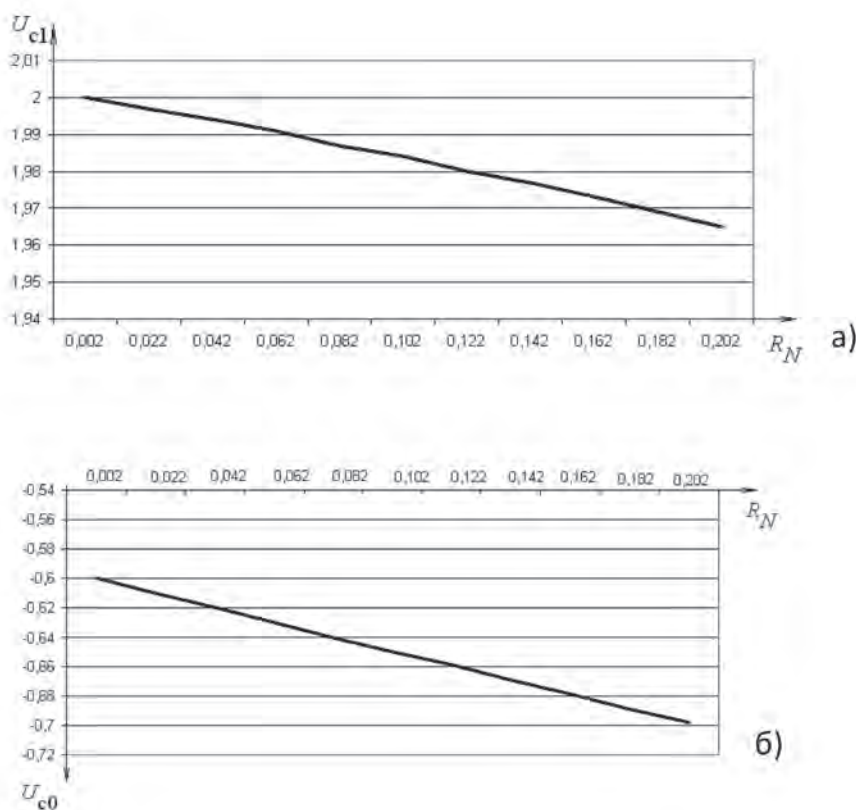


Рис. 5 Напряжение на конденсаторе  $C_0$  ( $C_N$ ) при:  
 а)  $u_{c1} = f(R_N)$ ; б)  $u_{c0} = -u_{c2} = f(R_N)$

Таблица 5

**Активная мощность в системе преобразователь частоты – нагрузка с учетом потерь в абсолютных и относительных единицах**

Абсолютные единицы	Относительные единицы
$1. P_1 = \frac{U_2}{T_K} \int_0^{T_K} i dt$	$1. P_{1*} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_* dt_*$

Абсолютные единицы	Относительные единицы
$P_1 = \frac{U \left( 1 + e^{-\frac{\delta\pi}{\omega}} \right)}{\pi r \omega_* \left[ 1 + \left( \frac{\delta}{\omega} \right)^2 \right] \left( 1 + e^{-\frac{\delta\pi}{\omega}} \right)} \times$ $\times \left[ U \left( 1 - e^{-\frac{\delta\pi}{\omega}} \right) + U_2 \left( 1 + e^{-\frac{\delta\pi}{\omega}} \right) \right]$ <p>или вместо <math>U_2 \rightarrow U_{cN}</math></p> <p>2. Без учета потерь <math>P_1 = \frac{2UU_2}{\pi r}</math></p>	<p>1. <math>P_{1*} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_* dt_*</math></p> $P_{1*} = \frac{1 + e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}}}{\pi \omega_* \left[ 1 + \left( \frac{D}{2\omega_*} \right)^2 \right] \left( 1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}} \right)} \times$ <p>или</p> $\times \left[ \left( 1 - e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} \right) + u_{2*} \left( 1 + e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} \right) \right]$ <p>или вместо <math>u_{2*} \rightarrow U_{cN*}</math></p> <p>2. Без учета потерь <math>P_{1*} = \frac{2U_{2*}}{\pi}</math></p>
$P_2 = \frac{U_2 \left( 1 + e^{-\frac{\delta\pi}{\omega}} \right)}{\pi r \omega_* \left[ 1 + \left( \frac{\delta}{\omega} \right)^2 \right] \left( 1 + e^{-\frac{\delta\pi}{\omega}} \right)} \times$ $\times \left[ U \left( 1 + e^{-\frac{\delta\pi}{\omega}} \right) - U_2 \left( 1 - e^{-\frac{\delta\pi}{\omega}} \right) \right]$	$P_{2*} = \frac{u_{2*} \left( 1 + e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} \right)}{\pi \omega_* \left[ 1 + \left( \frac{D}{2\omega_*} \right)^2 \right] \left( 1 + e^{-\frac{\pi D}{\omega_*}} \right)} \times$ $\times \left[ \left( 1 + e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} \right) - u_{2*} \left( 1 - e^{-\frac{\pi D}{2\omega_*}} \right) \right]$
<p>Без учета потерь</p> $P_1 = P_2 = \frac{2UU_2}{\pi r}$ $P_{баз} = \frac{UU_2}{\rho}$	<p>Без учета потерь</p> $P_{1*} = P_{2*} = \frac{2u_{2*}}{\pi}$



При наличии потерь изменяются и потребляемая, и выходная мощности. Формулы для их определения приведены в таблице 5 и на рисунке 6, а и б, а зависимость КПД от активного сопротивления генератора озона – на рисунке 6, в. Очевидно, с ростом активного сопротивления (увеличением  $x$ ) КПД уменьшается.

Активное сопротивление влияет также на длительность заряда накопительного конденсатора,

которая определяется числом периодов  $N$ , необходимых для того, чтобы приведенное напряжение ЕНЭ стало равным  $U_0$ . При отсутствии потерь эта длительность равна:

$$NT_k = \frac{T_k C_N}{8C_k}, \quad (6)$$

где  $T_k$  – период между коммутациями тиристора.

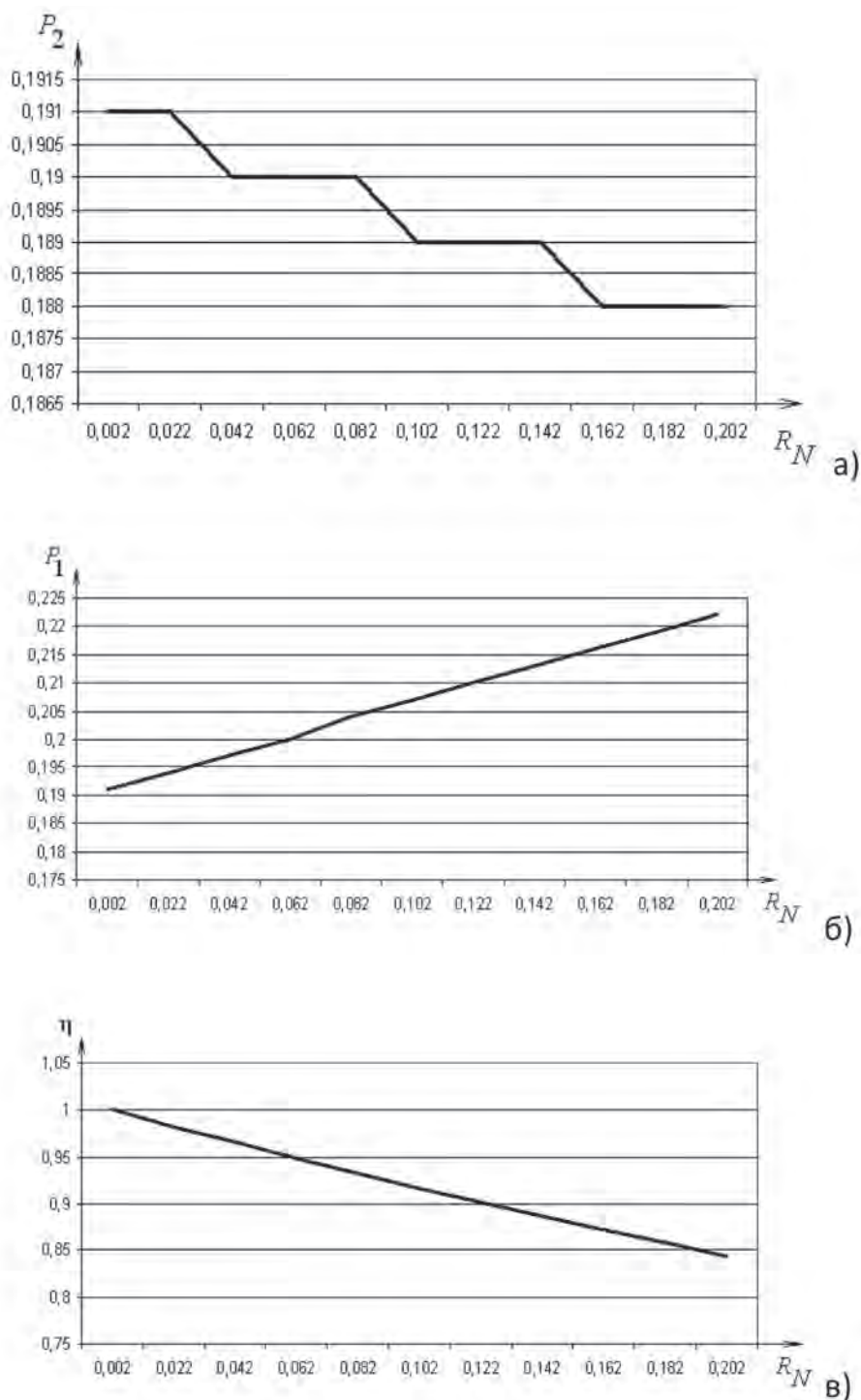


Рис. 6 Характеристики мощности:  
а) выходная мощность; б) потребляемая мощность; в) КПД.

Наличие потерь приводит к увеличению межкоммутационного периода и к увеличению числа этих периодов. Время заряда при наличии потерь может быть определено следующим образом:

$$\frac{U_{CN}}{U_0} = \frac{4(1+e^{-x})}{1+e^{-2x}} \sum_{n=0}^{n-1} \left( 1 - \frac{2(1-e^{-2x})C_K}{(1+e^{-2x})C_N} \right)$$

Зависимость  $U_{CN}/U_0 = f(x)$  приведена на рисунке 6 для отношения  $C_K/C_N = 200$ . Как видно, длительность заряда, так же как длительность межкоммутационного периода, с ростом потерь возрастает.

#### Выводы

1. Силовой модуль системы источник питания – повышающий трансформатор – разрядно-импульсная нагрузка может быть использован для анализа электромагнитных процессов, при которых потребляется энергия, накопленная в электрическом поле конденсатора.

2. Наличие реального трансформатора изменяет амплитуды токов и напряжений резонансного нагрузочного контура, уменьшает величину выходной мощности и увеличивает значение потребляемой.

3. Так как предложенной схемой замещения может быть представлена гамма разрядно-импульсных технологий, полученные соотношения могут быть использованы для определения параметров модулей, входящих в систему источник питания – повышающий трансформатор – нагрузка.

#### Список литературы

1. Булатов О.Г. Тиристорно-конденсаторные источники питания для электротехнологии [Текст] / О.Г. Булатов, А.И. Царенко, В.Д. Поляков. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 200 с.
2. Филиппов Ю.В. Электросинтез озона [Текст] / Ю.В. Филиппов, В.А. Вобликова, В.И. Пантелеев. – М.: Московский университет, 1987. – 237 с.
3. Шапиро С.В. Тиристорные и магнито-тиристорные агрегаты питания электрофильтров очистки газов [Текст] / С.В. Шапиро, В.И. Пантелеев, А.С. Серебряков. – М.: Энергия, 1978. – 113 с.
4. Рогинская Л.Э. Обоснование проектных решений при многокритериальной оптимизации параметров высоковольтных трансформаторов для электротехнологий [Текст] / Л.Э. Рогинская, Т.П. Костюкова, Ю.И. Махин // Электричество. – № 8. – 1998. – с. 15–18.
5. Казанцев В.Г. Исследование и оптимизация высоковольтных блоков зарядных устройств [Текст] / В.Г. Казанцев, В.Г. Михеев, Л.Э. Рогинская // Системы управления энергетическими установками и

комплексами преобразования энергии. – Уфа: Изд-во УАИ, 1990. – Сб. 3. – С. 126–132.

6. Титов В.Г. Имитационное моделирование электрической части озонатора [Текст] / В.Г. Титов, К.Ю. Кузнецов, Ю.И. Махин // Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова / под ред. Ю.В. Гуляева. – Москва; Н. Новгород: НГТУ, 2005. – Т. 15. – С. 53–60.

7. Блинов И.В. Выпрямительные преобразователи с однофазным питанием [Текст] / И.В. Блинов, С.В. Ваняев // Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова / под ред. Ю.В. Гуляева. – Москва; Н. Новгород: НГТУ, 2005. – Т. 15. – С. 188 – 193.

8. Рогинская Л.Э. Силовой резонансный модуль для питания электротехнологических нагрузок [Текст] / Л.Э. Рогинская, Б.Э. Рахимов // Энергетика, экология, надежность, безопасность: матер. шестой всерос. науч.-техн. конф. – Томск: 2000. – С. 241–244.

#### References

1. Bulatov O.G. Tiristorno-kondensatornye istochniki pitaniya dlja jelektrotehnologii [Tekst] / O.G. Bulatov, A.I. Carenko, V.D. Poljakov. – M.: Jenergoatomizdat, 1989. – 200 s.
2. Filippov Ju.V. Jelektrosintez ozona [Tekst] / Ju.V. Filippov, V.A. Voblikova, V.I. Panteleev. – M.: Moskovskij universitet, 1987. – 237 s.
3. Shapiro S.V. Tiristornye i magnito-tiristornye agregaty pitaniya jelektrofil'trov ochistki gazov [Tekst] / S.V. Shapiro, V.I. Panteleev, A.S. Serebrjakov. – M.: Jenergija, 1978. – 113 s.
4. Roginskaja L.Je. Obosnovanie proektnyh reshenij pri mnogokriterial'noj optimizacii parametrov vysokovol'tnyh transformatorov dlja jelektrotehnologij [Tekst] / L.Je. Roginskaja, T.P. Kostjukova, Ju.I. Mahin. // Jelektrichestvo. – № 8. – 1998. – S. 15–18.
5. Kazancev V.G. Issledovanie i optimizacija vysokovol'tnyh blokov zarjadnyh ustrojstv [Tekst] / V.G. Kazancev, V.G. Miheev, L.Je. Roginskaja // Sistemy upravlenija jenergeticheskimi ustanovkami i kompleksami preobrazovanija jenerгии. – Ufa: Izd-vo UAI, 1990. – Sb. 3. – S. 126–132.
6. Titov V.G. Imitacionnoe modelirovanie jelektricheskoi chasti ozonatora [Tekst] / V.G. Titov, K.Ju. Kuznecov, Ju.I. Mahin // Izvestija Akademii inzhenernyh nauk im. A.M. Prohorova / pod red. Ju.V. Guljaeva. – Moskva; N. Novgorod: NGTU, 2005. – T. 15. – S. 53–60.
7. Blinov I.V. Vyrjamil'nye preobrazovateli s odnofaznym pitaniem [Tekst] / I.V. Blinov, S.V. Vanjaev // Izvestija Akademii inzhenernyh nauk im. A.M. Prohorova / pod red. Ju.V. Guljaeva. – Moskva; N.

Novgorod: NGTU, 2005. – Т. 15. – С. 188 – 193.

8. Roginskaja L. Je. Silovoj rezonansnyj modul' dlja pitaniya jelektrotehnologicheskikh nagruzok [Tekst]

/ L. Je. Roginskaja, B. Je. Rahimov // Jenergetika, jekologija, nadezhnost', bezopasnost': mater. shestoju vseros. nauch.-tehn. konf. – Tomsk: 2000. – С. 241–244.



**Кушнир В.Г.**  
**Kushnir V.G.**

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



**Кошкин И.В.**  
**Koshkin I.V.**

*кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Электроэнергетика  
и физика» Костанайского государственного  
университета имени А. Байтурсынова,  
Казахстан, г. Костанай*

УДК 621.668

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВЕТРА В КОСТАНАЙСКОЙ ОБЛАСТИ СЕВЕРНОГО РЕГИОНА КАЗАХСТАНА В ЦЕЛЯХ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

В данной научной работе приведены результаты исследования важных аспектов целесообразности использования ветроэнергетических станций в Костанайской области Северного региона Республики Казахстан. Более чем 15% территории области с населением более 100 тыс. человек находится вне систем централизованного электроснабжения. Для электроснабжения используется привозное топливо или бензиновые генераторы, что завышает затраты на производство электроэнергии невысокого качества. Решение по установке средств возобновляемой энергетики может существенно сократить затраты на привозные топливные ресурсы и повысить степень охраны окружающей среды от вредных выбросов. В научной работе представлен территориальный потенциал исследуемых площадей, энергетическая характеристика области по состоянию генерируемых и потребляемых мощностей, а также динамики тарифов на электроэнергию с начала 2005 года. Представлены обоснованные результаты исследований ветроэнергетических ресурсов Костанайской области за последние годы, выявлены изменения розы ветров относительно исследований предыдущих лет. Определена средняя скорость ветрового потока в диапазоне 2–6 м/сек. Эти значения предполагают выводы, что применение малых ветроустановок вполне оправданно. Однако следует учитывать, что к выбору места установки выдвигаются дополнительные требования наличия возвышенностей, открытость доступа к ветроколесу и др. Также выявлен наиболее перспективный регион области в отношении развития ветроэнергии, которым является юго-восток Костанайской области с наибольшим средним значением ветровой нагрузки – г. Аркалык – 5,1 м/с. Кроме обоснования необходимости и целесообразности использования ветрогенераторных установок обозначены проблемы технического характера. К ним можно отнести сложности при корректировке режимов генерации энергии ветроустановками с графиком реального электропотребления при отсутствии или ограничении аккумулярующих устройств; проблемы обеспечения качества генерируемой электроэнергии; необходимость резервирования ветровых электростанций; высокие стоимости установки на единицу удельной мощности. Кроме того, представлены исследования экономических, социальных и экологи-

ческих факторов применения ветроустановок на территории области.

*Ключевые слова:* электроснабжение, ветер, климат, электроэнергия, возобновляемые источники энергии, ветроэнергетическая установка, энергетический ресурс.

## THE EFFICIENCY OF WIND ENERGY IN THE KOSTANAI REGION OF NORTH KAZAKHSTAN REGION FOR THE GENERATION OF ELECTRICAL ENERGY

This research paper presents the results of a study on the feasibility of the important aspects of the use of wind power stations in Kostanai region of Northern region of the Republic of Kazakhstan. More than 15 % of the region with a stay of more than 100 thousand people is out of the centralized power supply. Electricity is used for imported fuel or gasoline generators, thereby inflating the cost of producing electricity and losing its quality. The decision to install renewable energy resources can significantly reduce the cost of imported fuel resources and to increase the degree of protection of the environment from harmful emissions. In a study presented territorial potential study areas, the energy characteristics of the area as generated and consumed power, as well as the dynamics of electricity prices since the beginning of 2005. Presented the results of research - based wind energy resources Kostanai region in recent years, revealed changes in wind patterns relating to research previous years. To determine the average speed of the wind flow in the range of 2-6 m/s. These values suggest the conclusion that the use of small wind turbines is justified. Note, however, that the choice of installation site have additional requirements presence of hills, open access to the wind wheel, etc. Also, identify the most promising areas in the region for the development of wind energy, which is southeast of Kostanai region with the highest average wind load. Arkalyk - 5,1 m/s. In addition to the rationale for and feasibility of a wind generator installations identified technical problems. These include the difficulty in adjusting the mode of energy generation wind turbines to the schedule of the real power consumption when there is no restriction or accumulating devices, quality assurance issues generated electricity, the need to backup wind power, high cost per unit of power density. In addition, the study presents the economic, social and environmental factors of wind power use in the region.

*Key words:* electric power supply, wind, climate, electricity, renewable sources of energy, wind turbine, energy resource.

Республика Казахстан обладает крупными запасами энергетических ресурсов (нефть, газ, уголь, уран) и является энергетической державой. Общий запас нефти, газа и угля составляет примерно 13 млрд т нефтяного эквивалента, и по этим показателям республика входит в первую десятку стран мира [1].

Общая установленная мощность производства электроэнергии в Казахстане составляет приблизительно 19 ГВт. Однако из-за устаревающего оборудования и плохого обслуживания фактическая мощность станций составляет около 12 ГВт. Потери при передаче и распределении электроэнергии достаточно высоки (почти 15%). Устаревающая инфраструктура производства энергии в Казахстане и необходимость замены генерирующих мощностей для поддержания приемлемых уровней качества и надежности снабжения электроэнергией заставляют задуматься об использовании нетрадиционных источников энергии.

Следует заметить, что энергетика Казахстана сильно зависит, приблизительно на 85%, от производства электроэнергии с использованием угля. Уголь является топливом с высокой интенсивностью углерода. По этой причине Казахстан является одним из крупнейших в мире источников вы-

бросов углерода и одним из лидеров по количеству его на душу населения. Республика является участником Рамочной конвенции ООН по изменению климата, которую она ратифицировала в 1995 г. В соответствии с Рамочной Конвенцией (РКИК ООН) Казахстан имеет обязательства по выполнению программ, связанных со снижением выбросов в атмосферу «парниковых газов». Все это свидетельствует о возможности развития возобновляемой энергетики и, в частности, ветроэнергетики Казахстана [1].

Целью работы являлся анализ эффективности применения ветроустановок в Костанайской области при наличии необходимого среднегодового ветрового потенциала, а также выявление наиболее перспективных регионов области, где развитие ветроэнергетики носило бы перспективный характер.

Предметом исследования является ветровая нагрузка как основная характеристика развития ветроэнергетической отрасли.

Объектом исследования являются: Костанайская область и отдельно рассмотренные города разных сторон света области: Костанай, Житикара, Аркалык.

Задачи научной работы: исследование энергетического состояния области на сегодняшний день;

выявление территориального потенциала области; исследование климатообразующих факторов области; выявление наличия ветроэнергетических ресурсов области; построение розы ветров регионов Костанайской области; определение наиболее перспективного региона области в отношении развития ветроэнергетики; исследование экономической и экологической составляющих развития ветроэнергетики; выявление целесообразности применения ветроустановок на основе проделанных исследований.

В настоящее время из-за дефицита и дороговизны электроэнергии определяется возможность введения новых альтернативных источников энергии, которые будут не только вырабатывать недостающую энергию, но и повлияют на стоимость электро- и теплоэнергии, а также экологическое состояние [2].

Энергетическое состояние Костанайской области, по мнению многих ученых, ожидает кризис. По официальным данным, в регионе рост потребления энергии за 10 лет возрос на 70%. Станции Костанайской области самостоятельно вырабатывают лишь 30% из общего потребления энергии, а остальная энергия приобретает у Экибастузского и Павлодарского энергоцентров. Ко всему прочему в Костанайской области значительно увеличивается стоимость электроэнергии. Так, за период с 2005 по 2012 год цена за электроэнергию увеличилась более чем в два раза.

Все это свидетельствует о том, что скоро регион может столкнуться с проблемой невозможности обеспечения энергией области. Одним из путей решения данных проблем является замещение традиционных источников электроэнергии возобновляемыми. Одними из самых доступных являются ветроэнергетические установки.

Целесообразность применения ветроэнергетических установок определяется ветроэнергетическими ресурсами, конструктивными особенностями агрегатов, природно-хозяйственными условиями и сравнительными технико-экономическими показателями [3].

Площадь территории области составляет при-

мерно 196 тыс. км<sup>2</sup>. Территория области характеризуется относительно равнинным рельефом. Северную часть занимают юго-восточная часть Западно-Сибирской низменности, к югу от нее располагается Тургайское плато, на западе области – волнистая равнина Зауральского плато, а на юго-западе – отроги Сары-Арки.

Климат резко континентальный и крайне засушливый. На формирование климата Казахстана оказывают влияние три основных типа воздушных масс: арктические, полярные и тропические. Летом над территорией создается область пониженного давления и образуется континентальный тропический (туранский) воздух с запада на восток. Зимой господствуют полярные и арктические воздушные массы. Полярный континентальный воздух вторгается на территорию с Русской равнины и морских умеренных воздушных масс с Атлантики. Весной погода неустойчива. То устанавливается циклон тропических воздушных масс с юго-запада, то вторгаются арктические воздушные массы. Осенью формируется сибирский антициклон.

Важным составляющим исследования ветроэнергетических ресурсов является ветроэнергетический кадастр, представляющий систему численных характеристик режима ветра. Основными характеристиками ветроэнергетического кадастра являются: средняя скорость ветра за многолетний период; режимы повторяемости скорости ветра; длительность периода активных ветров; длительность периода безветрия. Зная численные характеристики ветроэнергетического кадастра, можно получить картину работы ветродвигателя. Для этой цели по данным метеорологической станции проанализированы режимы скоростей ветра трех городов, расположенных в разных регионах Костанайской области.

Путем обработки полученных материалов вычислены среднемесячные и среднегодовые скорости ветра в различные часы суток интересующих городов, представленные на рисунках 1–3.

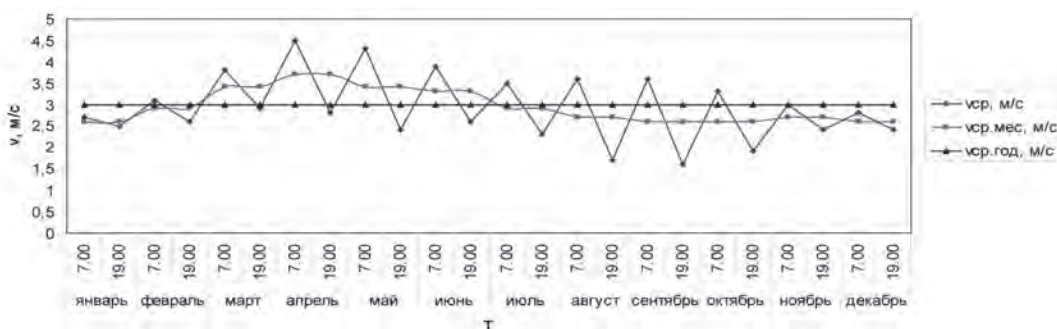


Рис. 1. График среднемесячной и среднегодовой скорости ветра в различные часы суток за период 2001–2012 гг., город Костанай

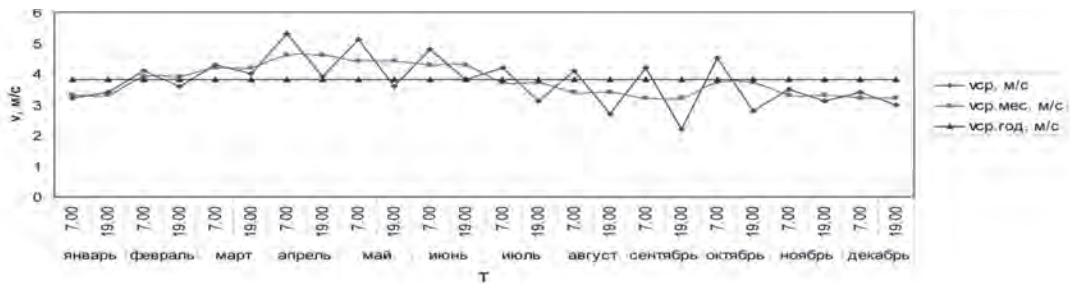


Рис. 2. График среднемесячной и среднегодовой скорости ветра в различные часы суток за период 2001–2012 гг., город Житикара

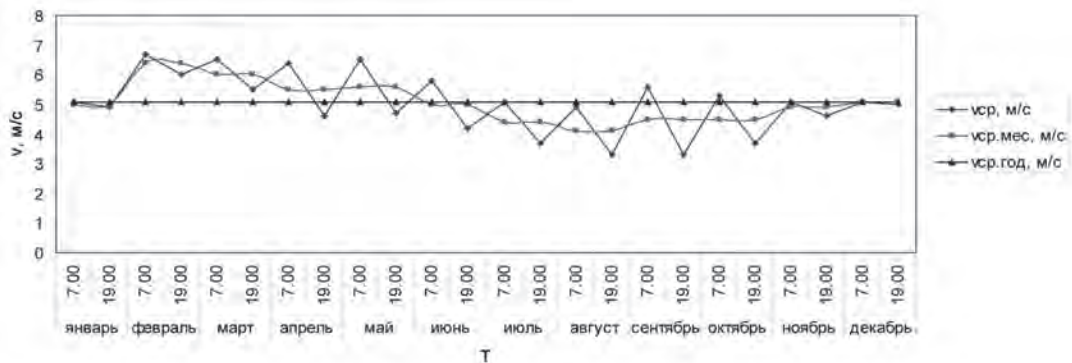


Рис. 3. График среднемесячной и среднегодовой скорости ветра в различные часы суток за период 2001–2012 гг., город Аркалык

Среднегодовые значения скоростей ветра мало изменяются от года к году. Наибольшие отклонения средней годовой скорости ветра в отдельные годы от средней многолетней не превышает: по г. Костанай – 0,65 м/сек, что составляет 21,7%; по г. Аркалык – 0,78 м/сек, что составляет 15,3%; по г. Житикаре – 0,47 м/сек, что составляет 12,4%. В годовом ходе скоростей ветра сохраняется определенная закономерность: наибольшие скорости наблюдаются в зимне-весенний период (максимум в апреле, феврале, иногда в марте), наименьшие скорости в летне-осенний период (минимум преимущественно в августе и сентябре). Немаловажное значение имеет вычисление вероятности скоростей ветра – по результатам можно судить об обеспеченности скоростей ветра.

Нахождение численных значений обеспеченности направленности скоростей ветра необходимо для определения производительности и выработки электроэнергии ветроустановками, для построения розы ветров. Результаты исследований приведены на рисунке 4 (а–в).

Критерием экономической стороны использования возобновляемых источников электрической энергии служит подсчет электроэнергии, выработанной установкой в год. Для этого был произведен расчет электроснабжения среднестатистического дома,

который потребляет до 3 кВт в месяц. Для правильного понимания наиболее выгодного региона области была выбрана одна ВЭУ, по которой и производился анализ трех регионов области в отдельности. Исходя из этого, была взята ВЭУ– 5/5 из ряда многих средств мощностью до 10 кВт.

По результатам расчетов наблюдается следующее: за год использования ветроэнергии среднестатистической семьей вырабатывается энергия в количестве по г. Костанай – 2 561,5 кВт·ч, по г. Аркалык – 13 363,3 кВт·ч, по г. Житикара – 5 326,5 кВт·ч, этого вполне достаточно для энергоснабжения дома, т. к. нужно учесть, что приборы, потребляющие энергию, работают не одновременно.

По известной тарификации электроэнергии за период 2005–2012 годы просчитано, что доход, получаемый в результате экономии энергии, составил по г. Костанай – 154 544 тенге, по г. Аркалык – 806 267 тенге, по г. Житикара – 321 368 тенге, но фактический доход оказался бы намного больше, т. к. курс валюты с 2005 по 2012 г. значительно повысился.

По прогнозам экспертов, для потребителей Костанайской области к 2015 году тарифы увеличатся по сравнению с 2009 годом в 2,45 раза. При неизменном потреблении электроэнергии затраты будут составлять прогнозируемые расчетные значения, представленные в таблице 1.

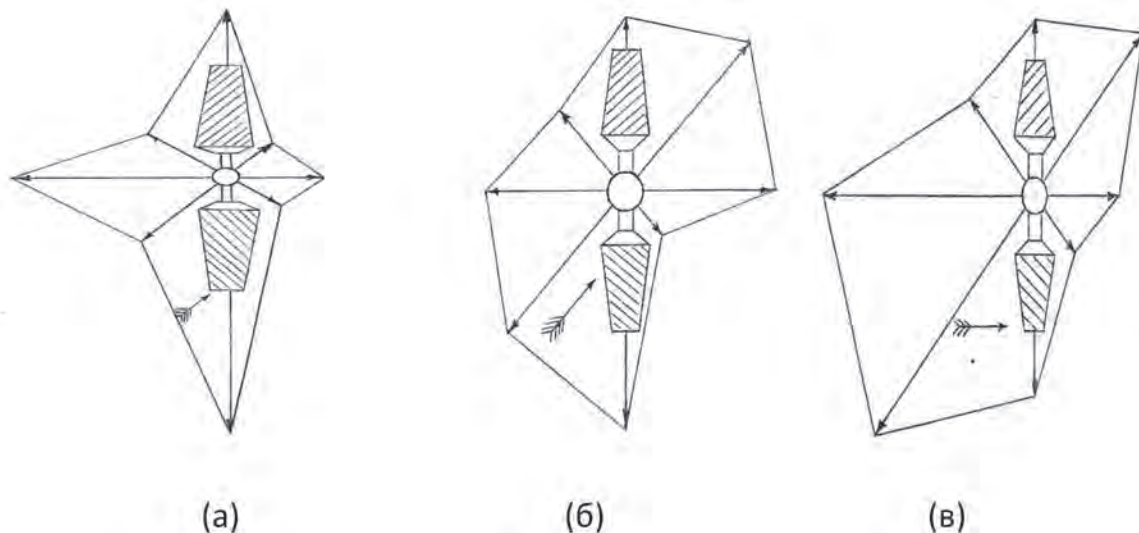


Рис. 4. Роза ветров города Костанай (а), города Аркалык (б) и города Житикара (в)

Таблица 1

**Перспективные расчетные значения затрат на расход электроэнергии  
среднестатистического потребителя**

Год	Потребление электроэнергии в год, кВт	Стоимость 1 кВт, тенге	Затраты на электроэнергию в год, тенге
2011	78 960	12,40	979 104
2012	78 960	12,80	1 010 688
2013	78 960	12,90	1 018 584
2014	78 960	14,38	1 135 345
2015	78 960	16,69	1 316 842
Всего за 5 лет			5 460 563

Прогнозируемый доход, получаемый в результате экономии энергии за период 2011–2015 гг., рассчитанный по прогнозам экспертов, может составить по г. Костанай – 177 074 тенге, по г. Аркалык – 923 207 тенге, по г. Житикара – 368 218 тенге. Принимая также во внимание повышение курса валюты, фактический доход окажется намного больше.

*Выводы*

Проведено исследование энергетического состояния области на сегодняшний день, которое показало, что энергии, вырабатываемой традиционными методами, в ближайшее время может оказаться недостаточно по многим причинам, поэтому одним из перспективных мероприятий по снижению энергодефицита является внедрение и развитие возобновляемых и альтернативных источников энергии, в том числе и ветроэнергетики; проанализирован территориальный потенциал области, дающий возможность

применения ветроустановок; исследованы климатообразующие факторы области, свидетельствующие о том, что на территории Костанайской области постоянно присутствуют ветра, скорость которых обеспечит работу ветроустановок при различных режимах их работы; выявлено наличие ветроэнергетических ресурсов области, которое анализировалось по следующим параметрам: средняя скорость ветра за многолетний период, режим повторяемости скорости ветра, длительность периода активных ветров, длительность периода безветрия. На основании произведенных расчетов построена роза ветров для разных регионов области, что имеет важное значение при установке ветроагрегата.

Данная работа выявила наиболее перспективный регион области в отношении развития ветроэнергии, которым является юго-восток Костанайской области с наибольшим средним значением ветровой нагрузки – г. Аркалык – 5,1 м/с.

При изучении данной темы затронут как экологический, так и экономический аспекты развития ветроэнергетики области, которые выявили, что применение ветроустановок по всем параметрам выгодно.

Исследованиями доказано, что установка и применение ветроустановок в Костанайской области приемлемы. К тому же они необходимы области из-за недостатка энергии и постоянного повышения стоимости электроэнергии.

*Список литературы*

1. *Отчет: Концепция использования возобновляемых источников энергии в системах теплоснабжения ЖКХ на пилотных территориях. ПРОЕКТ ПРООН/ГЭФ «Устранение барьеров для повышения энергоэффективности коммунального теплоснабжения»* [Текст]. – Астана, 2007.
2. *Данилов Н.И. Возобновляемая энергетика – альтернативная в электрификации удаленных районов* [Текст] / Н.И. Данилов, С.Е. Щеклеин, В.В. Велкин, А.Н. Шестак, А.П. Малетин // Эффективная энергетика. – Екатеринбург: УГТУ, 2001.

3. *Щеклеин С.Е. Роль нетрадиционных и возобновляемых источников энергии при реформировании электроэнергетического комплекса Свердловской области* [Текст] / С.Е. Щеклеин // Энергетика региона. – 2001. – № 2.

*References*

1. *Otchet: Konceptcija ispol'zovanija vozobnovljajemyh istochnikov jenerгии v sistemah teplosnabzhenija ZhKH na pilotnyh territorijah. PROJEKT PROON/GJeF «Ustranenie bar'erov dlja povыshenija jenergojeffektivno-kommunal'nogo teplosnabzhenija»*. – Astana, 2007.
2. *Danilov N.I. Vozobnovljaemaja jenergetika – al'ternativnaja v jelektrifikacii udalennyh rajonov* [Tekst] / N.I. Danilov, S.E. Shheklein, V.V. Velkin, A.N. Shestak, A.P. Maletin // Jefferktivnaja jenergetika. – Ekaterinburg: UGTU, 2001.
3. *Shheklein S.E. Rol' netradicionnyh i vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии pri reformirovanii jelektrojenergeticheskogo kompleksa Sverdlovskoj oblasti*. [Tekst] / S.E. Shheklein / Jenergetika regiona. – 2001. – № 2.



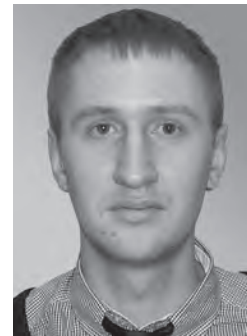
**Исмагилов Ф.Р.**  
**Ismagilov F.R.**

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



**Хайруллин И.Х.**  
**Khayrullin I.Kh.**

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



**Вавилов В.Е.**  
**Vavilov V.E.**

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

УДК 621.313

**ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА  
НА ЭДС СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Статья посвящена исследованию влияния различных причин неравномерностей воздушного зазора (статических и динамических эксцентриситетов, колебаний ротора) на параметры синхронных генераторов с высококоэрцитивными постоянными магнитами (СГ с ВПМ) на ЭДС холостого хода. Разработан математический аппарат, позволяющий осуществить данные исследования. Представлены результаты численного анализа СГ с ВПМ марки NdFeB с параметрами: частота вращения ротора 1500 об/мин, активная длина 180 мм, диаметр ротора 60 мм, воздушный зазор 1,5 мм. На основе результатов расчетов доказано, что различные дефекты СГ с ВПМ явно отражаются на кривой максимальной амплитуды



ЭДС, а следовательно полученные зависимости при определенной технической реализации могут быть использованы в качестве диагностического критерия.

Произведен анализ влияния неоднородностей активных материалов статора и ротора на ЭДС холостого хода путем компьютерного моделирования в программном комплексе ANSYS и представлен метод определения данных нелинейностей. В результате анализа влияния неоднородностей активных материалов статора и ротора на ЭДС холостого хода установлено, что при изменении магнитной проницаемости участка статора от номинального значения магнитной проницаемости стали 2013 до значения магнитной проницаемости вакуума магнитная индукция на данном участке снижается на 13%. А следовательно, максимальная амплитуда ЭДС катушки снизится также на 13%, и на кривой амплитуды ЭДС будет наблюдаться провал. Появление данного провала будет неизменным во времени, так же как при статическом эксцентриситете. Аналогичный провал будет наблюдаться и при неоднородности материалов ротора, но в данном случае появление провалов в кривой максимальной амплитуды ЭДС периодическое и является функцией частоты вращения ротора и времени, то есть подобно кривой максимальной амплитуды ЭДС при динамическом эксцентриситете.

Полученные результаты могут быть использованы на практике как при проектировании синхронных генераторов переменного тока, так и при оценке их технического состояния.

*Ключевые слова:* бесконтактные магнитоэлектрические генераторы, высококоэрцитивные постоянные магниты, неравномерность воздушного зазора, статический и динамический эксцентриситет.

## EFFECT OF NON-UNIFORM AIR ON EMF SYNCHRONOUS AC GENERATOR

The article investigates the effect of different causes irregularities in the air gap (static and dynamic eccentricity, the rotor vibration) on the parameters of synchronous generators with a high-coercivity permanent magnets (SG from HCPM) on EMF idling. A mathematical tool which allows the data of the study. The results of numerical analysis of the SG with HCPM brand NdFeB with parameters: rotor speed of 1500 rev / min, the active length of 180 mm rotor diameter of 60 mm, 1.5 mm air gap. Based on the results of calculations proved that with various defects SG HCPM clearly reflected in the maximum amplitude of the EMF curve, and thus obtained according to, in particular the technical implementation may be used as a diagnostic criterion.

The analysis of the influence of inhomogeneities of the active materials in the stator and rotor EMF idling by computer simulation in ANSYS software package and provides a method for determining the data of non-linearities.

As a result of analysis of the influence of active material inhomogeneities stator and rotor EMF idling found that when the magnetic permeability of the stator portion of the nominal values of the magnetic permeability were 2013 to permeabilities vakkuma magnetic induction in this area is reduced by 13%. And therefore the maximum amplitude of the EMF spool drop by as 13% and the amplitude of the EMF curve will be observed failure. The emergence of this failure will be unchanged over time, as well as the static eccentricity. A similar failure will occur and heterogeneity of materials of the rotor, but in this case the appearance of gaps in the curve of the maximum amplitude of the periodic EMF and is a function of rotor speed and time, that is, like the curve of the maximum amplitude of the EMF in the dynamic eccentricity.

The obtained results may be used in practice as in the design of synchronous alternators, and in the assessment of their technical condition.

*Key words:* non-contact magneto-electric generators, high-coercivity permanent magnets, uneven air gap, the static and dynamic eccentricity.

Проектирование синхронных генераторов переменного тока (СГ), в том числе и СГ с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ВПМ), на современном этапе их развития требует постановки и решения сложных задач, позволяющих повысить точность методики их расчетов. К числу таких задач относится исследование дополнительных явлений, сопровождающих процессы преобразования энергии и влияющих на них, в частности, к подобным

явлениям относится несимметрия магнитного поля в воздушном зазоре СГ, вызванная статическими и динамическими эксцентриситетами, колебаниями ротора, неоднородностями материалов активных частей и влиянием тепловых процессов на появление данных неоднородностей [1–3]. Таким образом, основной задачей данной работы является анализ влияния указанных выше причин несимметрии магнитного поля в воздушном зазоре СГ на его ЭДС.

Объектом исследования в работе является четырехполюсный трехфазный СГ с ВПМ. При этом принимается что:

– начало проводника первой катушки фазы располагается под углом 0 градусов относительно не-

равномерности воздушного зазора, рисунок 1;

- СГ эксплуатируется в режиме холостого хода;
- колебания ротора носят гармонический характер.

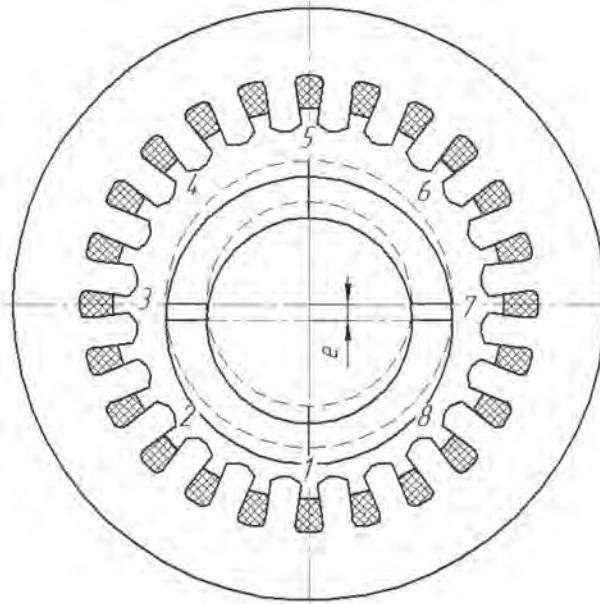


Рис. 1. Расчетная СГ с ВПМ

Воздушный зазор под первым пазом фазы описывается выражением:

$$\delta_{1p} = \delta_n - x, \quad (1)$$

где  $\delta_{1p}$  – воздушный зазор под первым пазом фазы;  $\delta_n$  – номинальный воздушный зазор;  $x$  – суммарная неравномерность воздушного зазора.

Под всеми последующими пазами фазы воздушный зазор описывается выражением [4]:

$$\delta_{np} = \delta_n - x \cos[(n-1)\pi\beta], \quad (2)$$

где  $n$  – номер паза фазы, нумерация пазов, для упрощения вводится внутри фазы;  $\beta$  – относительный шаг катушки.

Основными причинами неравномерности воздушного зазора СГ с ВПМ являются виброперемещения ротора, статический и динамический эксцентриситет. Тогда:

$$x = x_s + x_d + x_k, \quad (3)$$

где  $x_s$  – статический эксцентриситет;  $x_d$  – динамический эксцентриситет;  $x_k$  – виброперемещения ротора.

Неравномерность воздушного зазора, вызванная динамическим эксцентриситетом, является функцией частоты вращения ротора:

$$x_d = x_{ds} \sin(\omega t), \quad (4)$$

где  $x_{ds}$  – величина динамического эксцентриситета при неподвижном роторе.

Виброперемещения ротора зависят от частоты его колебаний и их амплитуды:

$$x_k = A_k \cos(\omega_1 t), \quad (5)$$

где  $A_k$  – амплитуда колебаний ротора;  $\omega_1$  – частота колебаний ротора.

Максимальная амплитуда ЭДС проводника, расположенного в пазу, определяется известным выражением [5]:

$$E = 2B_\delta l f \tau, \quad (6)$$

где  $l$  – активная длина;  $B_\delta$  – магнитная индукция в воздушном зазоре;  $f$  – частота тока;  $\tau$  – полюсное деление СГ с ВПМ.

Индукция при холостом ходе определяется [6]:

$$B_\delta = \frac{B_r}{\left(1 + \frac{\delta_p B_r k_\delta}{2\mu_0 h_M \sigma_0 H_c}\right)} \sigma_0, \quad (7)$$

где  $B_r$  – остаточная магнитная индукция ВПМ;  $k_\delta$  – коэффициент, учитывающий зубчатость статора;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $h_M$  – толщина ВПМ;  $\sigma_0$  – коэффициент, учитывающий рассеивание магнита;  $H_c$  – коэрцитивная сила;  $\delta_p$  – рабочий зазор СГ с ВПМ.

При неравномерностях воздушного зазора магнитная индукция, создающая ЭДС в каждом пазу фазы, принимается в виде:

$$B_{\delta n} = \frac{B_r}{\left( 1 + \frac{\left\{ \delta_n - (x_s + x_{ds} \sin(\omega t) + A_k \cos(\omega_1 t)) \cos[(n-1)\pi\beta] \right\} B_r k_\delta}{2\mu_0 h_M \sigma_0 H_C} \right) \sigma_0} \quad (8)$$

Из выражения (8) очевидно, что ввиду неравномерностей воздушного зазора магнитная индукция под каждой обмоткой катушки фазы различна, а следовательно, различна наводимая ей ЭДС.

Тогда результирующая максимальная амплитуда ЭДС катушки фазы, ввиду неравенства ЭДС обмоток в пазу, определяется не по теореме Пифагора,

как в традиционных методиках [7], а по теореме косинусов, рисунок 2а.

где  $E_B$  – результирующая амплитуда ЭДС катушки;  $E_{1B}, E_{2B}$  – ЭДС обмоток катушки, рисунок 2б;  $w$  – число витков катушки.

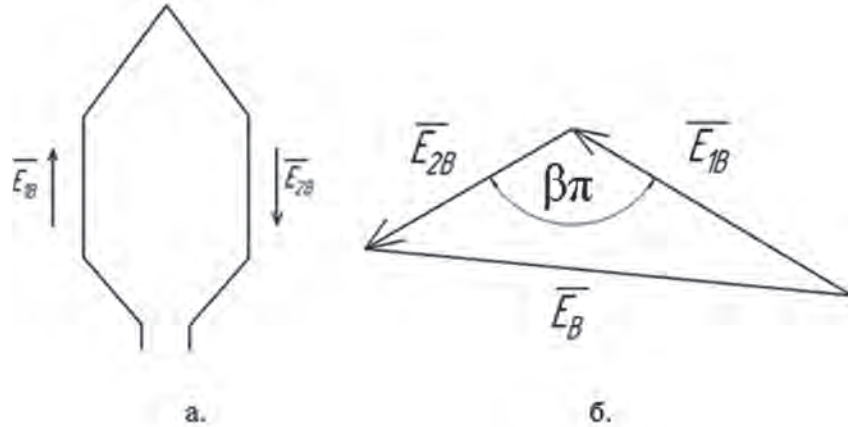


Рис. 2. К определению результирующей ЭДС катушки

Результирующая амплитуда ЭДС катушки фазы СГ с ВПМ:

$$E_k = w \left[ \left( \frac{2B_r f l \tau}{\left( 1 + b \left\{ \delta_n - (x_s + x_{ds} \sin(\omega t) + A_k \cos(\omega_1 t)) \cos[(n_{1m} - 1)\pi\beta] \right\} \right) \sigma_0} \right)^2 + \left( \frac{2B_r f l \tau}{\left( 1 + b \left\{ \delta_n - (x_s + x_{ds} \sin(\omega t) + A_k \cos(\omega_1 t)) \cos[(n_{2m} - 1)\pi\beta] \right\} \right) \sigma_0} \right)^2 + \left( \frac{2B_r f l \tau}{\left( 1 + b \left\{ \delta_n - (x_s + x_{ds} \sin(\omega t) + A_k \cos(\omega_1 t)) \cos[(n_{1m} - 1)\pi\beta] \right\} \right) \sigma_0} \right)^2 + \left( \frac{2B_r f l \tau}{\left( 1 + b \left\{ \delta_n - (x_s + x_{ds} \sin(\omega t) + A_k \cos(\omega_1 t)) \cos[(n_{2m} - 1)\pi\beta] \right\} \right) \sigma_0} \right)^2 \right] \cos \beta \pi,$$

где  $k$  – порядковый номер катушки фазы, нумерация катушек вводится внутри фазы; где  $n_{1m}, n_{2m}$  – соответственно номер первого и второго паза входящего в катушку.

Результирующая амплитуда ЭДС фазы определяется как поочередная геометрическая сумма амплитуд ЭДС катушек фазы по теореме косинусов.

Для анализа полученного выражения были произведены расчеты СГ с ВПМ со следующими параметрами: частота вращения ротора 1500 об/мин, активная длина 180 мм, диаметр ротора 60 мм, воз-

душный зазор 1,5 мм. При всех расчетах суммарная неравномерность воздушного зазора принималась равной 0,75 мм. Результаты расчетов для различных причин несимметрии магнитной индукции представлены на рисунке 3.

Анализ зависимости (рис. 3) показал, что при наличии статического эксцентриситета кривая максимальной амплитуды ЭДС не меняет своей формы относительно исправного состояния и увеличивается для рассматриваемых численных значений на 0,1 В. При динамическом эксцентриситете кривая макси-

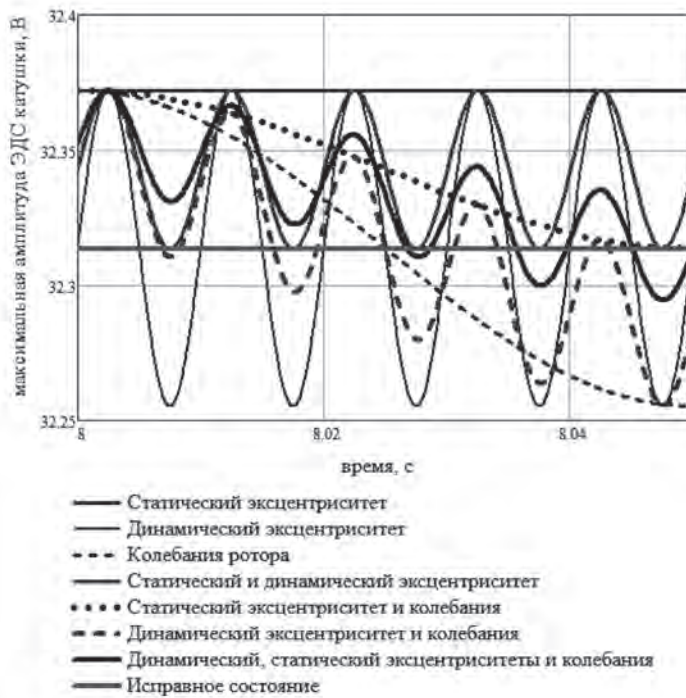


Рис. 3. Влияние различных причин неравномерностей воздушного зазора на максимальную амплитуду

мальной амплитуды ЭДС имеет форму синусоиды, амплитуда которой колеблется от 32.37 до 32.25 В. При колебаниях ротора форма кривой максимальной амплитуды ЭДС также является синусоидальной, период синусоиды равен периоду колебаний ротора, а амплитуда колеблется от 32.37 до 32.25 В. При одновременном статическом и динамическом эксцентриситете форма кривой максимальной амплитуды ЭДС сохраняет синусоидальность, при этом по сравнению с динамическим эксцентриситетом амплитуда уменьшается в два раза. При статическом эксцентриситете и колебаниях кривая максимальной амплитуды ЭДС повторяет форму кривой при колебаниях с сохранением периода колебаний и уменьшением амплитуды колебаний в 2 раза. При динамическом эксцентриситете и колебаниях, а также при динамическом, статическом эксцентриситетах и колебаниях формы кривой максимальной амплитуды представляют собой сложные синусоиды, которые для обоих случаев одинаковы по форме и периоду, но различаются по амплитуде.

Таким образом, очевидно, что различные дефекты СГ с ВПМ явно отражаются на кривой максимальной амплитуды ЭДС, а следовательно полученные зависимости, при определенной технической реализации могут быть использованы в качестве диагностического критерия.

Как было сказано ранее причиной несимметрии магнитного поля в воздушном зазоре являются не только рассмотренные выше дефекты, но и разного рода неоднородности материалов активных частей,

вызванные как несовершенством технологии их производства, так и нарушением их характеристик при механических или тепловых воздействиях в процессе сборки СГ, например, при сварке листов пакета статора.

Метода определения данных неоднородностей в СГ, кроме контроля параметров материалов до сборки СГ, практически не существует, и здесь предлагается один из возможных способов определения данных неоднородностей путем анализа кривой максимальной амплитуды ЭДС.

Для этого необходимо установить зависимость между нелинейностью характеристик материала и величиной магнитной индукции в воздушном зазоре. Решение данной задачи осуществлялось посредством программного комплекса ANSYS, при этом была разработана трехмерная конечноэлементная модель СГ с ВПМ. Отдельные участки статора выполнялись из стали 2013 с различной магнитной проницаемостью, для учета нелинейности материала статора. В результате моделирования были получены зависимости магнитной индукции в средней линии воздушного зазора для СГ с нелинейностью материала статора и без нее, рисунок 4.

Анализ результатов компьютерного моделирования показал, что при изменении магнитной проницаемости участка статора от номинального значения магнитной проницаемости стали 2013 до значения магнитной проницаемости вакуума магнитная индукция на данном участке снижается на 13%. А следовательно, максимальная амплитуда ЭДС катушки

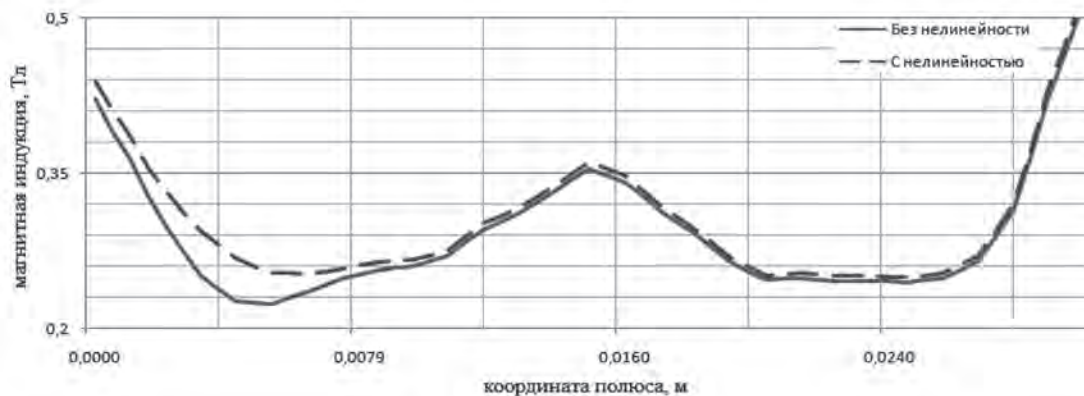


Рис. 4. Изменение магнитной индукции в средней линии воздушного зазора СГ

снизится также на 13% и на кривой амплитуды ЭДС будет наблюдаться провал. Появление данного провала будет неизменным во времени, так же как при статическом эксцентриситете.

Аналогичный провал будет наблюдаться и при неоднородности материалов ротора, но в данном случае появление провалов в кривой максимальной амплитуды ЭДС периодическое и является функцией частоты вращения ротора и времени, то есть подобно кривой максимальной амплитуды ЭДС при динамическом эксцентриситете.

Таким образом, анализ кривой максимальной амплитуды ЭДС катушки позволяет выявить неоднородности в материалах ротора и статора СГ с ВПМ.

Важно отметить, что представленные результаты будут справедливы только для рассматриваемой схемы соединения и укладки обмоток СГ и при изменении схемы соединения и укладки обмоток СГ по пазам необходимо произвести корректировку угла между ЭДС при сложении по теореме косинусов. Сама же методика определения максимальной амплитуды ЭДС в зависимости от неравномерностей воздушного зазора, представленная в работе, является общей для всех СГ с любыми схемами соединения и укладки обмоток.

Полученные результаты могут быть использованы на практике как при проектировании синхронных генераторов переменного тока, так и при оценке их технического состояния.

#### Список литературы

1. Герасин А.А. Особенности применения гибридных магнитных подшипников в быстроходных магнитоэлектрических машинах [Текст] / А.А. Герасин, Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5; [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/105-6935>.

2. Исмагилов Ф.Р. Определение влияния статического эксцентриситета на устойчивость гибридного магнитного подшипника [Текст] / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16 – С. 147–150.

3. Исмагилов Ф.Р. Математическая модель переходных тепловых процессов в бесконтактной магнитоэлектрической машине [Текст] / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – № 3. – Т. 9. – С. 8–14.

4. Геллер Б. Высшие гармоники в асинхронных машинах [Текст] / Б. Геллер, В. Гамата; пер. с англ. З.Г. Каганова. – М.: Энергия, 1981. – 351 с.

5. Вольдек А.И. Электрические машины: учебник для электротехнических специальностей вузов [Текст] / А.И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

6. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: учеб. пособие для студентов вузов [Текст] / В.А. Балагуров. – М.: Высш. школа, 1982. – 272 с.

7. Копылов И.П. Электрические машины: учебник для электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов [Текст] / И.П. Копылов. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.

#### References

1. Gerasin A.A. Osobennosti primeneniya gibridnyh magnitnyh podshipnikov v bystrohodnyh magnitojelektricheskikh mashinah [Tekst] / A.A. Gerasin, F.R. Ismagilov, I.H. Hajrullin, V.E. Vavilov // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2012. – № 5. – URL: <http://www.science-education.ru/105-6935>.

2. Ismagilov F.R. Opredelenie vlijaniya staticheskogo jekscentrisiteta na ustojchivost' gibridnogo magnitnogo podshipnika [Tekst] / F.R. Ismagilov, I.H. Hajrullin, V.E. Vavilov // Vestnik UGATU. – 2012. – Т. 16 – S. 147–150.

3. *Ismagilov F.R.* Matematicheskaja model' perehodnyh teplovyh processov v beskontaktnoj magnitojelektricheskoj mashine [Tekst] / F.R. Ismagilov, I.H. Hajrullin, V.E. Vavilov // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013.– № 3.– t. 9.– S. 8–14.

4. *Geller B.* Vysshie garmoniki v asinhronnyh mashinah [Tekst] / B. Geller, V. Gamata; per. s angl. Z. G. Kaganova. – M.: Jenergija, 1981. – 351 s.

5. *Vol'dek A.I.* Jelektricheskie mashiny: uchebnik dlja jelektrotehnicheskikh special'nostej vuzov [Tekst] /

A.I. Vol'dek . – 3-e izd., pererab. – L.: Jenergija, 1978. – 832 s.

6. *Balagurov V.A.* Proektirovanie special'nyh jelektricheskikh mashin peremennogo toka: ucheb. posobie dlja studentov vuzov [Tekst] / V.A. Balagurov. – M.: Vyssh. shkola, 1982. – 272 s.

7. *Kopylov I.P.* Jelektricheskie mashiny: uchebnik dlja jelektromehanicheskikh i jelektrojenergeticheskikh special'nostej vuzov [Tekst] / I.P. Kopylov. – Moskva: Jenergoatomizdat, 1986. – 360 s.



**Возмилов А.Г.**  
**Vozmilov A.G.**

доктор технических наук, профессор кафедры «Энергообеспечение сельского хозяйства» ФГБОУ ВПО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», Россия, г. Тюмень



**Андреев Л.Н.**  
**Andreev L.N.**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергообеспечение сельского хозяйства» ФГБОУ ВПО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», Россия, г. Тюмень



**Дмитриев А.А.**  
**Dmitriev A.A.**

аспирант кафедры «Энергообеспечение сельского хозяйства» ФГБОУ ВПО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», Россия, г. Тюмень



**Жеребцов Б.В.**  
**Jerebtsov B.V.**

преподаватель кафедры «Энергообеспечение сельского хозяйства» ФГБОУ ВПО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», Россия, г. Тюмень

УДК 621.356.48:622.794.7

## РАЗРАБОТКА ПОЛНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ ПЫЛИ, МИКРООРГАНИЗМОВ И ВРЕДНЫХ ГАЗОВ С ПОМОЩЬЮ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО МОКРОГО ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА

В статье описаны проблемы, связанные с интенсификацией ведения животноводства на промышленной основе, в частности – ухудшение качества микроклимата в помещениях. Эти факторы являются предпосылкой для повышения эффективности существующего мокрого однозонного электрофильтра. Данная статья описывает требования к системам очистки рециркуляционного воздуха. В публикации рассмотрен общий случай конструкции двухступенчатого мокрого электрофильтра, состоящего из двух последовательно соединенных мокрых однозонных электрофильтров (когда активные длины и скорости воздушного потока на первой и второй ступенях электрофильтра различны), а также частный случай (когда они одинаковы). Для обоих случаев разработаны методики расчета комплексной эффективности очистки воздуха от пыли, микроорганизмов, *i*-го и *j*-го вредно действующих газов. Эффективность очистки воздуха от пыли в каждой из ступеней рассчитывается по известной формуле Дейча, от микроорганизмов – на основании графической зависимости количества колониеобразующих частиц от концентрации аэрозольных частиц. Эффективность очистки воздуха от вредных газов определяется с учетом окисления данных компонентов озоном, образующимся в результате коронного разряда, и по-

глощения их жидкостью, омывающей осадительные электроды. Проведен анализ полученных зависимостей, в конце статьи приведены выводы.

*Ключевые слова:* двухступенчатый мокрый электрофильтр, методика расчета, эффективность очистки, пыль, микроорганизмы, вредно действующие газы.

## WORKING FULL METHODS OF CALCULATING EFFICIENCY OF AIR FILTRATIONS AGAINST DUST, MICROORGANISMS AND HARMFUL GASES WITH THE TWO-STAGE WET ELECTROSTATIC FILTER

This article describes the problems associated with the intensification of livestock farming on a commercial basis, in particular – the deterioration of the quality of indoor environment. These factors are a prerequisite for increasing the efficiency of existing single-band of wet electrostatic filter. This paper describes the requirements for cleaning the return air. The publication consider the general case a two-stage wet electrostatic filter, consisting of two series-connected single-band wet electrostatic filters (when the active length and the airflow in the first and second stages are different), as well as a special case (when they are the same). In both cases, the methods of calculation of complex efficiency air filtration, micro-organisms, *i*-th and *j*-th exert a deleterious effect gases. The effectiveness of air purification from dust in each of the stages is calculated from the known formula Deich from microorganisms – based on the plot of the number of colony-forming particles from the particulate matter concentration. Efficiency air cleaning gas is determined taking into account oxidation of these components ozone formed by the corona discharge and absorption of the liquid, washing the collecting electrodes. The analysis of the obtained relationships, at the end of the article the conclusions.

*Key words:* two-stage wet electrostatic filter, procedure of cleaning efficiency, dust, microorganisms, harmful acting gases.

В настоящее время наблюдается общая тенденция к расширению области использования воздушных фильтров для очистки приточного, вытяжного и рециркуляционного воздуха. Это можно объяснить следующими причинами: 1) повышением требований к чистоте воздуха, что связано в значительной мере с развитием производств, требующих определенного качества воздуха; 2) увеличивающимся загрязнением атмосферы; 3) снижением энергозатрат на создание нормируемого микроклимата в помещении и др.

Большой интерес представляют аппараты для комплексной очистки рециркуляционного воздуха в технологических процессах в животноводстве и птицеводстве.

Внутренний воздух животноводческих помещений в результате жизнедеятельности животных и птицы загрязняется пылью, микроорганизмами и вредно действующими газами (углекислый газ, аммиак и сероводород). Согласно Временным рекомендациям по проектированию систем очистки рециркуляционного воздуха в животноводческих и птицеводческих помещениях концентрация вредных в очищенном рециркуляционном воздухе не должна превышать 30% от ПДК по данным вредностям [1].

Использование систем очистки рециркуляционного воздуха на крупных животноводческих и птице-

водческих комплексах позволяет решить ряд задач по обеспечению дальнейшего развития данной отрасли: охраны воздушного бассейна комплексов, снижения энергозатрат на создание оптимального микроклимата, улучшения санитарно-гигиенического состояния в животноводческих помещениях и др.

В работах [2, 3, 4, 5, 6] приведены результаты исследований мокрого однозонного электрофильтра (МЭФ) при комплексной очистке рециркуляционного воздуха в свиноводческих помещениях.

Производственные испытания специально разработанного МЭФ показали высокую эффективность очистки рециркуляционного воздуха от пыли (до 95,4%), микроорганизмов (до 77%) и аммиака (до 83,8%) [5, 7].

Для повышения эффективности комплексной очистки рециркуляционного воздуха был разработан двухступенчатый мокрый электрофильтр (ДМЭФ) [8], состоящий из двух последовательно соединенных однозонных мокрых электрофильтров, схема которого представлена на рис. 1.

Конструктивное отличие первой и второй ступени в общем случае заключается в различии: межэлектродных расстояний ( $h_1 \neq h_2$ ), что позволяет увеличить эффективность тонкой очистки от пыли и микроорганизмов; в составе омывающей осадительные электроды жидкости; активной длины электрофильтра ( $l_1 \neq l_2$ ); скорости воздушного потока ( $u_1 \neq u_2$ ).

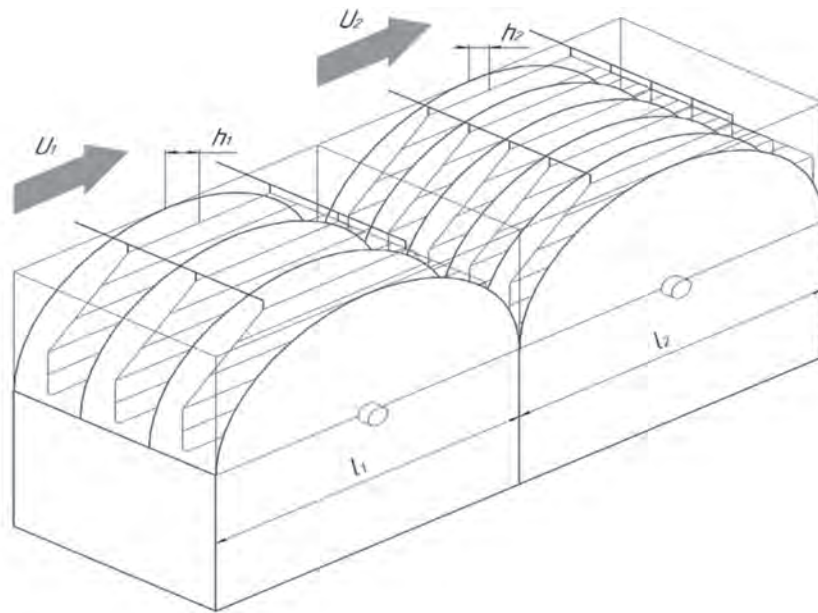


Рис. 1. Схема двухступенчатого мокрого электрофильтра

для 1-й и 2-й ступеней ДМЭФ соответственно:  $h_1, h_2$  – межэлектродное расстояние, м;  $u_1, u_2$  – скорость воздушного потока, м/с;  $l_1, l_2$  – активная длина электрофильтра; 1 – коронирующие электроды, 2 – осадительные электроды.

Первая ступень (ступень грубой очистки) предназначена для очистки воздуха от крупнодисперсного аэрозоля, микроорганизмов,  $i$ -го вредного газа (основная очистка) и  $j$ -го вредного газа. Вторая ступень (ступень тонкой очистки) обеспечивает очистку от мелкодисперсного аэрозоля,  $j$ -го вредного газа (основная очистка) и доочистку от пыли, микроорганизмов,  $i$ -го газа.

Одним из основных технических показателей аппаратов очистки воздуха является их эффективность [9]. В общем, эффективность очистки ДМЭФ можно рассчитать по известной формуле [10]:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1) \cdot (1 - \eta_2), \quad (1)$$

где  $\eta_1, \eta_2$  – эффективность очистки первой и второй ступеней ДМЭФ соответственно.

Рассмотрим более подробно расчет эффективности ДМЭФ при очистке рециркуляционного воздуха от пыли, микроорганизмов и вредных газов.

*Расчет эффективности очистки воздуха ДМЭФ от пыли*

При определении эффективности очистки первой ступени по пыли  $\eta_{n1}$  воспользуемся формулой Дейча [11]:

$$\eta_{n1} = 1 - \exp\left(-\frac{w_1 l_1}{h_1 u_1}\right), \quad (2)$$

аналогично для второй ступени можно записать:

$$\eta_{n2} = 1 - \exp\left(-\frac{w_2 l_2}{h_2 u_2}\right), \quad (3)$$

где для 1-й и 2-й ступеней ДМЭФ соответственно:

$w_1, w_2$  – скорость дрейфа частиц, м/с;  $h_1, h_2$  – межэлектродное расстояние, м;  $u_1, u_2$  – скорость воздушного потока, м/с;  $l_1, l_2$  – активная длина электрофильтра.

Подставляя (2) и (3) в (1) и проведя ряд преобразований, получим аналитическое выражение для расчета эффективности ДМЭФ по очистке воздуха от пыли:

$$\eta_n = 1 - \exp\left(-\frac{w_1 l_1 h_2 u_2 + w_2 l_2 h_1 u_1}{h_1 u_1 h_2 u_2}\right). \quad (4)$$

Допуская, что скорость воздушного потока в аппарате неизменна ( $u_1 = u_2 = u$ ) и при  $l_1 = l_2 = l$ , выражение (4) упрощается и принимает следующий вид:

$$\eta_n = 1 - \exp\left[-\frac{l}{u} \left(-\frac{w_1 h_2 + w_2 h_1}{h_1 h_2}\right)\right]. \quad (5)$$

Анализ зависимости (5) показывает, что эффективность двухступенчатого мокрого электрофильтра по очистке от пыли прямо пропорциональна его общей активной длине  $2l$ , скорости дрейфа частиц  $w_1, w_2$ , обратно пропорциональна скорости воздушного потока  $u$  и межэлектродному расстоянию первой  $h_1$  и второй  $h_2$  ступеней мокрого электрофильтра.

*Расчет эффективности очистки воздуха ДМЭФ от микроорганизмов*

В [12] рассмотрены вопросы определения эффективности очистки воздуха МЭФ от микроорганизмов. В основу расчета положена графическая зависимость количества колониеобразующих частиц (КОЕ) в исследуемом объеме воздуха от концентрации аэрозольных частиц в данном объеме (см. рис. 2) [13].





Рис. 2. Зависимость числа КОЕ в воздушной среде от числа частиц размером 0,5 мкм и более в данной среде

Полученное в [12] аналитическое выражение позволяет определять эффективность очистки воздуха МЭФ от микроорганизмов  $\eta_{КОЕ}$  по значению эффективности очистки воздуха  $\eta_{П}$  данного фильтра от аэрозольных частиц размером 0,5 мкм и более:

$$\eta_{КОЕ} = 1 - (1 - \eta_{П})^{0,66}. \quad (6)$$

Используя выражение (6) на основе уравнения (1), получим выражение для расчета эффективности ДМЭФ по очистке воздуха от микроорганизмов

$$\eta_{КОЕ} = 1 - (1 - \eta_{КОЕ1}) \cdot (1 - \eta_{КОЕ2}), \quad (7)$$

где  $\eta_{КОЕ1} = 1 - (1 - \eta_{n1})^{0,66}$  – эффективность очистки воздуха от микроорганизмов в первой ступени фильтра,  $\eta_{КОЕ2} = 1 - (1 - \eta_{n2})^{0,66}$  – эффективность для второй ступени.

При подстановке  $\eta_{КОЕ1}$  и  $\eta_{КОЕ2}$  в (7) получим аналитическое выражение для расчета эффективности очистки воздуха ДМЭФ от микроорганизмов

$$\eta_{КОЕ} = 1 - (1 - [1 - (1 - \eta_{n1})^{0,66}]) \cdot (1 - [1 - (1 - \eta_{n2})^{0,66}]). \quad (8)$$

Анализ полученного аналитического выражения (8) показывает, что эффективность очистки ДМЭФ воздуха от микроорганизмов зависит от эффективности очистки воздуха данным фильтром от аэрозольных частиц размером 0,5 мкм и более.

Поэтому при проектировании ДМЭФ необходимо определять конструктивные и технологические параметры второй ступени (ступень тонкой очистки) фильтра исходя из условий эффективности очистки воздушной среды от мелкодисперсной части аэрозоля, а именно от частиц размером 0,5 мкм и более.

#### Расчет эффективности очистки воздуха ДМЭФ от вредно действующих газов

В работе [6] рассмотрены вопросы очистки воз-

духа от вредных газовых составляющих мокрым однозонным электрофильтром. В данной работе определено, что очистка воздуха от вредных газовых компонентов в мокром однозонном электрофильтре происходит за счет окисления вредных газов озоном и поглощения специально подобранной жидкостью, омывающей осадительные электрофильтры.

Для мокрого однозонного электрофильтра эффективность очистки воздуха от  $i$ -го вредного газа определяется по выражению

$$\eta_i = 1 - \exp \left[ -\frac{l}{u} (k_{O_3}^i + k_{ож}^i) \right], \quad (9)$$

где  $k_{O_3}^i$  – константа скорости окисления  $i$ -й вредно действующей газовой компоненты озоном;  $k_{ож}^i$  – константа скорости абсорбции  $i$ -й компоненты омывающей жидкостью.

Выше отмечалось, что первая ступень электрофильтра заполняется омывающей осадительные электроды жидкостью, которая эффективно абсорбирует  $i$ -й вредно действующий газ, а вторая ступень заполняется омывающей жидкостью, эффективно абсорбирующей  $j$ -й газ.

В этом случае для ДМЭФ с учетом (1) можно записать аналитическое выражение для расчета эффективности очистки воздуха от вреднодействующих газов:

– для  $i$ -го газа

$$\eta_i = 1 - (1 - \eta_{i1}) \cdot (1 - \eta_{i2}), \quad (10)$$

где  $\eta_{i1}$  и  $\eta_{i2}$  – соответственно эффективность очистки от  $i$ -го газа в первой и второй ступенях фильтра;

– для  $j$ -го газа

$$\eta_j = 1 - (1 - \eta_{j1}) \cdot (1 - \eta_{j2}), \quad (11)$$

где  $\eta_{j1}$  и  $\eta_{j2}$  – соответственно эффективность очистки от  $j$ -го газа в первой и второй ступенях фильтра.

С учетом (9) выражение (10) и (11) принимают следующий вид:

– для *i*-го газа:

$$\eta_i = 1 - \left\{ 1 - (1 - \exp \left[ -\frac{l_1}{u_1} (k^{i1}_{O_3'} + k^{i1}_{OЖ1}) \right]) \right\} \cdot \left\{ 1 - (1 - \exp \left[ -\frac{l_2}{u_2} (k^{i2}_{O_3''} + k^{i2}_{OЖ2}) \right]) \right\} =$$

$$= 1 - \exp \left[ -\frac{l_1}{u_1} (k^{i1}_{O_3'} + k^{i1}_{OЖ1}) - \frac{l_2}{u_2} (k^{i2}_{O_3''} + k^{i2}_{OЖ2}) \right], \quad (12)$$

где  $k^{i1}_{O_3'}$  и  $k^{i2}_{O_3''}$  – константа скорости окисления *i*-й газовой компоненты воздуха озонотом соответственно в первой и второй ступенях;  $k^{i1}_{OЖ1}$  и  $k^{i2}_{OЖ2}$  – константа скорости абсорбции *i*-й газовой компоненты

воздуха омывающей жидкостью соответственно в первой и второй ступенях;

– для *j*-го газа можно записать аналогично:

$$\eta_j = 1 - \exp \left[ -\frac{l_1}{u_1} (k^{j1}_{O_3'} + k^{j1}_{OЖ1}) - \frac{l_2}{u_2} (k^{j2}_{O_3''} + k^{j2}_{OЖ2}) \right]. \quad (13)$$

При допущении  $l_1 = l_2 = l$ ,  $u_1 = u_2 = u$  получим:

– для *i*-го газа:

$$\eta_i = 1 - \exp \left[ -\frac{l}{u} (k^{i1}_{O_3'} + k^{i1}_{OЖ1} + k^{i2}_{O_3''} + k^{i2}_{OЖ2}) \right]; \quad (14)$$

– для *j*-го газа:

$$\eta_j = 1 - \exp \left[ -\frac{l}{u} (k^{j1}_{O_3'} + k^{j1}_{OЖ1} + k^{j2}_{O_3''} + k^{j2}_{OЖ2}) \right]. \quad (15)$$

Обозначив через  $k^{i(O_3)1,2} = k^{i1}_{O_3'} + k^{i2}_{O_3''}$  и  $k^{i(OЖ)1,2} = k^{i1}_{OЖ1} + k^{i2}_{OЖ2}$  и подставив данные значения в (14), получим для *i*-го газа:

$$\eta_i = 1 - \exp \left[ -\frac{l}{u} (k^{i(O_3)1,2} + k^{i(OЖ)1,2}) \right]. \quad (16)$$

Аналогично для *j*-го газа можно записать:

$$\eta_j = 1 - \exp \left[ -\frac{l}{u} (k^{j(O_3)1,2} + k^{j(OЖ)1,2}) \right], \quad (17)$$

где  $k^{j(O_3)1,2} = k^{j1}_{O_3'} + k^{j2}_{O_3''}$  и  $k^{j(OЖ)1,2} = k^{j1}_{OЖ1} + k^{j2}_{OЖ2}$  – константа скорости окисления *j*-й газовой компоненты озонотом и константа скорости абсорбции данной компоненты омывающей жидкостью соответственно.

Анализ уравнений (16) и (17) показывает, что эффективность очистки воздушной среды от вредных газов в конечном итоге зависит от концентрации озона и способности абсорбции данных газов омывающими жидкостями в первой и второй ступенях ДМЭФ.

#### Выводы

1. Аппараты комплексной очистки рециркуляционного воздуха имеют хорошие перспективы в

различных отраслях народного хозяйства: в промышленном животноводстве и птицеводстве, в химической и металлургической промышленности и т. д. и т. п.

2. Полученные аналитические зависимости (5), (8) и (14), (15) позволяют рассчитывать основные конструктивные и технологические параметры ДМЭФ при проектировании систем комплексной очистки рециркуляционного воздуха.

#### Список литературы

1. *Временные рекомендации* по проектированию систем очистки воздуха животноводческих и птицеводческих помещений [Текст]. – М.: ГИПРОНИИсельхоз, 1976. – 44 с.
2. *Возмилов А.Г.* Очистка воздуха в помещениях для свиней [Текст] / А.Г. Возмилов // Достижения науки и техники АПК. – 1991. – № 2. – С. 33.
3. *Волков Г.К.* Возможность использования рециркуляции воздуха в свиноматках [Текст] / Г.К. Волков, В.Н. Гушин // Ветеринария. – 1974. – № 9. – С. 29–32.
4. *Паникар И.И.* Промышленное птицеводство и охрана окружающей среды [Текст] / И.И. Паникар и др. – М.: Росагропромиздат. – 1988. – 80 с.

5. *Возмилов А.Г.* Результаты исследований мокрого однозонного электрофильтра [Текст] / А.Г. Возмилов, В.Н. Мишагин, Л.Н. Андреев // Техника в сельском хозяйстве. – 2009. – № 3. – С. 20–22.

6. *Возмилов А.Г.* Электроочистка и электрообеззараживание воздуха в промышленном животноводстве и птицеводстве: дис. д-ра техн. наук [Текст] / А.Г. Возмилов. – Челябинск, 1993. – 268 с.

7. *Возмилов А.Г.* и др. Результаты производственных испытаний мокрого электрофильтра [Текст] / А.Г. Возмилов, Л.Н. Андреев, В.Д. Астафьев и др. // Вестник КрасГАУ. – 2013. – № 8. – С. 185–191.

8. *Патент № 128919* Российская Федерация, МПК F24F3/00. Система двухступенчатой очистки воздуха [Текст] / А.Г. Возмилов, Б.В. Жеребцов, Л.Н. Андреев, А.В. Якурнов, Н.И. Смолин; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Тюменская государственная сельскохозяйственная академия» (RU). – № 2012114273; заявл. 11.04.2012; опубл. 10.06.2013. – № 11. – 3 с.

9. *ГОСТ Р. 51215-99.* Фильтры очистки воздуха. Классификация. Маркировка [Текст]. – Введ. 2000–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 6 с.

10. *Ужов В.Н.* Очистка промышленных газов фильтрами [Текст] / В.Н. Ужов, Б.И. Мягков. – М.: Химия, 1970. – 320 с.

11. *White H.J.* Entstaubung industrieller Gase mit Elektrofilter [Text] / H.J. White. – Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1969. – 197 с.

12. *Мишагин В.Н.* и др. Методика определения эффективности систем очистки воздуха от микроорганизмов [Текст] / В.Н. Мишагин и др. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – № 5. – С. 39–40.

13. *Чистые помещения* [Текст] / Под ред. А.Е. Федотова. – М.: АСИНКОМ, 1998. – 320 с.

#### References

1. *Vremennye rekomendacii* po proektirovaniju sistem ochistki vozduha zhivotnovodcheskih i pticevodcheskih pomeshhenij [Текст]. – М.: GIPRONII sel'hoz, 1976. – 44 с.

2. *Vozmilov A.G.* Ochistka vozduha v pomeshhenijah dlja svinej [Текст] / A.G. Vozmilov // Dostizhenija nauki

i tehniki APK. – 1991. – № 2. – С. 33.

3. *Volkov G.K.* Vozmozhnost' ispol'zovanija recirkuljacii vozduha v svinnarnikah [Текст] / G.K. Volkov, V.N. Gushhin // Veterinarija. – 1974. – № 9. – С. 29–32.

4. *Panikar I.I.* Promyshlennoe pticevodstvo i ohrana okruzhajushhej sredy [Текст] / I.I. Panikar i dr. – М.: Rosagropromizdat. – 1988. – 80 с.

5. *Vozmilov A.G.* Rezul'taty issledovanij mokrogo odnozonnogo jelektrofil'tra [Текст] / A.G. Vozmilov, V.N. Mishagin, L.N. Andreev // Tehnika v sel'skom hozjajstve. – 2009. – № 3. – С. 20–22.

6. *Vozmilov A.G.* Jelektroochistka i jelektroobezrazhivanie vozduha v promyshlennom zhivotnovodstve i pticevodstve: dis. d-ra tehn. nauk [Текст] / A.G. Vozmilov. – Cheljabinsk, 1993. – 268 с.

7. *Vozmilov A.G.* i dr. Rezul'taty proizvodstvennyh ispytaniy mokrogo jelektrofil'tra [Текст] / A.G. Vozmilov, L.N. Andreev, V.D. Astaf'ev i dr. // Vestnik KrasGAU. – 2013. – № 8. – С. 185–191.

8. *Patent № 128919* Rossijskaja Federacija, МПК F24F3/00. Sistema dvuhstupenchatoj ochistki vozduha [Текст] / A.G. Vozmilov, B.V. Zherebcov, L.N. Andreev, A.V. Jakurnov, N.I. Smolin; patentoobladatel' FGBOU VPO «Tjumenskaja gosudarstvennaja sel'skohozjajstvennaja akademija» (RU). – № 2012114273; zajavl. 11.04.2012; opubl. 10.06.2013. – № 11. – 3 с.

9. *ГОСТ Р. 51215-99.* Fil'try ochistki vozduha. Klassifikacija. Markirovka [Текст]. – Введ. 2000–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 6 с.

10. *Uzhov V.N.* Ochistka promyshlennyh gazov fil'trami [Текст] / V.N. Uzhov, B.I. Mjagkov. – М.: Himija, 1970. – 320 с.

11. *White H.J.* Entstaubung industrieller Gase mit Elektrofilter [Text] / H.J. White. – Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1969. – 197 с.

12. *Mishagin V.N.* i dr. Metodika opredelenija jeffektivnosti sistem ochistki vozduha ot mikroorganizmov [Текст] / V.N. Mishagin i dr. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – № 5. – С. 39–40.

13. *Chistye pomeshhenija* [Текст] / Под ред. А.Е. Федотова. – М.: АСИНКОМ, 1998. – 320 с.

**Муфтиев С.Р.****Muftiev S.R.**

аспирант кафедры «Физика» ФГБОУ ВПО  
«Уфимский государственный университет  
экономики и сервиса», Россия, г. Уфа

УДК 621.313

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО АВТОТРАНСФОРМАТОРА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Статья посвящена вопросам проектирования импульсного высокочастотного силового автотрансформатора системы стабилизации напряжения тяговых подстанций городского электротранспорта. Рассматривается методика расчета с входным напряжением типа «меандр» с определением оптимальной рабочей частоты системы «инвертор на IGBT-модулях – автотрансформатор» с учетом «скин»-эффекта в проводящей среде на высоких частотах.

Полученная методика расчета силовых импульсных автотрансформаторов может быть использована при проектировании установок индукционного нагрева, силовых стабилизаторов постоянного напряжения, промышленных инверторных сварочных аппаратов.

*Ключевые слова:* силовой импульсный автотрансформатор, IGBT-модуль, меандр, система стабилизации напряжения.

## DESIGN FEATURES OF THE PULSE TRANSFORMER VOLTAGE STABILIZATION OF CITY ELECTRIC TRANSPORT TRACTION SUBSTATIONS

The article is devoted to the design of pulsed high-frequency power transformer voltage stabilization of city electric transport traction substations. The method of calculation with an input voltage meander with the definition of an optimum operating frequency inverter system on IGBT-modules – autotransformer with subject «skin-effect in a conductive medium to high frequencies».

The technique of calculation of power pulsed autotransformers can be used when designing installations of induction heating power DC voltage stabilizers, industrial inverter welding machines.

*Key words:* power pulse autotransformer, IGBT-module, meander, the system of stabilization of voltage.

При выборе методики расчета автотрансформатора системы стабилизации напряжения тяговых подстанций городского электротранспорта целесообразно отталкиваться от уже разработанной для стабилизаторов [1]. Однако следует учесть, что в исходной методике предполагается, что входное напряжение автотрансформатора близко к синусоидальному, а в нашем случае – форме меандра (рис. 1).

Согласно этому рисунку, максимальная индукция

$$B_c = U_{1,0} \frac{t_{\text{и}}}{2Q_r \omega_1}, \quad (1)$$

где  $U_{1,0}$  – амплитудное входное напряжение;  $\omega_1$  – число витков первичной обмотки автотрансформа-

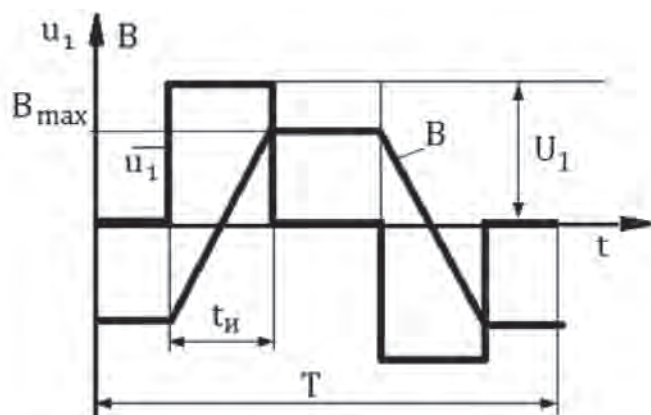
тора;  $Q_2$  – площадь поперечного сечения сердечника автотрансформатора. Напряжение  $U_{1,0}$  связано с выпрямленным напряжением стабилизатора следующим соотношением:

$$U_{1,0} = \frac{T}{2t_{\text{и}}} U_1. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получаем

$$B_c = \frac{U_1}{4f Q_r \omega_1}. \quad (3)$$

Нетрудно видеть, что соотношение (3) отличается от данного в [1] коэффициентом 1,11. Именно этот поправочный коэффициент следует вводить в те формулы методики [1], которые основаны на свя-


 Рис. 1. Зависимости напряжения  $u_1$  и индукции  $B$  от времени  $t$ :

$T$  – период;  $t_u$  – время импульса;  $B$  – индукция насыщения

зи напряжения на обмотках и амплитудой индукции в сердечнике.

Другим специфическим фактором проектирования нашего автотрансформатора является выбор оптимальной частоты  $f$ . Чем выше частота инвертирования, тем более экономичен, согласно [1], расход активных материалов:

$$\mathcal{E} \equiv \frac{4\sqrt{S_n^3}}{f^{0.27}}, \quad (4)$$

где  $\mathcal{E}$  – обобщенный экономический показатель (стоимость расхода активных материалов, стоимость потерь, капитальные затраты, связанные с габаритным объемом);  $S_n$  – расчетная мощность трансформаторного оборудования.

Однако с увеличением частоты возникает ограничение использования полупроводниковых элементов, в первую очередь IGBT-транзисторов большой мощности, существенно возрастают потери в обмотках автотрансформатора, обусловленные эффектом вытеснения («скин»-эффектом).

Рассмотрим эти ограничения более детально.

Динамические процессы в транзисторах IGBT (время восстановления управляемости, допустимое время нарастания напряжения в интервале закрытия и тока в интервале открытия) составляют 1÷3 мкс [2]. Ясно, что период чередования интервалов открытия и закрытия должен быть по крайней мере на два порядка ( $10^2$ ) дольше, чем суммарное время динамических процессов транзистора. Иными словами,

$T = \frac{1}{f} > (100 \div 300)$  мкс, что соответствует частоте  $3300 \div 10000$  Гц.

С другой стороны, глубина проникновения электромагнитной волны в проводящую среду равна [3]

$$\tau = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}. \quad (5)$$

Для медного провода ( $\rho = 0,0175 \cdot 10^{-6}$  Ом·м<sup>2</sup>/м) эта глубина равна

$$\tau = 0,067 \sqrt{\frac{1}{f}} \text{ м}. \quad (6)$$

При толщине провода порядка 1 мм выбираем частоту инвертирования  $f = 5000$  Гц. Поскольку входное напряжение инвертора меняется в пределах от  $U_{1\text{мин}}$  до  $U_{1\text{макс}}$ , выбираем коэффициент трансформации автотрансформатора  $k_w = \omega_1 / (\omega_2 + \omega_1)$  равным:

$$k_w = \frac{0,9U_{1\text{мин}}}{U_{1\text{ном}}}. \quad (7)$$

Расчетная мощность автотрансформатора:

$$S_n = \frac{\alpha}{1 - \Delta U} U_{2\text{макс}} I_{2н} (1 - k_w), \quad (8)$$

где  $\alpha = \left( \frac{U_{1\text{макс}} - U_{1\text{мин}}}{U_{1\text{мин}}} - \Delta U \right) (1 - k_w) + 1 - \Delta U$ ,

$$\Delta U = U_{1\text{макс}} - U_{1\text{мин}}. \quad (9)$$

Сечение сердечника автотрансформатора выбираем по формуле (9) [1] с учетом того обстоятельства, что коэффициент следует уменьшить в отношении  $\frac{1}{1,11^2} \approx 0,81$ :

$$Q_r = (3,2 \div 3,6) \left( \frac{S_n \cdot g_0}{f B_m k_1^{1,5} g_c} \right)^{\frac{4}{7}} \left( \frac{\rho \cdot 10^{10}}{q_{т.п.}} \right)^{\frac{2}{7}}, \quad (10)$$

где  $g_0$  и  $g_c$  – удельные плотности материалов сердечника и провода;  $\rho$  – удельное сопротивление провода;  $q_{т.п.}$  – допустимая мощность теплового излучения поверхности обмотки.

Поперечное сечение сердечника выбирается в виде ступенчатой фигуры, вписанной в круг [4]. Диаметр круга определяется по формуле

$$D = 2 \sqrt{\frac{Q_r}{\pi}}.$$

Форму сердечника сделаем близкой к круглой. Для этого воспользуемся известными соотношениями (рис. 2).

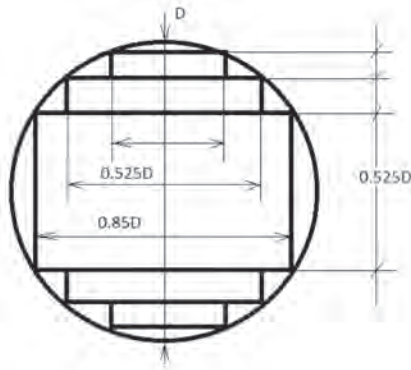


Рис. 2. Соотношения диаметра окружности к сторонам вписанного прямоугольника

Размеры поперечного сечения яра сердечника:

$$h_{\text{я}} = 2 \cdot a.$$

Высота окна сердечника:

$$h = (1,2 \div 1,4) \cdot k_1 (1 + 2,3 \sqrt{\frac{k_{\phi} \cdot g_{\phi}}{k_0 \cdot g_0 \cdot k_1}}) \cdot a,$$

где  $k_0$  – коэффициент заполнения окна медью.

$$G_c = b(4a + h)^2 - h^2 b) \cdot g_c = \left(\frac{\pi D_c^2}{4} k_c h + h_{\text{я}}^2 (C + 2D)\right) g_c.$$

Масса автотрансформатора:  $G_A = G_1 + G_2 + G_c$ . В соответствии с этой методикой был рассчитан автотрансформатор системы стабилизации напряжения тяговых подстанций городского электротранспорта мощностью 480 кВт. На рис. 3 изображена конструкция стабилизатора с этим автотрансформатором.

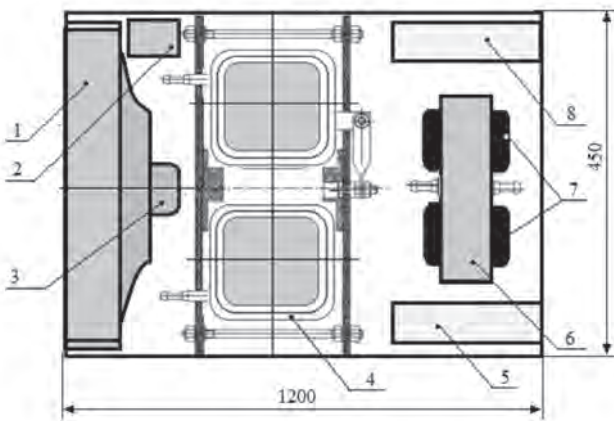


Рис. 3. Компоновка основных узлов (вид сверху) СШН:

- 1 – радиатор жидкостного охлаждения;
- 2 – насос центробежный;
- 3 – электродвигатель вентилятора;
- 4 – автотрансформатор ТТЗ-800;
- 5 – блок питания, управления и сигнализации;
- 6 – теплообменник для охлаждения диодных и IGBT-модулей;
- 7 – диодные и IGBT-модули;
- 8 – блок коммутации

#### Список литературы

1. Бамдас А.М. Трансформаторы, регулируемые подмагничиванием [Текст] / А.М. Бамдас, С.В. Ша-

Число витков первичной обмотки:

$$w_1 = \frac{0,25 \cdot U_1}{f \cdot B_r \cdot 2Q_c}$$

Число витков катушки вторичной обмотки:

$$w_2 = w_1 (1 - k_w) \quad (11)$$

Ток в первичной обмотке:

$$I_1 = (1,02 \div 1,1) I_2 / k_w \quad (12)$$

Плотность тока в обмотках выбирается при проводе типа лицендрат:

$\Delta_L = 2 \div 3 \text{ А/мм}^2$ ; следовательно, диаметр одного провода равен

$d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{I}{\Delta_L N_L}}$ , где  $N_L$  – число проводников в лицендрате.

Масса обмотки:

$$G_1 = 2g_0 \cdot l_{cp} \cdot w_1 \cdot d_1,$$

где  $l_{cp}$  – средняя длина витка обмотки.

Масса сердечника:

пиро. – М.: Энергия, 1964. – 160 с.

2. Колпаков А. Схемотехнические способы борьбы с защелкиванием в каскадах с IGBT-транзисторами [Текст] / А. Колпаков // Компоненты и технологии. – 2000. – № 7.

3. Энциклопедический словарь нанотехнологий [Электронный ресурс]. – URL: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/nanotechnology/192/скин> (дата обращения: 17.03.2012).

4. Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов [Текст] / С.С. Вдовин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1991. – 208 с.

#### References

1. Bamdas A.M. Transformatory, reguliruemye podmagnichivaniem [Tekst] / A.M. Bamdas, S.V. Shapiro – M.: Jenergija, 1964. – 160 s.

2. Kolpakov A. Shemotekhnicheskie sposoby bor'by s zashhelkivaniem v kaskadah s IGBT-tranzistorami [Tekst] / A. Kolpakov // Komponenty i tehnologii. – 2000. – № 7.

3. Jenciklopedicheskij slovar' nanotekhnologij [Jelektronnyj resurs]. – URL: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/nanotechnology/192/скин> (data obrashhenija: 17.03.2012).

4. Vdovin S.S. Proektirovanie impul'snyh transformatorov [Tekst] / S.S. Vdovin. – 2-e izd., pererab. i dop. – L.: Jenergoatomizdat, Leningr. otdelenie, 1991. – 208 s.

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

## DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS



**Ефанов В.Н.**  
**Efanov V.N.**

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



**Кутабов А.Н.**  
**Kitabov A.N.**

*аспирант кафедры «Электроника и биомедицинские технологии» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа*

УДК004.896

### СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ IDEF-ТЕХНОЛОГИИ

В статье рассматриваются вопросы синтеза структурных схем аппаратной части системы диагностики погружного электрооборудования на основе детально проведенного анализа соответствующей предметной области с помощью ее функционального моделирования с применением методологии структурного анализа (SADT) на основе IDEF0-технологии. Приведен краткий анализ особенностей эксплуатации погружного оборудования, на основе которого сделан вывод о необходимости разработки новых систем диагностики, способных отвечать все возрастающим требованиям к показателям эксплуатационной надежности скважинного оборудования. Определено место и роль методологии структурного анализа в задаче синтеза структурных схем системы диагностики погружного электрооборудования, обоснован выбор IDEF0-технологии для построения функциональной модели анализируемой предметной области, которая представляет собой совокупность иерархически упорядоченных диаграмм с разной степенью детализации. На основе полученной функциональной модели был сформирован перечень требований к аппаратной части системы диагностики. На основе полученных требований была сформирована новая концепция диагностики погружного электрооборудования на основе распределенных средств измерения, основной идеей которой является разделение функций измерения и обработки сигналов с датчиков между погружной и наземной частями системы диагностики. Предложена базовая структурная схема измерительного модуля как основы при реализации указанной концепции. Сформирован список условий и требований, удовлетворение которых в каждом конкретном случае практической реализации позволит осуществить концепцию распределенности средств измерения. Также в статье приведены два варианта практической реализации системы диагностики на основе распределенных средств измерений.

*Ключевые слова:* погружное электрооборудование, SADT-методология, IDEF0-технология, система измерения параметров контроля.

## SYNTHESIS OF THE STRUCTURE OF FINDING THE TECHNICAL STATE ELECTRIC IMMERSION IDEF-BASED TECHNOLOGY

The article deals with the synthesis of block diagrams of the hardware diagnostics system of electrical submersible based on a detailed analysis on the subject field using its functional simulation using the methodology of structural analysis (SADT) IDEF0-based technology. A brief analysis of the characteristics of operation of downhole equipment, based on which the conclusion of the need to develop new diagnostic systems capable of responding to the increasing demands of operational reliability of downhole equipment. The place and role of the methodology of structural analysis in the synthesis of block diagrams of electrical submersible diagnosis, justify the choice of IDEF0-technology for the construction of a functional model of the analyzed subject area, which is a set of hierarchically ordered diagrams with varying degrees of detail. On the basis of the functional model was formed by a list of requirements for hardware diagnostics. Based on the requirements of formation of a new concept of diagnostics of electrical submersible based on distributed measurement tools, the basic idea of which is the separation of the functions of measurement and processing sensor signals between the submersible and surface parts of the system diagnostics. A basic block diagram of the measuring module as a basis for the implementation of this concept. Created a list of conditions and requirements, the satisfaction of which in each case to realize the practical implementation of the concept of distributed instrumentation. The article also shows the two options of practical implementation of the system diagnostics based on the distributed measuring instruments.

*Key words:* electrical submersible, SADT-methodology, IDEF0-technology, measurement system control.

### *Введение*

Современное состояние нефтедобычи в России характеризуется сложной геолого-технологической структурой запасов нефти, в которой преобладают трудноизвлекаемые запасы из низкопроницаемых пластов, расположенных на глубоких горизонтах, с высоковязкой и битумной нефтью, высоким содержанием воды и газа, отложениями парафина и неорганических солей, образованием высоковязких эмульсий. Все это определяет сложные эксплуатационные условия, в которых работает глубинное электрооборудование. При эксплуатации глубинно-насосных установок в подобных осложненных условиях актуальной задачей является повышение надежности их работы. На интенсивность отказов погружных электроцентробежных насосов влияет целая группа факторов, к которым относятся: угол искривления скважины, интенсивность искривления, наличие резких перегибов ствола, состав перекачиваемой жидкости, глубина спуска насоса, геологические особенности скважины, воздействие вибрации и многое другое.

Для максимального увеличения показателей эксплуатационной надежности глубинно-насосных установок необходимо полностью учитывать влияние перечисленных факторов на техническое состояние погружного оборудования и своевременно выявлять возможные дефекты. Практика эксплуатации показывает, что повышение срока службы за счет своевременной диагностики технического состояния дает значительно больший эффект, чем улучшение других характеристик оборудования.

Для этого необходимо внедрять новые прогрессивные системы диагностики, способные обрабатывать и анализировать большие объемы промысловой информации, а также оценивать и прогнозировать техническое состояние обследуемого оборудования.

Детальная проработка структуры подобных программно-аппаратных комплексов представляет нетривиальную задачу, решение которой включает следующие этапы: анализ функционального предназначения системы; разработку основных подсистем по отдельности и способов их взаимодействия; проектирование собственно системы, предусматривающее объединение подсистем в единое целое; техническую реализацию и тестирование работоспособности системы; введение системы в действие; функционирование – использование системы по назначению. При решении подобных задач схемотехнического проектирования широко используется SADT-методология (Structured Analysis and Design Technique – методология структурного анализа и проектирования) – совокупность методов, правил и процедур, предназначенных для построения функциональной структуры сложных иерархических систем в виде модели, которая практически полностью устраняет возможную неоднозначность семантического описания. Такая модель представляет собой совокупность иерархически упорядоченных и взаимосвязанных диаграмм, организованных в виде древовидной структуры, где верхняя диаграмма является наиболее общей, а самые нижние наиболее детализированы.

Применение методологии SADT для решения



поставленных задач позволяет определить основные функции системы, разработать системный проект, выявить взаимосвязь между частями всей системы [1, 2, 3]. На основе SADT разработан также ряд производных стандартов, таких как IDEF, предназначенных для построения отдельных специфических моделей, например, функциональных или информационных. Рассмотрим основные этапы синтеза структуры системы диагностики технического состояния погружного электрооборудования с использованием IDEF0-технологии.

#### Функциональная модель процесса диагностики на основе IDEF0-технологии

Данная модель представляет собой совокупность диаграмм с постепенно увеличивающейся детализацией по мере декомпозиции блоков модели. Общее представление описываемой предмет-

ной области, связанной с диагностикой погружного электродвигателя (ПЭД), изображено на контекстной диаграмме (рис. 1).

На данной диаграмме представлен блок «Диагностика ПЭД», входами которого являются непосредственно объект исследования «ПЭД», априорная информация и методики испытаний. В результате выполнения данной функции на выходе блока образуются: результат диагностики, графическая и табличная информация и т. д.

Вполне очевидны механизмы выполнения данной функции (дуги снизу), а также управление (дуги сверху). Механизмами являются: информационная система, оборудование, персонал.

В качестве элементов управления в данной задаче выступают различного рода нормативная документация, требования и рекомендации предприятия, документация на оборудование и т. д.



Рис. 1. Контекстная диаграмма функциональной модели диагностики

Приведенная контекстная диаграмма далее детализируется с учетом задач, которые будут решаться в процессе диагностики. На рис. 2 приведена декомпозиция контекстной диаграммы, в состав которой входят следующие блоки: анализ априорной информации (1), испытание ПЭД (2), обработка результатов измерения (3), передача информации по уровням иерархии (4), принятие управленческого решения (5).

Сложная структура первого уровня декомпозиции обусловлена многоуровневой системой управления техническим состоянием оборудования в нефтяных компаниях.

Первый блок «Анализ априорной информации» реализует подготовительный этап процесса диагностики. На данном этапе накапливается статистика наработки объекта диагностики, определяются наиболее информативные параметры контроля,

формируются необходимые предписания и указания по проведению испытания.

Второй блок «Испытание ПЭД» является одним из ключевых. Его реализация предусматривает сборку тестовой установки, спуск ее в скважину, проведение необходимых замеров параметров контроля и т. д.

Третий блок «Обработка результатов измерений» включает основные алгоритмы обработки измерительной информации с последующим анализом всех измеренных параметров. На данном этапе формируется заключение о техническом состоянии оборудования, т. е. результат диагностики, а также создается и пополняется база данных.

Описанные выше блоки являются наиболее важными с точки зрения решения поставленной задачи диагностики. Следующие два блока, четвертый и пятый, в большей степени относятся к верх-

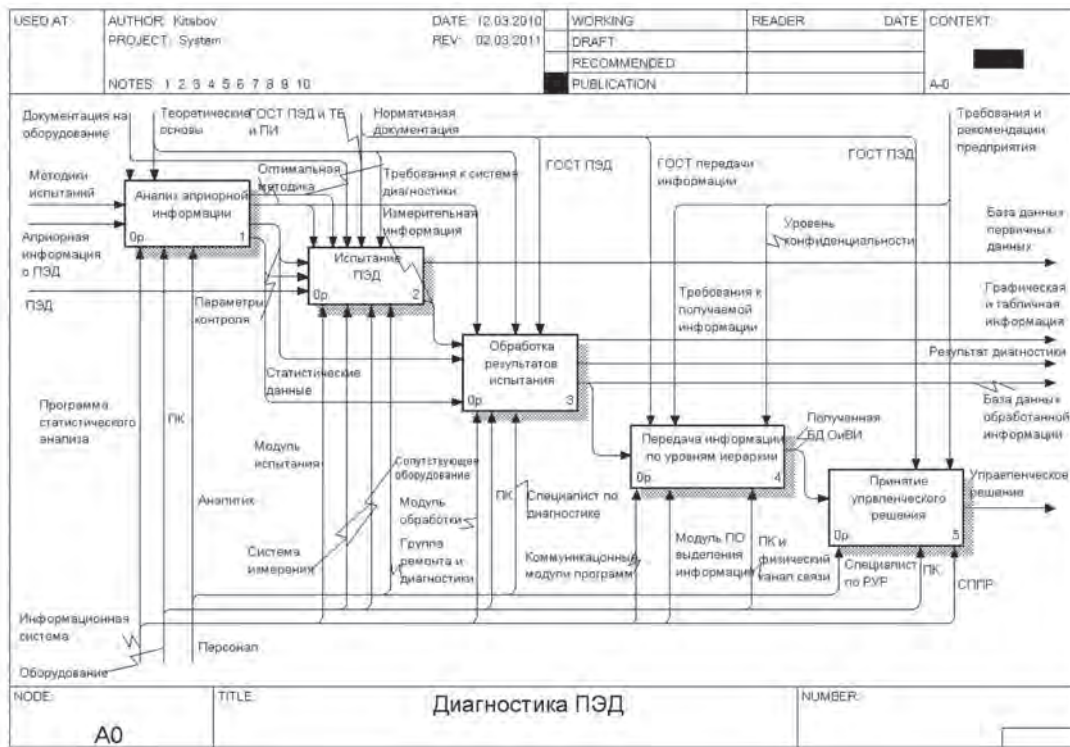


Рис. 2. Функциональная модель процесса диагностики

ним уровням управления эксплуатацией погружного оборудования.

Механизмами и техническими средствами, участвующими в выполнении операции диагностики ПЭД, являются:

1) коммуникационное обеспечение (Internet-канал, GSM-модуль, физические проводные каналы связи RS232 и RS485);

2) вычислительные средства (микроконтроллеры универсального и специального назначения, компьютеры IBM PC, специальные контроллеры станций управления);

3) широкий спектр программного обеспечения (коммуникационные модули программ, модули ПО выделения информации, система поддержки принятия решений, модуль обработки информации и т. д.);

4) технологическая оснастка и сопутствующее оборудование;

5) система измерения параметров контроля.

Анализируя перечисленные выше механизмы для реализации рассматриваемого процесса, можно сделать вывод, что для обеспечения функционирования процесса диагностики необходимы как алгоритмическое и математическое обеспечение (реализуемые в виде программных модулей), так и различного рода аппаратные средства. Очевидно, что среди аппаратных средств наиболее значимые функции выполняет система измерения параметров контроля. Следует отметить, что в настоящее время применяются несколько типов измерительных систем [4], поскольку каждой из этих систем

свойственны определенные недостатки. В частности, для систем наземного типа – это горизонтальное расположение оборудования и невозможность имитации скважинных условий, а для систем погружного исполнения – возможность контроля информативных параметров только в одной точке оборудования, что в случае протяженного погружного оборудования (до 10–15 м) является причиной низкого качества диагностики [4].

Таким образом, описание процесса диагностики в рамках IDEF0-технологии позволяет сделать вывод, что измерительная система в составе диагностического комплекса является наиболее важным звеном, которое нуждается в разработке новых перспективных структур для устранения указанных выше недостатков.

#### *Синтез перспективных структур системы измерения параметров контроля*

Отмеченное в предыдущем разделе противоречие между необходимостью использовать несколько датчиков, закрепленных по всей длине двигателя, для повышения достоверности диагностики и невозможностью проводить испытания в скважине с таким составом измерительной аппаратуры потребовало разработки новой концепции построения аппаратной части исследуемой системы. Поскольку суть противоречия заключается в недопустимых габаритах датчиков, а также в проблеме организации канала передачи данных с датчиков, то предлагаемая концепция предусматривает разделение

функций измерения и обработки данных между погружной и наземной частями, а также размещение первичных преобразователей на поверхности корпуса оборудования. При этом первичные преобразователи, которые крепятся на корпус двигателя, снабжены микроконтроллером и оборудованием для организации канала связи.

Структурная схема устройства для измерения параметров (ИМ) контроля в каждой точке имеет следующий состав (рис. 3): датчик температуры (ДТ), датчик вибрации (ДВ), нормирующие преобразователи сигналов датчиков (НП), мультиплексор (MUX), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), микроконтроллер (МПЧ), элементы и узлы для обеспечения работы канала связи (ИУ), элементы питания (ИП).

Датчики вибрации и температуры измеряют соответствующие параметры, после чего, в зависимости от состояния управляющих выходов мультиплексора, сигналы подаются на АЦП и далее на

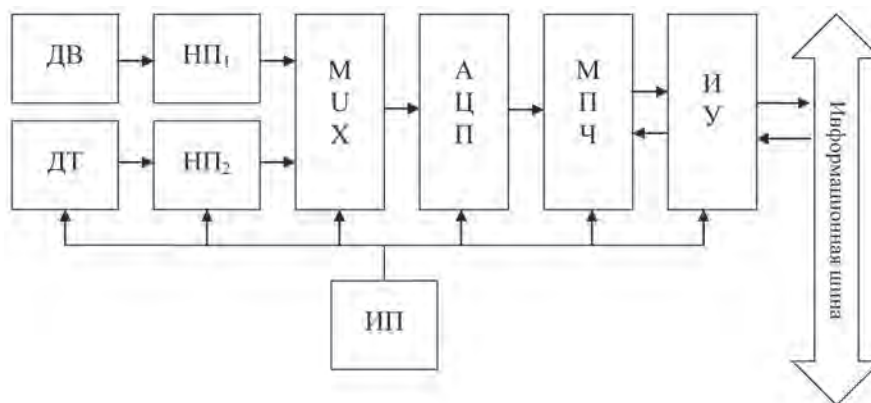


Рис. 3. Структурная схема измерительного модуля

Канал связи предназначен для передачи данных вибрации, которая имеет высокий динамический диапазон и измеряется с очень малыми промежутками времени, поэтому канал связи должен иметь достаточно высокую пропускную способность. Также необходимо, чтобы канал связи обеспечивал возможность подключения большого количества ИМ к одной информационной шине, что является ключевым моментом предлагаемой концепции. Кроме того, в связи с ограниченным пространством между оборудованием и стенками скважины необходимо, чтобы количество проводов линии связи было минимальным, так же как и габариты аппаратной части канала. Следовательно, канал должен быть организован на основе протокола последовательной передачи данных с очень высокими скоростями и малой вероятностью ошибок. При этом канал связи должен иметь простые процедуры управления, так как в ИМ используются микроконтроллеры с

микроконтроллер. Микроконтроллер выполняет функции начальной обработки и хранения результата измерения, а также для преобразования полученной измерительной информации в формат, соответствующий требованиям канала связи. После этого сигналы посредством канала связи из микроконтроллера последовательно передаются на верхний уровень.

Дальнейшая детализация структуры системы измерения параметров контроля требует решения следующих задач:

- 1) выбор канала связи между наземной и погружной частью системы;
- 2) обоснование аппаратного состава наземной части системы диагностики;
- 3) выбор элементов ИМ в соответствии с габаритными размерами зазора между оборудованием и скважиной;
- 4) оптимизация структуры ИМ в целом.

ограниченной вычислительной мощностью. И наконец, канал передачи должен обладать возможностью передачи данных на значительные расстояния без потери информации, так как все ИМ удалены от принимающей части как минимум на длину оборудования в скважине (от 20 до 60 метров).

Следующая задача, требующая решения, состоит в определении аппаратной составляющей наземной части, которая осуществляет обработку измерительной информации. При этом необходимо обеспечить согласование информации, поступающей с глубинной части, формат которой определяется каналом связи и стандартными портами обмена информации в компьютере. Следовательно, в состав наземной части необходимо включить устройство преобразования форматов данных (УПФ). Структурная схема наземной части системы диагностики изображена на рис. 4.

При выборе элементной базы ИМ мы будем ис-

ходить из следующих соображений. В настоящее время стенды диагностики снабжаются пьезоэлектрическими датчиками вибрации. Данный тип датчиков имеет недопустимые, с точки зрения поставленной задачи, габаритные размеры, что требует применения датчиков миниатюрного исполнения, выполненных с использованием интегральных технологий, таких как поверхностные интегральные акселерометры. Учитывая, что выходной сигнал таких датчиков является, как правило, аналоговым или широтно-импульсным, необходимо использовать первичные преобразователи, удовлетворяющие следующим условиям: миниатюрные габаритные размеры, удобный для передачи выходной сигнал, малая погрешность преобразования.

Под оптимизацией структуры системы диагностики ПЭД понимается выбор необходимых аппаратных средств наземной и погружной части системы диагностики с целью обеспечения мини-

мальных габаритов погружного ИМ. Данная задача может быть решена за счет оптимальных схемотехнических решений, предусматривающих сочетание в одном электронном узле нескольких функциональных устройств, например, микроконтроллер со встроенным АЦП.

Изложенные соображения позволили определить базовую структурную схему системы диагностики ПЭД, предусматривающую использование распределенных средств измерения при проведении испытаний в скважине. Кроме того, сформированы требования к основным функциональным блокам системы, выполнение которых позволяет обеспечить ее функционирование в жестких условиях эксплуатации.

Глубинная часть системы включает совокупность ИМ, количество которых определяется индивидуальной конструкцией оборудования и ограничено 32-мя устройствами (по стандарту RS485).

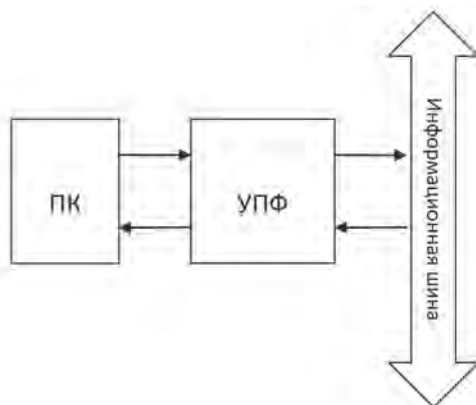


Рис. 4. Структурная схема наземной части системы диагностики

Каждый ИМ имеет в своем составе следующие функциональные узлы: акселерометр ADXL103, датчик температуры TMP37, нормирующие преобразователи (фильтр нижних частот (ФНЧ) и усилитель напряжения) на операционном усилителе OP284, микроконтроллер Mega16, микросхему интерфейса MAX491.

Структурная схема ИМ, реализованного на основе вышеперечисленных компонентов, представлена на рис. 5.

Наземная часть системы диагностики состоит из следующих функциональных узлов: устройство преобразования форматов данных, персональный или промышленный компьютер. В свою очередь, наземный блок преобразования форматов данных включает в свой состав микросхему интерфейса MAX491, микросхему FTDI232 и элементы питания схемы (ИП). Структурная схема наземной части системы диагностики представлена на рис. 6.

Сигналы с датчиков поступают на АЦП микроконтроллера в зависимости от выбранного канала

измерения. Далее происходит преобразование сигналов и запись их в оперативное запоминающее устройство.

После выполнения измерений полученная информация передается посредством микросхемы интерфейса и информационной шины в устройство преобразования формата данных. В данном блоке осуществляется преобразование форматов, после чего сигналы поступают на компьютер, где происходит их обработка и представление результата испытания оператору.

#### Заключение

В данной работе рассмотрены вопросы синтеза структуры системы диагностики технического состояния погружного электрооборудования на основе системного моделирования процесса получения и обработки измерительной информации. Показан один из возможных подходов к формализации процессов диагностики технического состояния погружного электрооборудования с использованием

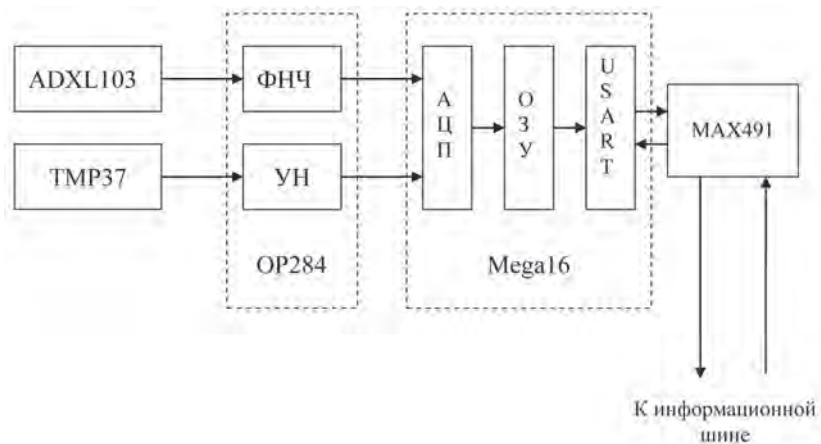


Рис. 5. Структурная схема измерительного датчика

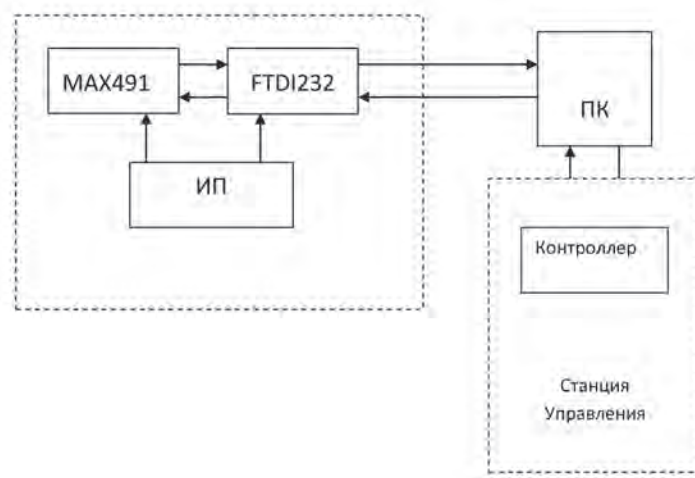


Рис. 6. Структурная схема наземной части системы диагностики

IDEF-технологии. По результатам анализа разработанных IDEF-диаграмм было определено место и роль системы измерения параметров контроля. Сформулированы требования, на основе которых проведен синтез структуры системы диагностики, отвечающей концепции распределенных средств измерения.

#### Список литературы

1. Вендров А.М. CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем [Текст] / А.М. Вендров. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 176 с.
2. Куликов Г.Г. Автоматизированное проектирование информационно-управляющих систем. Системное моделирование предметной области: учебное пособие [Текст] / Г.Г. Куликов, А.Н. Набатов, А.В. Речкалов. – Уфа: УГАТУ, 1998. – 104 с.
3. Черемных С.В. Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии: практикум [Текст] / С.В. Черемных, И.О. Семенов, В.С. Ручкин. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 192 с.
4. Китабов А.Н. Информационно-измеритель-

ная система диагностики погружного электродвигателя [Текст] / А.Н. Китабов, В.П. Токарев // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15. – № 1 (41). – С. 153–164.

#### References

1. Vendrov A.M. CASE-tehnologii. Sovremennyye metody i sredstva proektirovaniya informacionnyh sistem [Tekst] / A.M. Vendrov. – M.: Finansy i statistika, 1998. – 176 s.
2. Kulikov G.G. Avtomatizirovannoe proektirovanie informacionno-upravljajushhih sistem. Sistemnoe modelirovanie predmetnoj oblasti: uchebnoe posobie [Tekst] / G.G. Kulikov, A.N. Nabatov, A.V. Rechkalov. – Ufa: UGATU, 1998. – 104 s.
3. Cheremnyh S.V. Modelirovanie i analiz sistem. IDEF-tehnologii: praktikum [Tekst] / S.V. Cheremnyh, I.O. Semenov, V.S. Ruchkin. – M.: Finansy i statistika, 2005. – 192 s.
4. Kitabov A.N. Informacionno-izmeritel'naja sistema diagnostiki pogrurnogo jelektrodvigatelja [Tekst] / A.N. Kitabov, V.P. Tokarev // Vestnik UGATU. – 2011. – T. 15. – № 1 (41). – S. 153–164.



**Коллегаев Ю.Б.**

**Kolegaev Yu.B.**

*кандидат технических наук, доцент кафедры*

*«Информационно-измерительная техника»*

*ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный*

*авиационный технический университет», Россия, г. Уфа*

УДК 621.398

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТРЕЗКА ДЛИННОЙ ЛИНИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА КОМПОНЕНТОВ МНОГОФАЗНЫХ ВОДОНЕФТЯНЫХ СМЕСЕЙ**

Разработан метод идентификации однородных компонентов многофазной водонефтяной среды с потерями для произвольного расположения слоев в резервуаре. Он заключается в установлении влажности и качественного типа смеси по значению обобщенной диэлектрической проницаемости преобразователя, находящегося в пределах исследуемого однородного слоя. Идентификация компонентов производится последовательно, начиная с верхнего слоя газовой подушки, при переходе от компонента с известной обобщенной диэлектрической проницаемостью преобразователя к последующему слою, в пределах которого обобщенная диэлектрическая проницаемость неизвестна.

Показано, что обобщенная диэлектрическая проницаемость каждого поперечно-неоднородного отрезка измерительного преобразователя характеризуется обобщенной диэлектрической проницаемостью датчика в пределах первого компонента многофазной смеси и коэффициентами отражения электромагнитной волны от границ раздела компонентов, предшествующих исследуемому слою, при движении электромагнитной волны вглубь многофазной среды.

Установлено, что электроды желательнее расположить вертикально на всю высоту резервуара с исследуемой смесью. Это необходимо, во-первых, для обеспечения прихода электромагнитной волны, отраженной от границ раздела компонентов многофазной среды, точно на приемник сигнала, который совмещен с источником сигнала; во-вторых, для предотвращения дополнительных потерь мощности сигнала при его распространении в среде под углом к нормали; и в-третьих, для препятствия осаждения примесей на электродах.

Показано, что реальный путь уменьшения коэффициента затухания состоит в подборе оптимального соотношения геометрических размеров измерительного датчика в виде двухпроводной линии с изоляцией ленточного типа. Исследования оптимальных соотношений параметров датчика проводились при изменении влажности водонефтяной смеси в пределах от 0 до 100 %, в диапазоне опорного сигнала 10–100 МГц. Результаты показали, что в среднем отношение расстояния между жилами провода к диаметру жилы с изоляцией – 1,13, соотношение диаметров жилы с изоляцией и без изоляции – 2,53, отношение расстояния между жилами провода к диаметру жилы – 2,86.

*Ключевые слова:* коэффициент отражения, водонефтяная смесь, эмульсия, обобщенная диэлектрическая проницаемость, коэффициент затухания.

## **THE USE OF A SEGMENT OF A LONG LINE TO DETERMINE THE POSITION OF THE INTERFACES OF THE COMPONENTS OF MULTIPHASE OIL-WATER MIXTURES**

A method for the identification of homogeneous components of multiphase oil-water environment with losses to arbitrary layering in the reservoir is developed. It consists in an establishment of humidity and qualitative type of a mixture on value of the generalized dielectric permeability of the sensor within the homogeneous

layer. Identification of components is performed sequentially, since the top layer of a gas at transition from a component with the known generalized dielectric permeability of the sensor to the layer within which the generalized dielectric permittivity is unknown.

It is shown that the generalized dielectric permeability of each cross-section in a homogeneous segment of the probe is characterized by the generalized dielectric permeability of the sensor within the first component multiphase mixtures and coefficients of reflection of electromagnetic waves from the interfaces between the components previous the investigated layer, at movement of an electromagnetic wave deep into the multiphase environment.

It is established, that electrodes are desirable for locating vertically on all height of the tank with an investigated mixture. It is necessary, first, for maintenance of arrival of the electromagnetic wave reflected from interfaces between components of the multiphase environment, precisely on the receiver of a signal which is combined with a source of a signal; secondly, for prevention of additional losses of capacity of a signal at its propagation in the environment under angle to a normal; and, thirdly, for an obstacle of sedimentation of impurity in electrodes.

It is shown that the real way to reduce the damping coefficient consists in selection of an optimum parity of the geometrical sizes of the measuring sensor in the form of a two-wire line with isolation of tape type. Researches of optimum parities of parameters of the sensor were carried out at variation of humidity of a water-oil mixture within the limits of 0 up to 100 % in a range of a basic signal 10–100 MHz. The results showed that on the average the ratio of distances between conductors wires to the diameter of the conductor with insulation – 1,13, the ratio of diameters of the wires with insulation and without insulation – 2,53, the ratio of the distance between the wires to the diameter of the wire strands – 2,86.

*Key words:* coefficient of reflection, water-oil mixture, emulsion, the generalized dielectric permeability, damping coefficient.

Эффективность работы автоматизированных установок промышленной подготовки и учета сырой нефти зависит от качества проводимого контроля поступающих на них водонефтяных потоков. Это связано с тем, что подлинная стоимость реализуемой сырой нефти напрямую зависит от ее объема, однородности структуры, параметров состава (влажности ( $W$ ), вязкости, минерализации пластовой воды, содержания свободного газа), качественного типа водонефтяной смеси (ВНС) (типа эмульсии). Точная информация об искомых параметрах позволит настроить технологическое оборудование на оптимальные циклы обработки сырой нефти, различающиеся энергозатратами, временем обработки, количеством применяемых реагентов и т. д.

Получить точную информацию о характеристиках смеси можно путем проведения исследований в резервуаре-отстойнике, где происходит разделение многофазной среды на однородные компоненты, в пределах которых параметры смеси остаются постоянными. Применяемые в настоящее время при подготовке и учете нефти средства измерения параметров смеси включают в себя различные датчики, разнесенные друг от друга, что некорректно, т. к. с учетом динамики потока и расслоения многофазной смеси результаты измерений отражают разные состояния ВНС на данный момент времени. С точки зрения эксплуатационных затрат также нерационально

применение отдельных датчиков.

При исследованиях сложных многокомпонентных смесей разработчики измерительной аппаратуры в большинстве случаев исходят из неверного предположения о наличии четкой плоской границы раздела между нефтью и водой, в связи с чем контролируют только трехфазные среды (газ/нефть/вода). Поэтому и возникают, в частности, большие утечки нефти в сливаемую воду из резервуара. В реальности между фазами находится слой так называемой межфазы, т. е. водонефтяной эмульсии (ВНЭ) с переменным по высоте градиентом влажности. Причем в зависимости от содержания воды ВНЭ бывают двух разных качественных типов: эмульсия «вода в нефти» ( $3\% \leq W \leq W_{\text{крит}}$ ) и эмульсия «нефть в воде» ( $W_{\text{крит}} \leq W \leq 97\%$ ), где  $W_{\text{крит}}$  определяет значение влажности, при котором происходит фазовый переход одного типа ВНЭ в другой. Отметим также, что не существует заранее определенного порядка следования компонентов, т. к. в резервуаре периодически происходят слив отстоявшихся нефти и воды, налив новой порции ВНС и расслоение оставшейся ВНЭ.

Для определения положения границ раздела слоев в резервуаре, высоты уровня каждого компонента и, следовательно, объема ВНС в пределах слоя автором предлагается использовать разработанную систему идентификации компонентов многофазной

смеси. Это даст возможность поставлять на технологические установки однородные порции смеси, представляющие собой эмульсии известного типа с постоянным по всему объему значением влажности.

В качестве чувствительного элемента (ЧЭ) измерительного датчика будем использовать двухпроводную линию с изоляцией ленточного типа (рис. 1). При использовании такой конструкции датчика его погонные обобщенные характеристики (емкость, индуктивность и т. д.), а также тангенс угла диэлектрических потерь (ТУДП) и диэлектрическая проницаемость (ДП) пропорциональны как геометрическим размерам и характеристикам изоляции ЧЭ, так и параметрам состава исследуемой смеси, окружающей преобразователь. Изолирующее покрытие обладает ДП, отличной от ДП исследуемой смеси, окружающей двухпроводную линию, в частности, смеси нефти с водой. При внесении ЧЭ в контролируемую среду обобщенная ДП, определяемая с помощью датчика, изменяется, поэтому при расчетах требуется делать поправку на величину ДП изолирующего покрытия ЧЭ.

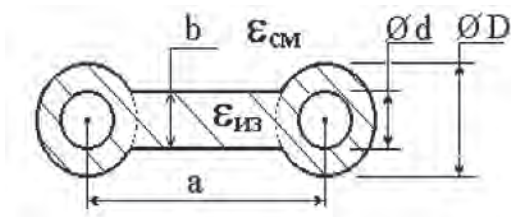


Рис. 1. Двухпроводная линия с изоляцией ленточного типа в диэлектрической среде:

$d$  – диаметр жилы;  $D$  – диаметр жилы с изоляцией;  $a$  – расстояние между жилами;  $b$  – ширина изоляционной прокладки между жилами;  $l$  – длина двухпроводной линии;  $\epsilon_{из}$  – ДП изоляции двухпроводной линии;  $\epsilon_{см}$  – ДП окружающей двухпроводную линию смеси [2]

Датчик устанавливается в верхней части резервуара, причем по возможности как можно дальше от входных и выходных коллекторов. Чувствительный элемент датчика помещается внутри резервуара на всю эффективную длину измерения, проходя через совокупность однородных компонентов многофазной ВНС, на которые разлагается исследуемая жидкость при отстаивании. На концевик ЧЭ подвешивается груз весом до пяти килограммов. При проведении измерений надо учесть, что между концевиком и дном резервуара образуется «мертвая» зона, поэтому длина ЧЭ выбирается так, чтобы это расстояние было минимальным.

Преобразователь можно представить в виде последовательности поперечно-неоднородных отрезков, длина каждого из которых определяет высоту уровня одного из однородных компонентов многофазной среды. Эти компоненты характеризуются постоянной или медленно изменяющейся величиной обобщенной ДП отрезка длинной линии в пределах всего слоя, зависящей как от диэлектрических свойств изоляции, так и исследуемой среды.

Определим обобщенные ДП и ТУДП датчика, учитывая как параметры окружающей его смеси, так и ДП изоляционного слоя по следующей формуле [2, 4]:

$$\begin{cases} \epsilon_{обобщ} = \frac{2\epsilon_{из} \log_m \frac{2a}{d} ((\epsilon_{см} - \epsilon_{из})(1 - k/\pi) + \epsilon_{из})}{\epsilon_{см} - (\epsilon_{см} - \epsilon_{из})(k/\pi + (1 - k/\pi) \log_m n)}, \\ \text{tg}\delta_{обобщ} = \frac{2\text{tg}\delta_{из} \log_m \frac{2a}{d} ((\text{tg}\delta_{см} - \text{tg}\delta_{из})(1 - k/\pi) + \text{tg}\delta_{из})}{\text{tg}\delta_{см} - (\text{tg}\delta_{см} - \text{tg}\delta_{из})(k/\pi + (1 - k/\pi) \log_m n)}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $k = \text{arctg} \frac{6b\sqrt{(a^2 - d^2)}}{3(a^2 - d^2 - b^2) - (D - d)^2}; \quad (2)$

$$m = \frac{(a + \sqrt{(a^2 - d^2)})}{(a - \sqrt{(a^2 - d^2)})}; \quad (3)$$

$$n = \frac{(a + \sqrt{(a^2 - d^2)})^2 - D^2}{D^2 - (a - \sqrt{(a^2 - d^2)})^2}; \quad (4)$$

$\epsilon_{из}, \text{tg}\delta_{из}$  – ДП и ТУДП изоляции соответственно;  $\epsilon_{см}, \text{tg}\delta_{см}$  – ДП и ТУДП водонефтяной смеси соответственно.

Распространение электромагнитных волн в длинных двухпроводных линиях возможно, если расстояние между проводами ( $a$ ) будет значительно меньше длины передаваемой электромагнитной волны. Это требование выполняется при передаче по линии волн с частотой не больше 100 МГц. При увеличении частоты сигнала значительное количество энергии будет излучаться в окружающее пространство. Поэтому в диапазоне частот от сотен мегагерц до десятков гигагерц обычно применяются коаксиальные и экранированные двухпроводные линии. Электромагнитная волна в этом случае рас-



пространяется в пространстве между проводниками линии, не проникая вследствие поверхностного эффекта через внешний проводник во внешнюю исследуемую среду [1].

Согласно известным законам распространения волны через границу раздела сред с разными физическими свойствами падающая и отраженная электромагнитные волны (все они распространяются по нормали к поверхности раздела сред) связаны между собой через коэффициент отражения по напряжению [1]

$$\Gamma = U_{omp} / U_{nad}, \quad (5)$$

где  $\Gamma$  – коэффициент отражения;  $U_{nad}$  – электромагнитная волна, нормально падающая на границу раздела двух сред;  $U_{omp}$  – электромагнитная волна, отраженная от границы раздела двух сред.

Коэффициент отражения опишем через волновые сопротивления  $n$ -й и  $k$ -й сред, через которые проходит электромагнитная волна:

$$\Gamma = \frac{Z_{Bn} - Z_{Bk}}{Z_{Bn} + Z_{Bk}}. \quad (6)$$

Волновое сопротивление в общем случае – это сопротивление, которое встречает электромагнитная волна при распространении вдоль цепи без отражения. Для определения волнового сопротивления двухпроводной линии с изоляцией ленточного типа получим [3]:

$$Z_{\sigma} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{общ}}} \cdot \ln \frac{(a + \sqrt{a^2 - d^2})}{(a - \sqrt{a^2 - d^2})}. \quad (7)$$

Тогда коэффициент отражения сигнала от границ раздела  $n$ -й и  $k$ -й сред с разными волновыми сопротивлениями, используя формулы (6, 7), определим следующим образом

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_{общn}} - \sqrt{\epsilon_{общk}}}{\sqrt{\epsilon_{общn}} + \sqrt{\epsilon_{общk}}}. \quad (8)$$

При достижении  $n$ -й границы раздела компонентов с разными обобщенными ДП сигнал частично отражается от нее в сторону  $k$ -й границы, причем степень отражения зависит от качества отстоя смеси, частично проходит в следующий слой ВНС. Отраженная волна возвращается к входу преобразователя через промежуток времени, пропорциональный высоте уровня смеси в однородном слое. По амплитуде и фазе полученного сигнала, характеризующего соответствующую границу раздела, определяются ее положение и высота уровня слоя ВНС.

В общем случае получим формулу для расчета коэффициента отражения сигнала от  $n$ -й границы раздела сред [3]:

$$\Gamma_n = \frac{U_n(0) - U_{nad} \cdot \sum_{k=0}^{n-1} \prod_{i=0}^k (1 - \Gamma_i^2) \cdot e^{-2 \sum_{i=0}^k \alpha_i l_i}}{U_{nad} \cdot \prod_{i=0}^{n-1} (1 - \Gamma_i^2) \cdot e^{-2 \sum_{i=0}^n \alpha_i l_i}}. \quad (9)$$

где  $\Gamma_i$  – коэффициент отражения сигнала от  $i$ -й границы раздела сред в многокомпонентной смеси;  $U_{nad}$  – исходный опорный высокочастотный сигнал;  $U_n(0)$  – регистрируемый приемником сигнал на входе длинной линии, характеризующий соответствующую границу раздела сред;  $l_i$ ,  $\alpha_i$  – высота уровня однородного слоя и коэффициент затухания сигнала в нем.

Для определения значения обобщенной ДП отрезка длинной линии в пределах произвольного однородного слоя воспользуемся формулой

$$\epsilon_{общn} = \epsilon_{общ1} \frac{\prod_{i=0}^{n-1} (1 - \Gamma_i)^2}{\prod_{i=0}^{n-1} (1 + \Gamma_i)^2}. \quad (10)$$

Таким образом, используя формулу (10) и зная значения  $\Gamma_i$  и  $\epsilon_{общ1}$ , получим значение ДП любой среды, через которую прошел сигнал высокой частоты. Значение  $\epsilon_i$  практически всегда равно единице, так как сигнал сначала проходит через воздушную или газовую прослойку, которая располагается над исследуемой многокомпонентной средой [3].

Для вычисления значения уровня каждого компонента в многофазной среде будем использовать в качестве опорного сигнала не его одночастотную составляющую, а спектр нескольких частот, сдвинутых относительно опорной частоты на  $\Delta f$ ,  $2 \Delta f$ ,  $3 \Delta f$  и т. д., в зависимости от количества гармоник в спектре исходного сигнала. В свою очередь, количество составляющих в спектре опорного сигнала определяется набором параметров ВНС, которые требуется учитывать при идентификации однородных компонентов. В частности, при учете в исследованиях ДП и ТУДП нефти и воды, а также вязкости пластовой нефти достаточно шести гармоник в спектре сигнала [3].

Сигнал, зарегистрированный на приемнике, детектируется и усиливается до уровня, необходимого для дальнейших исследований. Затем пропускаем сигнал через блок фильтров, каждый из которых настроен на блокирование всех частот, кроме одной. В результате получим на выходах блока составляющие сигнала, являющиеся откликами отраженных от границ раздела компонентов электромагнитных волн.

Полученные гармоники подаем попарно на блок вычитающих устройств и после цикла пре-

образований получим обобщенное выражение для определения высоты  $n$ -го уровня контролируемой  $(n + 1)$ -фазной жидкости:

$$l_n = \frac{c}{8\pi\sqrt{\varepsilon_{\text{обобщн}}}\Delta f} \arccos \frac{Z_{n1}}{2Z_{n2}}, \quad (11)$$

где  $Z_{n1}$  и  $Z_{n2}$  – сигналы на выходах оконечных вычитающих устройств;  $c$  – скорость волны в вакууме;  $\Delta f$  – шаг перестройки частоты сигнала.

Из формулы (11) видно, что для определения высоты уровня компонента многофазной среды необходимо, в первую очередь, знать его обобщенную ДП, которую определим по формуле (10).

При распространении электромагнитного сиг-

$$\alpha = \frac{9,2 \cdot 10^{-5} \sqrt{\rho \cdot f \cdot \varepsilon_{\text{об}}}}{d \cdot \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - d^2}}{a - \sqrt{a^2 - d^2}}} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{d}{a} \right)^2 \right] + 9 \cdot 10^{-8} \cdot f \cdot \text{tg} \delta_{\text{об}} \sqrt{\varepsilon_{\text{об}}}, \quad (12)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала жил ЧЭ (Ом · мм<sup>2</sup>/м);  $f$  – частота ВЧ электрического сигнала;  $\varepsilon_{\text{об}}$ ,  $\text{tg} \delta_{\text{об}}$  – обобщенные ДП и ТУДП водонефтяной смеси.

Коэффициент  $\alpha$  значительно уменьшает значение передаваемой по двухпроводной линии мощности, что сокращает полезно используемую длину кабеля. В нашем случае уже при расстоянии от приемного устройства до дна резервуара, большем 100–120 метров, информационный сигнал практически невозможно распознать на фоне шумов.

Рассмотрим пути уменьшения коэффициента затухания. Для этого воспользуемся графиками зависимости коэффициента затухания двухпроводной линии с изоляцией от возможных влияющих факторов (рис. 2). Из графиков видно, что для получения минимального коэффициента затухания сигнала в двухпроводной линии с изоляцией необходимо, во-первых, уменьшить диэлектрические характеристики окружающей датчик ВНС и изоляции, частоту опорного сигнала, удельное электрическое сопротивление материала, из которого изготовлены жилы, и расстояние между проводами. Во-вторых, желательно увеличить диаметр изоляции проводов. И в-третьих, надо определить минимально возможные значения диаметра проводов и толщины изоляционной прослойки между проводами. Рассмотрим все эти возможности более подробно.

Первый возможный путь решения поставленной задачи по минимизации коэффициента затухания состоит в уменьшении сопротивления жил ЧЭ. Для этого можно, во-первых, использовать материал с меньшим удельным сопротивлением, чем у часто используемой меди. Однако меньшим удельным

сопротивлением примерно на десять процентов обладает только серебро, использование которого в качестве материала для проводников экономически невыгодно, поэтому вариант замены меди другим материалом реально в практике не используется.

Во-вторых, для уменьшения сопротивления проводников можно увеличить их диаметр. Но и здесь препятствием становится экономический фактор, т. к. увеличение диаметра жил ведет к перерасходу материала, к увеличению размеров и массы кабеля, а главное – неэффективно, т. к. сопротивление можно уменьшить только в несколько раз.

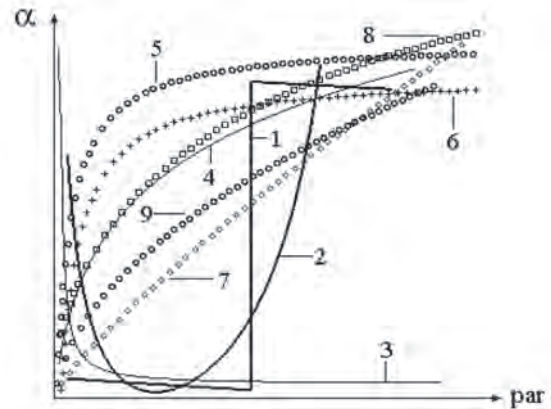


Рис. 2. Зависимость коэффициента затухания двухпроводной линии с изоляцией от одного из следующих параметров: 1 – толщины изоляционной прослойки; 2 – диаметра провода; 3 – диаметра изоляции провода; 4 – расстояния между проводами; 5 – ДП смеси; 6 – ТУДП смеси; 7 – частоты; 8 – ДП изоляции; 9 – удельного электрического сопротивления материала провода

Еще один путь состоит в уменьшении емкости между проводами в двухпроводной линии, или, точнее, обобщенной ДП (1), значение которой учи-

тывается в формуле (12), определяющей значение коэффициента затухания двухпроводной линии с изоляцией ленточного типа.

Рассмотрим возможности уменьшения обобщенной ДП. Во-первых, можно уменьшить ДП рассматриваемой ВНС, окружающей двухпроводную линию. Однако это приведет к сокращению измеряемой базы, ограничивая ее смесями типа «вода в нефти» (В/Н) с пониженным влагосодержанием. При этом смеси, ДП которых стремится к ДП воды, равному 80, совсем выпадают из рассмотрения, что противоречит поставленной задаче. Также нельзя произвольно уменьшать тангенс угла диэлектрических потерь ВНЭ, т. к. тогда из рассмотрения выпадают эмульсии, в которых повышенная проводимость воды, определяемая значительным количеством растворенных в ней минеральных солей.

Во-вторых, можно попытаться изменить свойства изоляционного покрытия двухпроводной линии. Но этот способ тоже недостаточно эффективен, т. к. приведет к увеличению толщины изоляции, что также экономически не выгодно. К тому же в этом случае диэлектрические свойства окружающей преобразователь ВНС не будут значительно влиять на значение обобщенной ДП, которая будет определяться в основном диэлектрическими свойствами изоляционного покрытия. Таким образом, мы получим, по сути, экранированный датчик, свойства которого не зависят от характеристик водонефтяной смеси. К тому же изменение свойств изоляции приведет к увеличению ее проводимости, что способствует ухудшению ее качества, из-за чего возрастут потери, токи утечки. При этом емкость практически уменьшается лишь в несколько раз.

Однако для уменьшения коэффициента затухания подберем изоляционное покрытие таким образом, чтобы в используемом частотном диапазоне (до 100 МГц) его диэлектрические характеристики были минимально возможными и при этом значительно меньше, чем у водонефтяной смеси. В качестве примера такого диэлектрического покрытия можно назвать сополимер тетрафторэтилена с гексафторпропиленом, ДП которого 2,1, ТУДП – 0,0004 [3].

И наконец, в-третьих, можно уменьшить расстояние между проводами. Однако бесконечно уменьшать расстояние невозможно, его предельное значение определяется следующим соотношением

$$a \geq (D^2 + d^2) / 2 \cdot D. \quad (13)$$

При этом одновременно с уменьшением обобщенной ДП, а значит и емкости, будет увеличиваться активное сопротивление, следовательно, общего уменьшения коэффициента затухания наблюдаться

практически не будет. Таким образом, подытоживая все вышесказанное, можно сказать, что реальный путь уменьшения коэффициента затухания состоит в подборе оптимального соотношения размеров двухпроводной линии с изоляцией, т. е. диаметров жил и изоляции, расстояния между жилами и ширины изоляционной прокладки между жилами. При рассмотрении зависимости коэффициента затухания от параметров двухпроводной линии (рис. 3) отметим, что минимум функции  $\alpha$  достигается:

- 1) при максимально возможном значении диаметра изоляции провода  $D$ ;
- 2) при минимально возможном значении расстояния между проводами  $a$ ;
- 3) при некоторых оптимальных значениях диаметра проводов  $d$  и ширины изоляционной прокладки  $b$ .

Таким образом, необходимо подобрать такое оптимальное соотношение  $b/d$  при фиксированных  $D$  и  $a$ , причем должно выполняться условие  $D < a$ , при которых коэффициент затухания будет минимальным. Из графика на рис. 4 видно, что коэффициент затухания тем меньше, чем меньше соотношение  $a/D$  и чем больше соотношение  $D/b$ . Пересечение двух кривых происходит в точке А с координатами [1,07, 0,02], т. е. в точке, где  $D = 1,07b$  и  $a = 1,07D$ . Видно, что полученные соотношения удовлетворяют необходимым условиям конструктивной реализации датчика ( $D < a$  и  $b < D$ ).

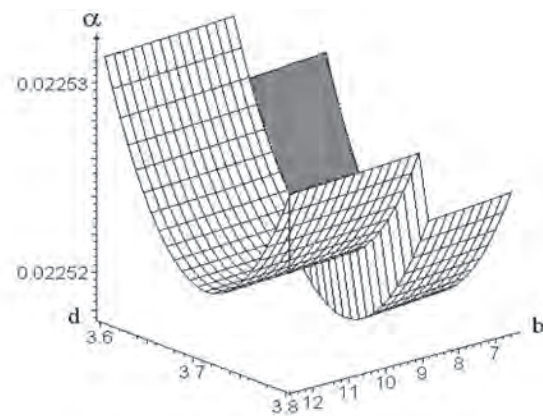


Рис. 3. Зависимость коэффициента затухания электромагнитного сигнала от диаметра жил и ширины изоляционной прокладки

Однако, чем больше соотношение  $a/D$ , тем меньше погрешность в определении емкости между проводами, а следовательно, и коэффициента затухания двухпроводной линии. Поэтому лучший вариант реализации датчика для конкретного случая будет достигаться при минимально возможном соотношении  $D/b$ , которое примерно равно единице,

т. е. диаметр изоляции проводов должен быть равен ширине изоляционной прокладки. Соответствующее ему соотношение  $a/D$ , которое, в свою очередь, является максимально возможным, при одном и том же значении коэффициента  $\alpha$ , составляет примерно 1,12 [3].

Исследования оптимальных соотношений параметров датчика, обеспечивающих минимальное значение коэффициента затухания, проводились при изменении влажности ВНЭ от 0 до 100 %, т. е. при переходе от нефти к воде в частотном диапазоне опорного сигнала 10–100 МГц. Результаты показали, что соотношения параметров двухпроводной линии меняются следующим образом:  $a/D$  от 1,115 до 1,1516,  $D/d$  от 3,1096 до 1,9598,  $a/d$  от 3,4712 до 2,257. Таким образом, оптимальные средние соотношения параметров двухпроводной линии с изоляцией ленточного типа, используемой в качестве измерительного датчика неизвестной водонефтяной смеси, будут следующие:  $a/D = 1,13$ ,  $D/d = 2,53$ ,  $a/d = 2,86$  (все результаты приведены для случая, когда  $D = b$ ).

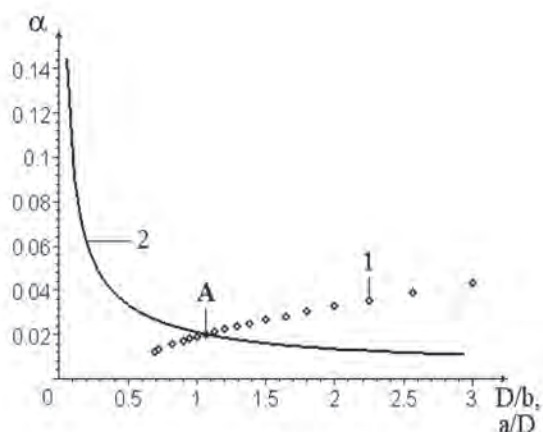


Рис. 4. Зависимость коэффициента затухания от следующих соотношений: 1 – расстояния между проводами к диаметру изоляции проводов ( $a/D$ ); 2 – диаметра изоляции проводов к ширине изоляционной прокладки ( $D/b$ )

Таким образом, из полученных соотношений видно, что изоляционное покрытие желательно сделать больше диаметра электрода. Это позволяет создать дополнительную емкость, последовательно включенную с емкостью преобразователя. Такое включение уменьшает разброс между коэффициентами затухания электромагнитного сигнала в пределах исследуемой смеси при изменении ее ДП. Для препятствия осаждения примесей также желательно установить электроды вертикально.

#### Выводы

1. Показано, что измерительный преобразо-

ватель, погруженный в многофазную среду, целесообразно представить в виде последовательности поперечно-неоднородных отрезков длиной двухпроводной линии. При этом длина каждого отрезка определяет высоту уровня одного из компонентов этой среды.

2. Показано, что обобщенная диэлектрическая проницаемость каждого поперечно-неоднородного отрезка длиной двухпроводной линии, определяющая свойства одного из компонентов многофазной среды, характеризуется:

- обобщенной диэлектрической проницаемостью датчика в пределах первого компонента многофазной смеси;

- коэффициентами отражения электромагнитной волны от границ раздела компонентов, предшествующих исследуемому слою, при движении электромагнитной волны вглубь многофазной среды.

3. Проведен сравнительный анализ возможных путей уменьшения коэффициента затухания сигнала. Показано, что реальный путь уменьшения коэффициента затухания состоит в подборе оптимального соотношения размеров двухпроводной линии с изоляцией ленточного типа.

#### Список литературы

1. Викторов В.А. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов [Текст] / В.А. Викторов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков. – М.: Энергоиздат, 1989. – 280 с.

2. Иоссель Ю.Я. Расчет электрической емкости [Текст] / Ю.Я. Иоссель, Э.С. Коганов. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 288 с.

3. Коллегаев Ю.Б. Идентификация однородных компонентов многофазных водонефтяных смесей при построении ИИС для процессов промышленной подготовки и учета нефти: дис. канд. техн. наук. [Текст] / Ю.Б. Коллегаев. – Уфа, 2003.

4. Коллегаев Ю.Б. Идентификация многокомпонентных водонефтяных смесей в процессе промышленной подготовки и учета нефти [Текст] / Ю.Б. Коллегаев, В.Х. Ясовеев // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. – 2006. – Т. 8. – № 2 (18). – С. 19–23.

#### References

1. Viktorov V.A. Radiovolnovye izmerenija parametrov tehnologicheskikh processov [Tekst] / V.A. Viktorov, B.V. Lunkin, A.S. Sovlukov. – M.: Jenergoizdat, 1989. – 280 s.

2. Iossel' Ju.Ja. Raschet jelektricheskoj emkosti [Tekst] / Ju.Ja. Iossel', Je.S. Koganov. – L.: Jenergoizdat, 1981. – 288 s.

3. Kolegaev Ju.B. Identifikacija odnorodnyh komponentov mnogofaznyh vodoneftjanyh smesej pri postroenii IIS dlja processov promyslovoj podgotovki i ucheta nefiti: dis. kand. tehn. nauk [Tekst] / Ju.B. Kolegaev. – Ufa. – 2003.

4. Kolegaev Ju.B. Identifikacija mnogokompo-

nentnyh vodoneftjanyh smesej v processe promyslovoj podgotovki i ucheta nefiti [Tekst] / Ju.B. Kolegaev, V.H. Jasoveev // Vestnik UGATU: nauch. zhurn. Ufinsk. gos. aviac. tehn. un-ta. – 2006. – T. 8. – № 2 (18). – S. 19–23.



**Артюшенко В.М.**  
**Artuschenko V.M.**

*доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и управляющие системы» ГБОУ ВПО МО «Финансово-технологическая академия», Россия, г. Королев*



**Самаров К.Л.**  
**Samarov K.L.**

*доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика и естественно-научные дисциплины» ГБОУ ВПО МО «Финансово-технологическая академия», Россия, г. Королев*

УДК 621.391.372.019

## **КОНСТРУИРОВАНИЕ ДВУХМЕРНЫХ КОРРЕЛИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ АДДИТИВНЫХ И МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫХ НЕГАУССОВСКИХ ПОМЕХ**

В статье рассмотрены и проанализированы математические модели мультипликативных и аддитивных негауссовских помех, воздействующих на полезные сигналы. Для синтеза и анализа, а следовательно, эффективного проектирования информационных радиотехнических систем и устройств, работающих в условиях интенсивных возмущений, необходимо выбрать не только адекватные математические модели полезных сигналов и информационных процессов, но и соответствующие модели случайных воздействий, имеющих, в общем случае, негауссовский мультипликативный и аддитивный характер.

Для описания произвольных негауссовских помех, являющихся квазигармоническими процессами, спектр которых близкий (или более узкополосный) к полосе полезного сигнала, авторы использовали эллиптические симметричные двухмерные плотности распределения вероятности (ПРВ), включающие в себя два предельных случая: гауссовские процессы и синусоидальный сигнал со случайной начальной фазой, распределенной равномерно в интервале  $[0, 2\pi]$ .

Модель узкополосных коррелированных негауссовских помех эллиптически симметричной двухмерной ПРВ позволяет произвести синтез информационных систем и устройств, основываясь только на априорном знании одномерной ПРВ и функции корреляции. Поскольку, зная одномерную ПРВ мгновенных значений, можно определить ПРВ огибающей, то это делает возможным использование эллиптически симметричных ПРВ для описания не только аддитивных, но и мультипликативных (модулирующих) помех.

Для описания реальной ПРВ негауссовского процесса авторы предлагают аппроксимировать ее априорно известной одномерной ПРВ и специальным образом сконструированной переходной ПРВ и показывают адекватность этой аппроксимации реальным двухмерным ПРВ коррелированных помех.

*Ключевые слова:* информационный процесс, адекватные математические модели, аддитивная поме-

ха, мультипликативная помеха, плотность распределения вероятности, негауссовские процессы.

## THE CONSTRUCTION OF THE CORRELATED TWO-DIMENSIONAL MODELS FOR THE ADDITIVE AND FOR THE MULTIPLICATIVE NON-GAUSSIAN INTERFERENCES

The mathematical models for the multiplicative and for the additive non-gaussian hindrances influencing on useful signals are considered and analyzed in this article. In order to synthesize and to analyze and, therefore, to design the effective information radio engineering systems and the devices working in the conditions of intensive disturbances, it is necessary to choose not only adequate mathematical models of useful signals and information processes, but also appropriate mathematics models of the random influences having, in general, non-Gaussian multiplicative and additive character.

For the description of any non-gaussian hindrances being quasi harmonic processes with spectrum which is close (or more narrow-band) to the strip of a useful signal, the authors use the elliptic symmetric two-dimensional probability density function (PDF) including two limit cases: gaussian processes and sinusoidal signal with the random initial phase iniformly distributed on  $[0, 2\pi]$ .

The model of the narrow-band correlated non-gaussian hindrances with elliptic symmetric two-dimensional PDF allows to make synthesis of information systems and devices, based only on a priori knowledge of one-dimensional PDF and correlation function. Because the knowledge of the one-dimensional PDF of instant values allows to find the PDF of the envelope line, so it is possible to use the elliptic symmetric PDF for the description not only of the additive hindrances, but also of the multiplicative (modulating) hindrances.

In order to the describe the real PDF of non-gaussian process authors suppose to approximate the real PDF by means of the a priori known one-dimensional PDF and the transitional PDF which is constructed in a special way and show approximation adequacy of the real two-dimensional PDF correlated disturbances.

*Key words:* information process, adequate economic-mathematical model, additive interference, the multiplicative interference, the probability density function, non-gaussian processes.

Для синтеза и анализа, а следовательно, для эффективного проектирования радиотехнических систем и устройств, работающих в условиях интенсивных возмущений, необходимо выбрать не только адекватные математические модели полезных сигналов и информационных процессов  $\lambda(t)$ , но и случайных воздействий, имеющих, в общем случае, мультипликативный  $\eta(t)$  и аддитивный  $n(t)$  характер [1–3].

Как правило, возмущения (помехи), действующие на радиотехнические системы и устройства, являются случайными процессами с негауссовской плотностью распределения вероятности (ПРВ) (стационарными и нестационарными) [4, 5]. Наиболее полным описанием случайных процессов (последовательностей) является метод многомерных ПРВ. Известно несколько методов описания и моделирования случайных процессов с многомерной ПРВ. Одним из таких методов является метод смешивания случайных процессов [5], основанный на представлении ПРВ случайной последовательности  $\{\lambda_h, h = \overline{1, H}\}$  суммой взвешенных ПРВ:

$$W(\lambda_1, \dots, \lambda_H) = \sum_{i=1}^N p_i W_i(\lambda_1, \dots, \lambda_H),$$

где  $p_i$  – случайные весовые коэффициенты, причем

$\sum_{i=1}^N p_i = 1$ ;  $W_i(\lambda_1, \dots, \lambda_H)$  – заданные  $H$ -мерные распределения.

Элементы последовательности  $\{\lambda_h, h = \overline{1, H}\}$  интерпретируются как отсчеты, полученные дискретизацией соответствующего процесса  $\lambda(t)$  в момент времени  $t_h$ , причем, как правило,  $t_h - t_{h-1} = T_o = const$ . Наибольшее распространение получил случай, когда в качестве  $W_i(\lambda_1, \dots, \lambda_H)$  используются  $H$ -мерные нормальные распределения.

Большие возможности для получения многомерных ПРВ открывают марковские процессы, позволяющие с требуемой точностью аппроксимировать случайный процесс. В представленной статье мы будем рассматривать непрерывнозначные марковские процессы.

Как известно, распространенной формой описания марковских случайных процессов служат системы статистических дифференциальных уравнений, а также формирующие фильтры.

Отметим, что в случае негауссовских процессов дифференциальные уравнения являются нелинейными вида:

$$X(t) = f[(d/dx)\ln W(x)] + \beta n_o(t),$$

где  $f[(d/dx)\ln W(x)]$  определяет ПРВ процесса  $W(x)$ ;

$\beta$  – константа;  $n_o(t)$  – белый негауссовский шум.

Сложность формирования и необходимость задания большого количества априорной информации, которую часто трудно получить на практике (особенно для негауссовских ПРВ), порой вынуждают отказываться от полного вероятностного описания случайных процессов в пользу упрощенного. Наиболее доступной информацией о любом случайном процессе является одномерная ПРВ и корреляционная функция. В этих условиях для описания реальных информационных процессов и помех широко используются марковские модели. Их высокая эффективность широко известна из работ марковской теории нелинейной фильтрации [6].

Для описания произвольных негауссовских помех, являющихся квазигармоническими процессами, спектр которых близкий (или более узкополосный) с полосой полезного сигнала, могут быть использованы эллиптические симметричные (ЭС) двумерные ПРВ, включающие в себя два предельных случая: гауссовские процессы и синусоидальный сигнал со случайной начальной фазой, распределенной равномерно в интервале  $[0, 2\pi]$  [7, 8].

Эллиптически-симметричные двумерные ПРВ  $W_2(n_p, n_2)$  стационарного процесса  $n(t)$  зависят от  $n_1$  и  $n_2$  ( $n_1 = n(t)$ ,  $n_2 = n(t + \tau)$ ) только в комбинации  $l = [n_1^2 + n_2^2 - 2r(\tau)n_1n_2]^{0.5}$ , где  $r(\tau) = B_n(\tau)/B_n(0)$  – коэффициент корреляции величин  $n_1$  и  $n_2$ , представляет собой форму эллипсов.

Следовательно, можно записать, что

$$W_2(n_p, n_2) = Cf(R), \quad (1)$$

где  $C$  – нормировочная постоянная;  $R = l(1 - r^2)^{0.5}$ ;

$$f(R) = [2\pi(1 - r^2)]^{-1} \int_0^\infty \Theta(v) J_0(Rv) v dv \quad (2)$$

– функция, являющаяся преобразованием Бесселя нулевого порядка одномерной характеристической функции  $\Theta(v)$  рассматриваемого случайного процесса.

Как видно из соотношений (1), (2),  $W_2(n_p, n_2)$  полностью определяется одномерной ПРВ  $W_1(n)$ , связанной преобразованием Фурье с характеристической функцией  $\Theta(v)$  и коэффициентом корреляции  $r(\tau)$  рассматриваемого процесса. При этом одномерная ПРВ и соответствующая ей характеристическая функция являются четными функциями.

Однако необходимо отметить, что для конструирования ЭС-распределения (1) могут быть использованы лишь такие четные функции  $W_1(n)$ , которые приводят к неотрицательной и интегрируемой функции  $W_2(n_p, n_2)$ .

В этом случае выполнение неравенства  $\int_0^R Rf(R) dR < \infty$  является необходимым и достаточным условием существования ЭС двумерного распределения, определяемого с помощью  $W_1(n)$  и  $r(\tau)$  [8].

$$\text{Функция } W(R) = 2\pi C(1 - r^2)^{0.5} Rf(R) \quad (3)$$

при описании узкополосного случайного процесса совпадает с ПРВ огибающей (амплитудой  $U$ ) этого процесса. Следовательно, выражение (3) можно записать в виде:

$$W(U) = 2\pi C(1 - r^2)^{0.5} Rf(U).$$

Это является особенностью ЭС-распределений, вытекающей из их определения [8]. Так как для помех с полосовым спектром плотность вероятности распределения амплитуды (ПРВА) является достаточно вероятной характеристикой, то можно утверждать, что ЭС-модель скорректированного негауссовского процесса однозначно определяет такие помехи.

В [8, 9] представлены основные характеристики случайных процессов, двумерные распределения которых обладают эллиптической симметрией.

Заметим, что при сложении произвольных ЭС-процессов с одинаковыми коэффициентами корреляции получаемый процесс является также ЭС-процессом.

Так, при сложении синусоиды со случайной начальной фазой, равномерно распределенной в интервале  $[0, 2\pi]$ , и узкополосной гауссовской помехи (при одинаковых коэффициентах корреляции) с учетом соотношений (1), (2) получаем ЭС-процесс, ПРВА которого подчиняется закону Райса:

$$W_2(n_p, n_2) = [2\pi(1 - r^2)^{0.5} \sigma^2]^{-1} \exp\{(U^2 + R^2)(2\sigma^{-1})\} I_0(UR\sigma^{-1}), \quad (4)$$

где  $U$  – амплитуда синусоидальной компоненты;  $\sigma^2$  – дисперсия помехи;  $r(\tau) = \cos\omega_0\tau$ .

К ПРВ, описываемой (4), можно прийти, используя соотношение (2) и выражение характеристической функции для суммарного процесса:

$$\Theta_1(v) = J_0(Uv) \exp\{-0.5\sigma^{-2}v^2\}. \quad (5)$$

Проинтегрировав (2), получим (4).

Заметим, что в случае произвольной корреляции  $r(\tau) = r_0(\tau)\cos\omega_0\tau$ , где  $r_0(\tau)$  – медленно спадающая функция, описываемая выражением (5), может и не быть ЭС. В этом случае двумерная ПРВ (4) может рассматриваться в качестве ЭС-модели при условии  $\tau \ll \tau_{кор}$ , где  $\tau_{кор}$  – интервал корреляции описываемого процесса, определяемый по огибающей  $r(\tau)$  [8].

Рассмотрим в качестве примера случай, когда мгновенные значения аддитивной помехи описываются обобщенным гауссовым распределением:

$$W(n) = [v\gamma(\sigma_n, v)/2\Gamma(v^{-1})] \exp\{-[\gamma(\sigma_n, v)|n]^v\},$$

где  $\gamma(\sigma_n, v) = \sigma_n^{-1}[\Gamma(3/v)/\Gamma(1/v)]^{0.5}$ .

Считая, что в совпадающие моменты времени выборки квадратурных составляющих некоррелированы, получим:

$$W_2(n_p, n_2) = [v\gamma_0^2(\sigma_n, v)/2\pi\Gamma(2/v)] \exp\{-[\gamma_0(\sigma_n, v)(n_1^2 + n_2^2)^{0.5}]^v\},$$

$$\text{где } \gamma_0(\sigma_n, v) = \sigma_n^{-1}[\Gamma(4/v)/2\Gamma(2/v)]^{0.5}; -\infty < n_p; n_2 < \infty.$$

При этом ПРВА помехи:

$$W(U) = [\nu\gamma_0(\sigma_n, \nu)U/2\Gamma(2/\nu)]\exp\{-[\gamma_0(\sigma_n, \nu)U]^\nu\};$$

$$0 \leq U < \infty.$$

Если узкополосный случайный процесс является стационарным, то ПРВА  $W(U)$  и ПРВ его мгновенных значений связаны между собой соотношением [9]:

$$W(U) = U \int_0^\infty \nu \Theta_n(\nu) J_0(U) d\nu, \quad (6)$$

где  $\Theta_n(\nu) = \int_{-\infty}^\infty W(n) \exp\{j\nu n\} dn$  – характеристическая функция процесса  $n(t) = U(t)\cos\Phi(t)$ ;  $U(t)$  и  $\Phi(t)$  – соответственно огибающая и полная фаза случайного процесса.

Сделав необходимые преобразования с (6), получаем:

$$W(n) = \pi^{-1} \int_{|n|}^\infty W(U) (U^2 - n^2)^{-0.5} dU.$$

Таким образом, описание узкополосных коррелированных негауссовских помех эллиптически симметричной двухмерной ПРВ позволяет произвести синтез систем и устройств, основываясь на априорном знании одномерной ПРВ и функции корреляции. Зная одномерную ПРВ мгновенных значений  $W(n)$ , можно определить ПРВ огибающей  $W(Un)$ , что делает возможным использование эллиптически симметричных ПРВ для описания мультипликативных (модулирующих) помех.

Наряду с приведенными выше методами описания коррелированных негауссовских процессов рассмотрим следующее.

Реальную ПРВ негауссовского процесса предлагается аппроксимировать априорно известной одномерной ПРВ  $W(n_{h-l})$  и специальным образом

сконструированной переходной ПРВ  $W^A(n_h|n_{h-l})$ . В результате ПРВ негауссовского процесса будет описываться как

$$W^A(n_h, n_{h-l}) = W(n_h)W^A(n_h|n_{h-l}). \quad (7)$$

В качестве переходной будем использовать ПРВ следующего вида:

$$W^A(n_h|n_{h-l}) = (2\pi G^2)^{-0.5} \exp\{-[n_h - M(n_{h-l})]^2/2G^2\}, \quad (8)$$

где  $G^2$  характеризует интенсивность случайного процесса  $\{n_h\}$ ;

$M(n_{h-l}) = n_{h-l} - 0.5G^2 \frac{d}{dn_{h-l}} \ln W(n_{h-l})$  – функция специального вида.

Заметим, что в случае, когда процесс  $\{n_h\}$  описывается гауссовской ПРВ  $W(n_{h-l}) = N(0, \sigma^2)$ , уравнение (8) преобразуется в виде:

$$W^A(n_h|n_{h-l}) = (2\pi G^2)^{-0.5} \exp\{-(n_h - rn_{h-l})^2/2G^2\}. \quad (9)$$

Положив  $G^2 = \sigma^2(1 - r^2)$ , приходим к известному выражению для гауссовской условной ПРВ.

Представление двухмерной ПРВ в виде (9) в дальнейшем будет использоваться в задачах синтеза, поэтому необходимо обосновать адекватность вводимой аппроксимации.

В качестве критерия будем использовать информационный критерий:

$$\min I_K(W, W^A); n_h, n_{h-l} \in \Pi, \quad (10)$$

где  $I_K$  – информация по Кульбаку, характеризующая оценку средней информации, содержащейся в области  $\Pi$  изменений компонент  $n_h$  и  $n_{h-l}$ , случайного коррелированного процесса при различении гипотез

$$H_0: W(n_h|n_{h-l}) \text{ и } H_1: W^A(n_h|n_{h-l}).$$

Возможны два способа оценки информации по Кульбаку:

$$I_{12K}(W, W^A) = \iint_{-\infty}^\infty W(n_h, n_{h-l}) \ln \frac{W(n_h, n_{h-l})}{W^A(n_h, n_{h-l})} dn_h dn_{h-l}; \quad (11)$$

$$I_{21K}(W, W^A) = \iint_{-\infty}^\infty W^A(n_h, n_{h-l}) \ln \frac{W^A(n_h, n_{h-l})}{W(n_h, n_{h-l})} dn_h dn_{h-l}. \quad (12)$$

Критерий (10) и соотношения (11) и (12) будем использовать на этапе тестирования при проверке справедливости описания ПРВ негауссовских процессов соотношениями (7) и (8).

Рассмотрим несколько примеров негауссовских процессов, для которых  $W(n_h, n_{h-l})$  известна, а затем

обратимся к описанию негауссовских коррелированных процессов, для которых известны лишь одномерные ПРВ.

В качестве тестирующих ПРВ введем распределение вида:

$$W(n_h) = \frac{\nu}{\Gamma(\nu-1)\sigma} \left[ \frac{\Gamma(3/\nu)}{\Gamma(\nu-1)} \right] \exp\left\{-\left[ \frac{\Gamma(3/\nu)}{\Gamma(\nu-1)} \right]^{\nu/2} \left[ \frac{|n_h|^\nu}{\sigma^\nu} \right]\right\}, \nu \geq 0.5; \quad (13)$$

$$W(n_h|n_{h-l}) = \frac{\nu}{2\Gamma(\nu-1)\sigma} \left[ \frac{\Gamma(3/\nu)}{(1-r^2)\Gamma(\nu-1)} \right]^{0.5} \exp\left\{-\left[ \frac{\Gamma(3/\nu)}{(1-r^2)\Gamma(\nu-1)} \right]^{\nu/2} \left[ \frac{|n_h - rn_{h-l}|^\nu}{\sigma^\nu} \right]\right\}, \quad (14)$$



где  $\Gamma(\cdot)$  – гамма-функция.

Заметим, что как частные случаи, из (13) и (14) следуют гауссовское распределение (9) и ПРВ Лапласа, соответственно при  $\nu = 2$  и  $\nu = 1$ .

Следуя методике, изложенной выше, в качестве

$$Z_A(n_{h-1}) = -\frac{d}{dn_{h-1}} \ln W(n_{h-1}) = \frac{\nu}{20,5\nu\sigma^\nu} |n_{h-1}|^{\nu-1} \text{sgn}(n_{h-1}). \quad (15)$$

На рис. 1 показаны изолинии соответствующих поверхностей, характеризующие корреляционные свойства двумерных ПРВ.

Рассмотрим пример конструирования двумерных ПРВ негауссовского процесса в соответствии с изложенной методикой, если известна лишь истинная одномерная ПРВ  $W(n_{h-1})$  вида (13).

В соответствии с (8) определим переходную ПРВ. Следуя (15), запишем функцию  $M(n_{h-1})$ :

$$W^A(n_h|n_{h-1}) = [2\pi\sigma^2(1-r_\nu)]^{-0,5} \exp\left\{-\frac{[n_h - n_{h-1} + 0,5\sigma^2(1-r_\nu)z_\nu(n_{h-1})]^2}{\sigma^2(1-r_\nu)}\right\}, \quad (16)$$

где  $z_\nu(n_{h-1}) = \frac{\nu}{20,5\nu\sigma^\nu} |n_{h-1}|^{\nu-1} \text{sgn}(n_{h-1})$ .

Результаты моделирования двумерных негауссовских ПРВ в соответствии с соотношениями

переходной аппроксимирующей  $W^A(n_h|n_{h-1})$  для ПРВ рассмотренного вида будем иметь:

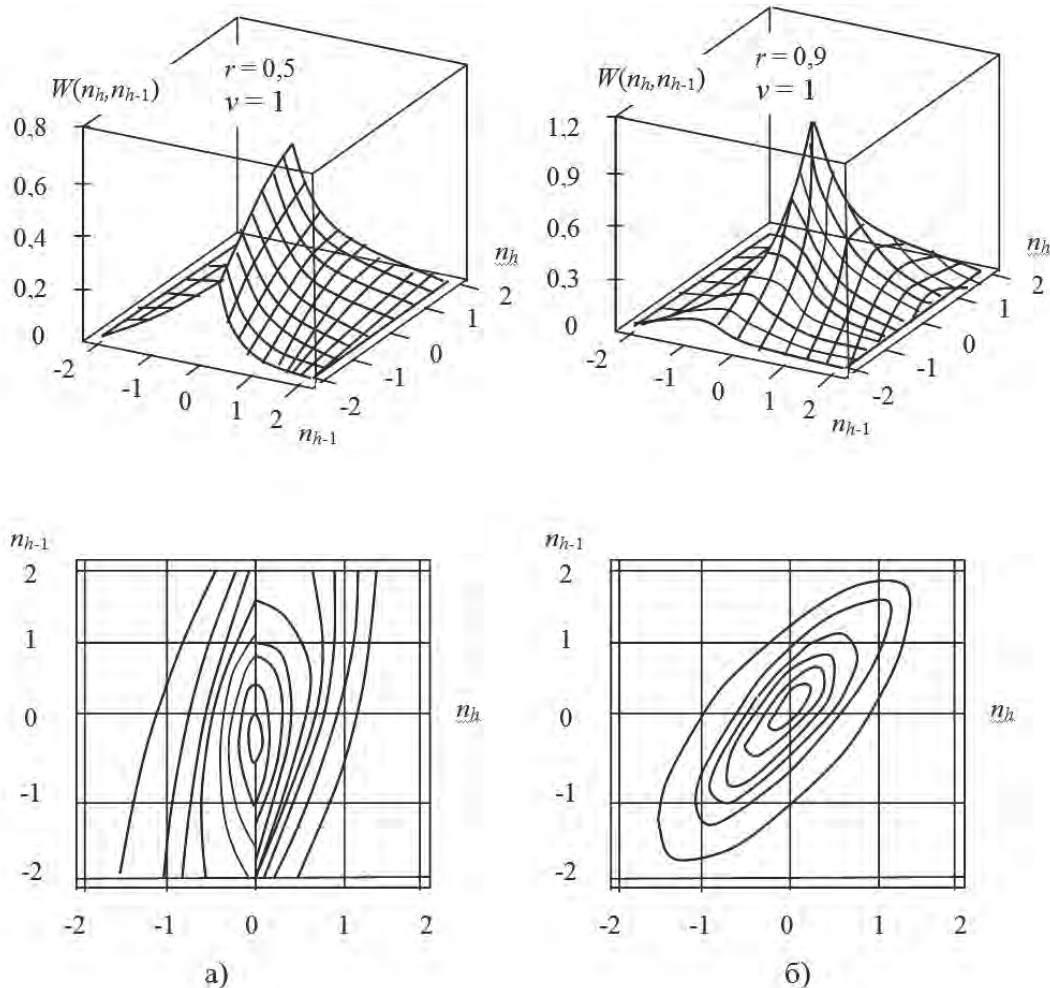
$$W^A(n_h|n_{h-1}) = (2\pi G^2)^{-0,5} \exp\left\{-\frac{[n_h - M(n_{h-1})]^2}{G^2}\right\},$$

где  $M(n_{h-1}) = n_{h-1} - 0,5G^2 Z_A(n_{h-1})$ ;

$$\begin{aligned} M(n_{h-1}) &= n_{h-1} - 0,5G^2 \frac{d}{dn_{h-1}} \left\{ -\frac{[\Gamma(3/\nu)]^{\nu/2}}{[\Gamma(\nu-1)]^{\nu/2}} \frac{[|n_{h-1}|^\nu]}{\sigma^\nu} \right\} = \\ &= n_{h-1} - 0,5G^2 \frac{\nu}{20,5\nu\sigma^\nu} |n_{h-1}|^{\nu-1} \text{sgn}(n_{h-1}). \end{aligned}$$

Вводя для удобства вычислений понятие эквивалентного коэффициента корреляции  $r_\nu$ , определяемого из соотношения  $G^2/\sigma^2 = 1 - r_\nu$ , окончательно запишем выражение переходной ПРВ:

(7), (16) и (13) для различных коэффициентов корреляции  $r_\nu$  и  $\nu$  представлены на рис. 2.



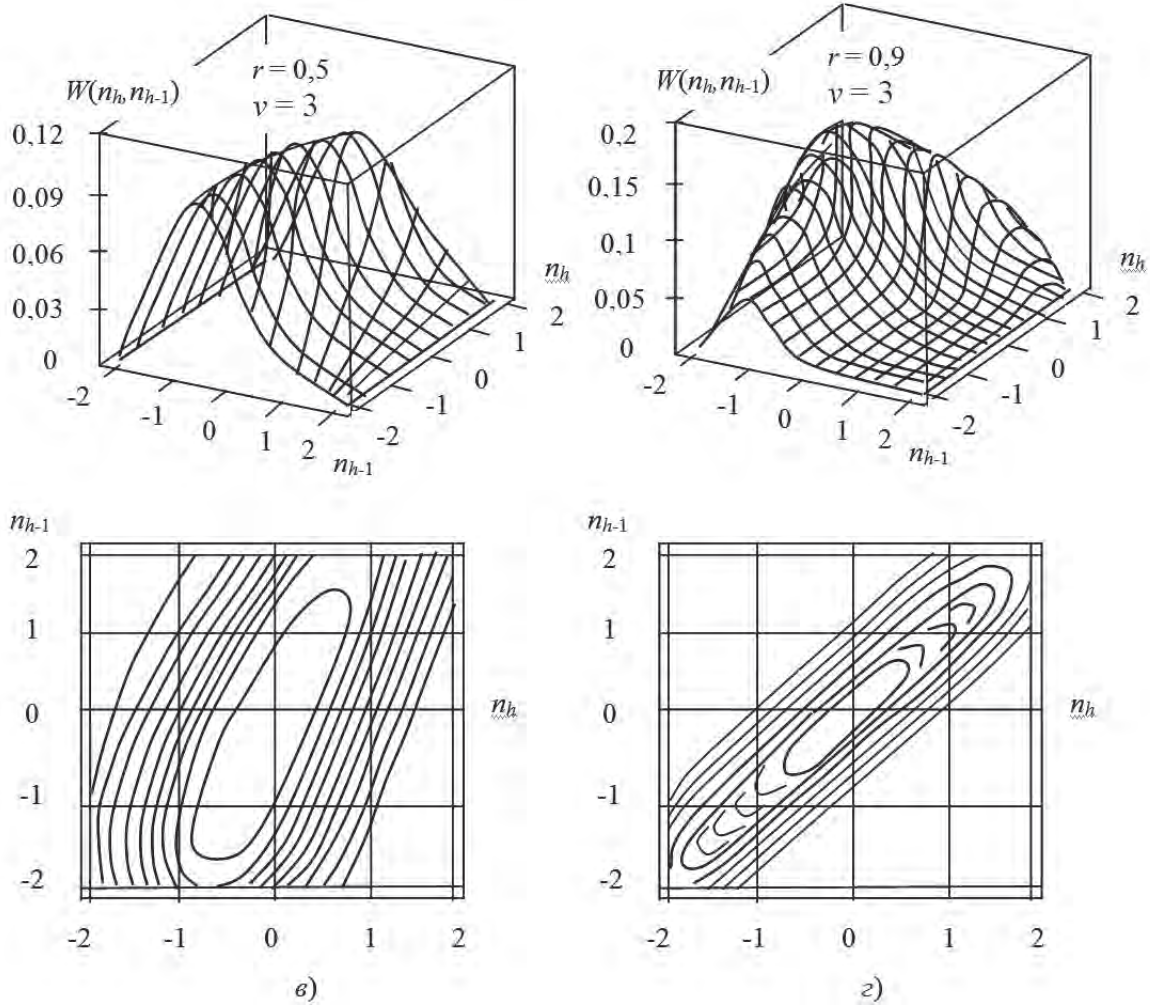
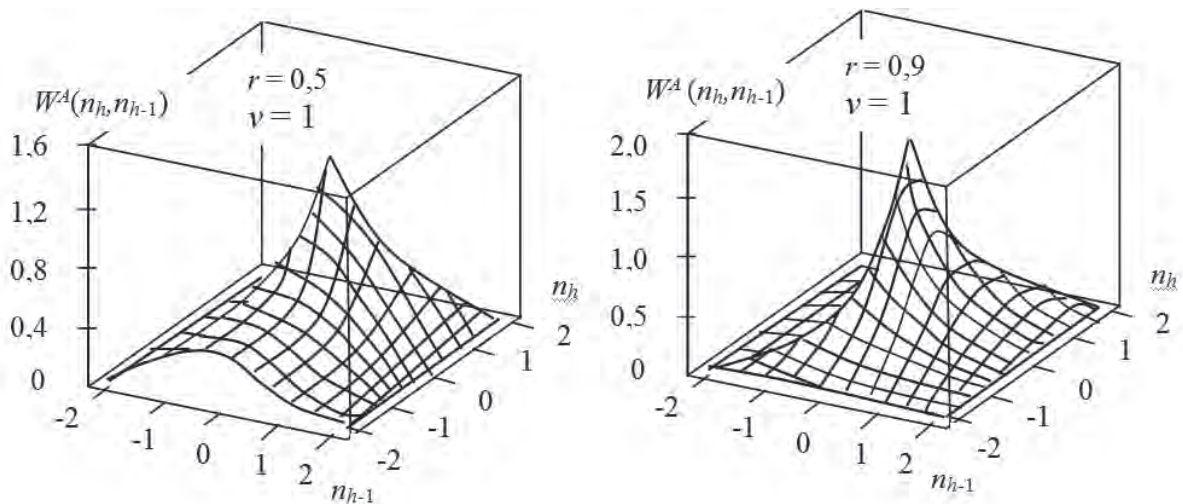


Рис. 1. Зависимости тестирующих двумерных ПРВ и изолинии их поверхностей при:  
 $a - r=0,5, v=1$ ;  $б - r=0,9, v=1$ ;  $в - r=0,5, v=3$ ;  $з - r=0,9, v=3$



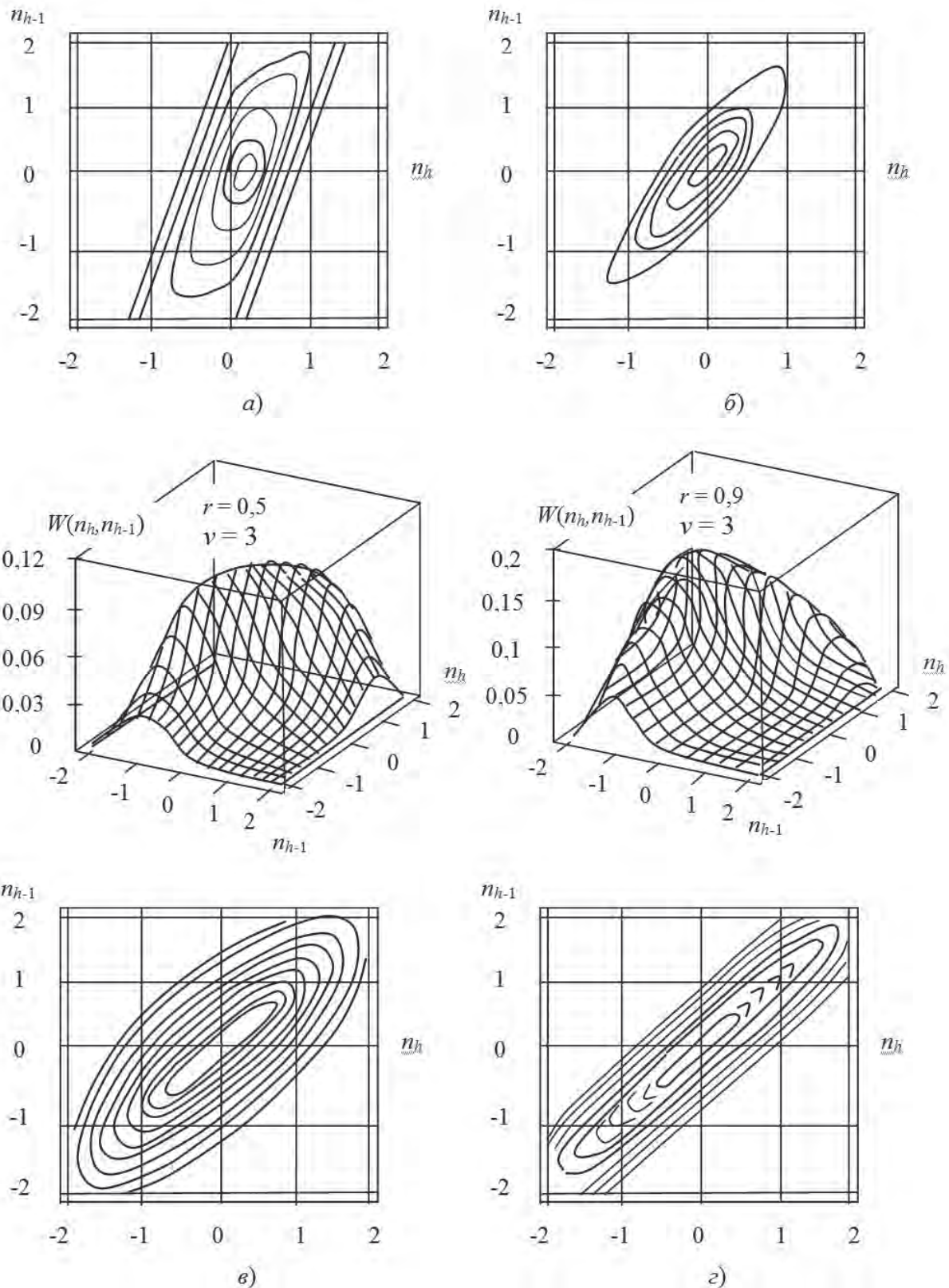


Рис. 2. Результаты моделирования двумерных негауссовских ППВ и изолинии их поверхностей при:  
 $a - r=0,5, v=1$ ;  $б - r=0,9, v=1$ ;  $е - r=0,5, v=3$ ;  $з - r=0,9, v=3$

Визуальное сравнение результатов аппроксимации на рис. 2 с аналогичными характеристиками точных двухмерных ПРВ, представленных на рис. 1, показывает их достаточную схожесть.

Как видно из рис. 2, при больших коэффициентах корреляции аппроксимирующая  $W^A(n_h, n_{h-1})$  и истинная  $W(n_h, n_{h-1})$  ПРВ приближаются друг к другу. Однако для точного выявления степени подобия этих распределений воспользуемся количественной оценкой меры подобия ПРВ (10), (11), (12). Ограни-

чимся частным случаем ПРВ (14) – ПРВ Лапласа, имеющей место при  $\nu = 1$  (рис. 1).

Графики зависимостей  $I_{12K}$  и  $I_{21K}$  представлены на рис. 3а и 4а соответственно. На рис. 3б и 4б показаны линии равного уровня изображенных поверхностей. Наиболее информативной поверхностью, как видно из рис. 3, 4, является поверхность  $I_{21K}(n_h, n_{h-1})$ , которая иллюстрирует, что по мере увеличения  $r$  и  $r_3$  возрастает степень близости ПРВ.

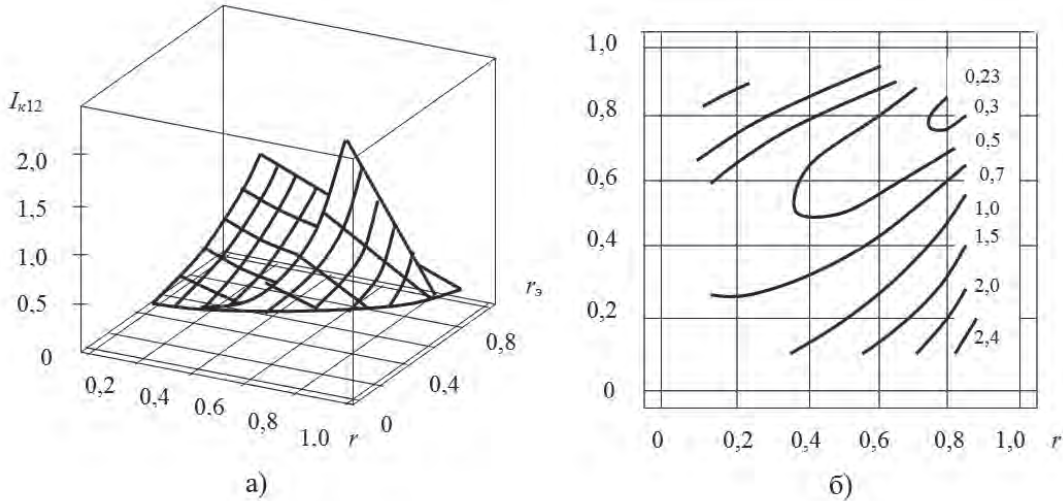


Рис. 3. Зависимости  $I_{12K} = f(r, r_3)$  и изолинии их поверхностей

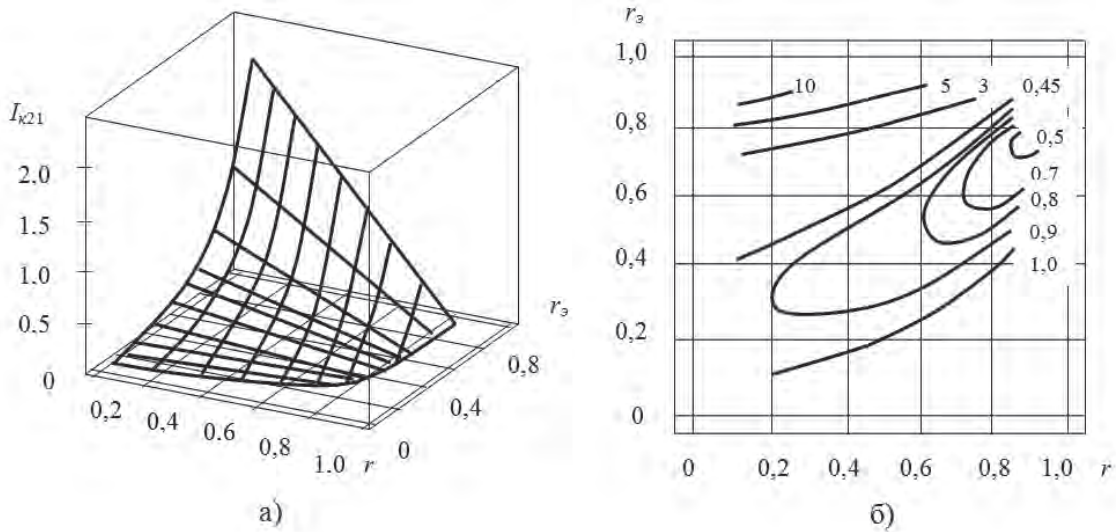


Рис. 4. Зависимости  $I_{21K} = f(r, r_3)$  и изолинии их поверхностей

Наряду с информацией по Кульбаку широкое прикладное значение, особенно в задачах статистического синтеза оптимальных алгоритмов обработки, получила информация по Фишеру, содержащаяся в случайном процессе с ПРВ:

$$W(n): I_\phi = \left\{ m \left[ \frac{d \ln W(n)}{dn} \right]^2 \right\} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{d \ln W(n)}{dn} \right] W(n) dn.$$

Можно показать, что в случае одномерных ПРВ имеет место тождество:

$$m \left\{ \frac{d^2 \ln W(n)}{dn^2} \right\} = - m \left\{ \left[ \frac{d \ln W(n)}{dn} \right]^2 \right\}.$$

Выражения  $I_\phi$  для некоторых распределений представлены в табл. 1.

Фишеровская информация  $I_\Phi$  и динформация  $I_D$

ПРВ $W(n)$	Информация по Фишеру $I_\Phi$	Динформация по Фишеру $I_D$
$N(0, 1)$ $(2\pi)^{-0.5} \exp\{- n \}$	1	3
$L(0, 1)$ $0,5 \exp\{-n^2/2\}$	1	2
$C(0, 1)$ $\pi^{-1}(1+n^2)^{-1}$	0,5	1,5
$Lo(0, 1)$ $\exp\{-n\}(1+\exp\{-n\})^2$	$1/3 \approx 0,33$	$(\pi^2 + 12)/9 \approx 2,43$
$Se(0, 1)$ $0,5 \operatorname{sech}^2 n$	$4/3 \approx 1,33$	$(\pi^2 + 12)/9 \approx 2,43$

В случае если случайный процесс задан двухмерной  $W(n_1, n_2)$  или условной  $W(n_1|n_2)$  ПРВ по аналогии с  $I_\Phi$ , вводится понятие информационной матрицы Фишера  $I_\Phi$  с элементами:

$$I_{\Phi,ij} = m \left\{ \frac{d \ln W(n_1|n_2)}{dn_i} \frac{d \ln W(n_1|n_2)}{dn_j} \right\} = \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{d^2 \ln W(n_1|n_2)}{dn_i dn_j} \ln W(n_1, n_2) dn_1 dn_2 ; i, j = 1, 2.$$

$$\|I_{\Phi,r}\| = \begin{vmatrix} I_{\Phi,11} & I_{\Phi,12} \\ I_{\Phi,21} & I_{\Phi,22} \end{vmatrix} = [\sigma_n^2(1 - r_n^2)]^{-1} \begin{vmatrix} 1 & -r_n \\ -r_n & r_n^2 \end{vmatrix},$$

где  $\sigma_n^2$  – дисперсия, а  $r_n$  – коэффициент корреляции случайного процесса  $n(t)$ .

Из сравнения члена  $I_{\Phi,11}$  и  $I_\Phi$  для ПРВ с независимыми значениями следует, что множитель в правой части  $I_{\Phi,11}$  при  $r_n = 0$  совпадает с  $I_\Phi$  для гауссовской ПРВ. Поскольку  $0 \leq r_n^2 < 1$ , то ясно, что наличие конечной корреляции между значениями  $n(t)$  приводит к увеличению информации по Фишеру по сравнению со случаем одномерных ПРВ. В общем случае определение информационных матриц для негауссовских корреляционных процессов наталкивается на значительные трудности и, как прави-

Предполагается, что матрица  $\|I_\Phi\|$  положительной определенной, то есть  $\det I_\Phi \neq 0$ .

В частном случае гауссовского случайного процесса  $n(t)$ , заданного переходным распределением, информационная матрица Фишера приобретает вид:

ло, не может быть получено аналитически.

Лишь в отдельных случаях решение удается получить аналитически. Так, например, для ПРВ (14) информационная матрица принимает вид:

$$\|I_\Phi\| = \frac{\nu(\nu-1)\Gamma(3/\nu)\Gamma(1-\nu^{-1})}{\sigma_n^2 \Gamma^2(1/\nu)(1-r_n^2)} \begin{vmatrix} 1 & -r_n \\ -r_n & r_n^2 \end{vmatrix} = A(\nu)I_{\Phi,r},$$

где  $A(\nu) = \frac{\nu(\nu-1)\Gamma(3/\nu)\Gamma(1-\nu^{-1})}{\Gamma^2(1/\nu)}$ ;  $\nu \geq 2$  – константа, зависящая от параметра распределения.

Зависимости элементов матрицы  $I_{\Phi,ij}$  от параметров распределения приведены на рис. 5.

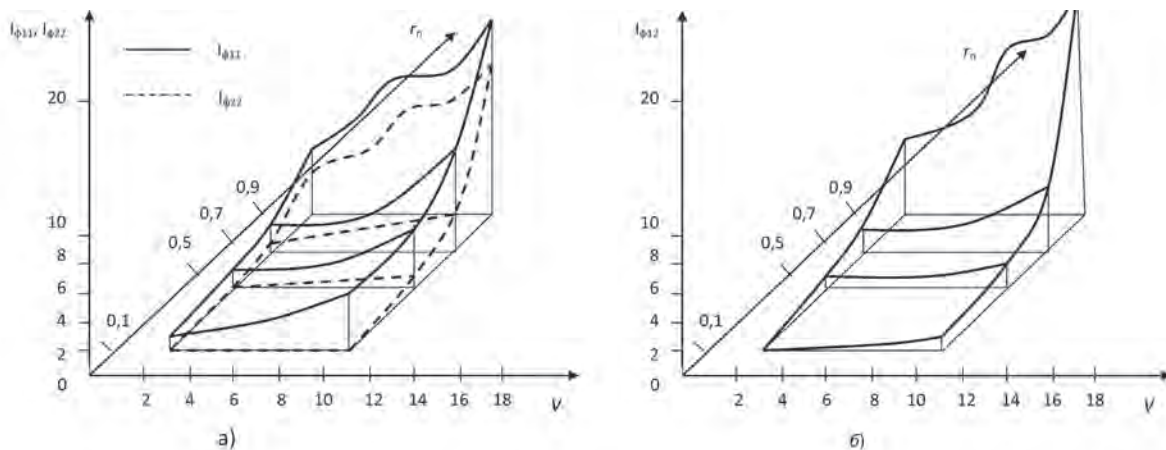


Рис. 5. Зависимость элементов матрицы  $I_{\Phi,ij}$  от параметров распределения: а –  $I_{\Phi,11}$ ,  $I_{\Phi,22}$ ; б –  $I_{\Phi,12}$

Аналогично квазишеноновской информации вводится понятие квазифишеровской информации:

$$\int_{-\infty}^{\infty} W_0(n) \left( \frac{W'(n)}{W(n)} \right)^2 dn = \int_{-\infty}^{\infty} W_0(n) \left( \frac{d \ln W(n)}{dn} \right)^2 dn =$$

$$= m \left\{ \left( \frac{W'(n)}{W(n)} \right)^2 \right\} = I_{\Phi}(W, W_0).$$

Величина  $I_{\Phi}(W, W_0)$  используется, в частности, для оценки эффективности алгоритмов асимптотически оптимального приема.

Наряду с введенными понятиями Фишеровской информации при оценке характеристик односторонних ПРВ, характерных, например, для описания случайных амплитуд узкополосных радиосигналов, используется Фишеровская дисперсионная информация (динформация) [8, 9]:

$$I_{\Phi,D}(W) = m \left\{ n^2 \left( \frac{W'(n)}{W(n)} \right)^2 \right\} = \int_{-\infty}^{\infty} n^2 \left( \frac{d \ln W(n)}{dn} \right)^2 dn.$$

Отметим, что для одной и той же ПРВ выполняется неравенство:

$$I_{\Phi,D}(W) > I_{\Phi}(W).$$

Выражения  $I_{\Phi,D}$  для некоторых распределений представлены в табл. 1.

Таким образом, рассмотрены и проанализированы математические модели мультипликативных и аддитивных негауссовских помех, воздействующих на полезные сигналы. Для проведения синтеза радиотехнических систем и устройств введены эллиптические симметричные ПРВ, позволяющие описывать не только узкополосные коррелированные аддитивные помехи, но и помехи, имеющие мультипликативный (модулирующий) характер.

Предложена переходная ПРВ, позволяющая конструировать двухмерные ПРВ коррелированных негауссовских помех. Показана адекватность сконструированных с ее помощью ПРВ реальным двухмерным ПРВ воздействующих коррелированных помех.

Введены информационные характеристики негауссовских аддитивных и мультипликативных помех.

#### Список литературы

1. *Артюшенко В.М.* Проектирование мульти-сервисных систем в условиях воздействия внешних электромагнитных помех: монография [Текст] / В.М. Артюшенко, Т.С. Аббасова; под науч. ред. В.М. Артюшенко. – М.: РГУТиС, 2011. – 110 с.
2. *Артюшенко В.М.* Исследование и разработка радиолокационного измерителя параметров движения протяженных объектов: монография [Текст] / В.М. Артюшенко. – М.: ФТА, 2013. – 110 с.
3. *Артюшенко В.М.* Анализ беспроводных технологий обмена данными в системах автоматизации

жизнеобеспечения производственных и офисных помещений [Текст] / В.М. Артюшенко, В.А. Корчагин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2010. – № 2. – Т. 6. – С. 18–24.

4. *Артюшенко В.М.* Оценка влияния электромагнитных помех радиоэлектронных средств на беспроводные устройства малого радиуса действия [Текст] / В.М. Артюшенко, В.А. Корчагин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2010. – № 2. – Т. 6. – С. 10–17.

5. *Трофимов А.Т.* Оценивание мешающих параметров для адаптивной обработки сигналов на основе использования полигауссовской модели помех [Текст] / А.Т. Трофимов // Радиотехника и электроника. – 1986. – Т. 31. – № 11. – С. 2151–2159.

6. *Тихонов В.И.* Марковские процессы [Текст] / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. – М.: Сов. радио, 1977. – 488 с.

7. *McGraw D.K.* Elliptically Symmetric Distributions [Text] / D.K. McGraw, J.F. Wagner // IEEE Transactions on Information Theory. – 1968. – № 14. – P. 76–84.

8. *Артюшенко В.М.* Эллиптически симметричные модели негауссовских помех [Текст] / В.М. Артюшенко, В.И. Соленов. – Киев: КИИГА, 1993. – С. 24–27.

9. *Цыпкин Я.З.* Основы информационной теории идентификации [Текст] / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1984. – 320 с.

#### References

1. *Artjushenko V.M.* Proektirovanie mult'iservisnyh sistem v uslovijah vozdeystvija vneshnih jelektromagnitnyh pomех: monografija [Tekst] / V.M. Artjushenko, T.S. Abbasova; pod nauch. red. V.M. Artjushenko. – M.: RGUTiS, 2011. – 110 s.
2. *Artjushenko V.M.* Issledovanie i razrabotka radiolokacionnogo izmeritelja parametrov dvizhenija protjazhennyh ob'ektov: monografija [Tekst] / V.M. Artjushenko. – M.: FTA, 2013. – 110 s.
3. *Artjushenko V.M.* Analiz besprovodnyh tehnologij obmena dannymi v sistemah avtomatizacii zhizneobespechenija proizvodstvennyh i ofisnyh pomeshhenij [Tekst] / V.M. Artjushenko, V.A. Korchagin // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2010. – № 2. – Т. 6. – S. 18–24.
4. *Artjushenko V.M.* Ocenka vlijanija jelektromagnitnyh pomех radiojelektronnyh sredstv na besprovodnye ustrojstva malogo radiusa dejstvija [Tekst] / V.M. Artjushenko, V.A. Korchagin // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2010. – № 2. – Т. 6. – S. 10–17.
5. *Trofimov A.T.* Ocenivanie meshajushih

parametrov dlja adaptivnoj obrabotki signalov na osnove ispol'zovanija poligaussovskoj modeli pomех [Tekst] / A.T. Trofimov // Radiotekhnika i jelektronika. – 1986. – T. 31. – № 11. – S. 2151–2159.

6. *Tihonov V.I.* Markovskie processy [Tekst] / V.I. Tihonov, M.A. Mironov. – M.: Sov. radio, 1977. – 488 s.

7. *McGraw D.K.* Elliptically Symmetric Distributions [Text] / D.K. McGraw, J.F. Wagner // IEEE Transactions

on Information Theory. – 1968. – № 14. – P. 76–84.

8. *Artjushenko V.M.* Jellipticheski simmetrichnye modeli negaussovskih pomех [Tekst] / V.M. Artjushenko, V.I. Solenov. – Kiev: KIIGA, 1993. – S. 24–27.

9. *Cypkin Ja.Z.* Osnovy informacionnoj teorii identifikacii [Tekst] / Ja.Z. Cypkin. – M.: Nauka, 1984. – 320 s.



**Берг О.И.**  
**Berg O.I.**

аспирант кафедры  
«Информационно-измерительная  
техника» ФГБОУ ВПО «Уфим-  
ский государственный авиацион-  
ный технический университет»,  
Россия, г. Уфа



**Ураксеев М.А.**  
**Urakseev M.A.**

доктор технических наук, про-  
фессор кафедры «Информационно-  
измерительная техника»  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государ-  
ственный авиационный техниче-  
ский университет», Россия, г. Уфа



**Баженов И.А.**  
**Bazhenov I.A.**

кандидат технических наук,  
доцент ФГАОУ ВПО «Уральский  
федеральный университет име-  
ни первого Президента России  
Б.Н. Ельцина», Россия,  
г. Екатеринбург

УДК 681.51.011

## РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С МАГНИТНЫМИ МЕТКАМИ

В статье исследован преобразователь на магнитооптическом методе сбора информации о перемещении подвижного носителя магнитных меток. Приведена структурная схема преобразователя, пояснен принцип действия входящих в него функциональных блоков. В качестве чувствительного элемента в нем используется оптически прозрачная феррит-гранатовая пленка. Вычислительный блок в таком преобразователе представлен микроконтроллером, позволяющим изменять пределы точности и скорости обработки информации в зависимости от конкретно поставленной задачи, а также осуществлять передачу информационных сигналов во внешние устройства обработки и отображения информации. Предложенный метод построения преобразователя перемещений является оригинальным. Авторами выявлен основной параметр, определяющий чувствительность к перемещению преобразователя, – величина фототока. Показано влияние на нее напряженности магнитного поля, создаваемого магнитной меткой. Получена достоверная математическая модель, позволяющая оценить степень влияния параметров магнитооптической системы. Проведен анализ математической модели при корректно принятых допущениях для идеального случая минимального влияния внешних факторов на статическую характеристику преобразователя. Указанный анализ позволяет получить наилучшую чувствительность величины фототока к перемещению, оценить физические ограничения, а также области значений параметров основных функциональных блоков из состава преобразователя. Получены следующие выводы: определен наилучший угол между осями поляризатора и анализатора; определены ограничения минимальной длины волны записи периодического сигнала магнитных меток; определено оптимальное значение длины активного взаимодействия (ширина феррит-гранатовой пленки); показана степень влияния постоянной

Верде феррит-гранатовой пленки и намагниченности на поверхности подвижного носителя магнитных меток на исследуемую величину фототока. В статье также показан способ повышения точности преобразователя при ограниченном значении длины волны записи периодического сигнала магнитных меток. Указанный способ позволяет определять величину перемещения не только в соответствии с координатой нанесения магнитной метки (координатой минимальных и максимальных значений фототока), но и в промежутках между ними.

*Ключевые слова:* преобразователи перемещений, технические характеристики, математическая модель, магнитные метки, магнитооптический эффект Фарадея.

## TERISTICS OF DISPLACEMENT TRANSDUCER WITH MAGNETIC MARKS

The displacement transducer with magneto-optical method of collecting information about the movement of magnetic marks carriers is studied in this article. The article shows a block diagram of transducer, explained operating principle of function blocks contained in it. Transducer use optically transparent ferrite-garnet film as a sensitive element. Computer unit in this transducer contains a microcontroller which allows to change the limits of accuracy and processing speed depending on the specific task, and also to transfer information signals to an external processing device and display information. The suggested method for constructing displacement transducer is original. Authors detected the main parameter that determines sensitivity of the displacement transducer – a value of photocurrent. Shows the dependence of the magnetic field generated by a magnetic mark on the photocurrent. Reliable mathematical model allows to assess the impact of magneto-optical system parameters is obtain. Analysis of the mathematical model with the correct assumptions made for ideal case the minimal impact of external factors on the transducer static characteristic is held. This analysis shown how to get the best sensitivity of the photocurrent by move, assess physical limitations, as well as the parameters range of main functional blocks of the transducer. The following conclusions is obtain: determine the best angle between the polarizer and analyzer axes; determine the minimum wavelength of the recording periodic magnetic marks signal; determine the optimum of the active interaction length (the ferrite-garnet film width); shows impact of the constant Verde ferrite-garnet film and the magnetic marks carriers surface magnetization on the analyzed photocurrent. The article also shows how to increase transducer accuracy at magnetic marks periodic signal minimum wavelength. This method allows to determine displacement amount not only in accordance with the magnetic marks coordinate (coordinate of the minimum and maximum photocurrent), but also between them.

*Key words:* displacement transducer, technical characteristics, mathematical model, magnetic marks, magneto-optical Faraday effect.

Усложнение процессов производства, повышение точности контролирующих и исполнительных узлов, а также уменьшение времени обработки информации являются основными задачами для разработчиков измерительных устройств и систем контроля. Управление объектами со сложными динамично изменяющимися характеристиками в режиме реального времени требует использования распределенных компьютерных вычислений и обработки информации. При создании распределенных систем применяется технология распараллеливания интеллектуальных методов вычислений, обработки и управления. Интеллектом наделяются не только промышленные компьютеры и контроллеры, но и датчики исполнительных устройств. Непрерывное снижение стоимости и размеров микропроцессорных элементов, а также рост их функциональных возможностей расширяют возможности встраивания этих чипов во все меньшие изделия. Благодаря изменению элементной базы

стало возможным появление первичных преобразователей, способных перерабатывать информацию, – поколения интеллектуальных датчиков.

В рамках научно-исследовательской работы авторами разработан преобразователь (рис. 1) на магнитооптическом методе сбора информации о перемещении подвижного носителя магнитных меток [1]. Вычисление величины перемещения и последующая передача информации внешним контролирующим устройствам осуществляется микроконтроллером, входящим в состав преобразователя.

### *Принцип действия преобразователя перемещений с магнитными метками*

Работа разрабатываемого преобразователя перемещений (ПП) (рис. 1) заключается в следующем. При перемещении подвижного носителя магнитных меток в виде кодовой шкалы  $l$  происходит изменение величины магнитного потока  $\Phi$ , создаваемого меткой и показанного на рисунке пунктир-



ными линиями. Этот магнитный поток замыкается через оптически прозрачную феррит-гранатовую пленку (ФГП), через которую проходит поляризо-

ванный (после поляризатора 3) луч лазерного диода источника оптического излучения 5.

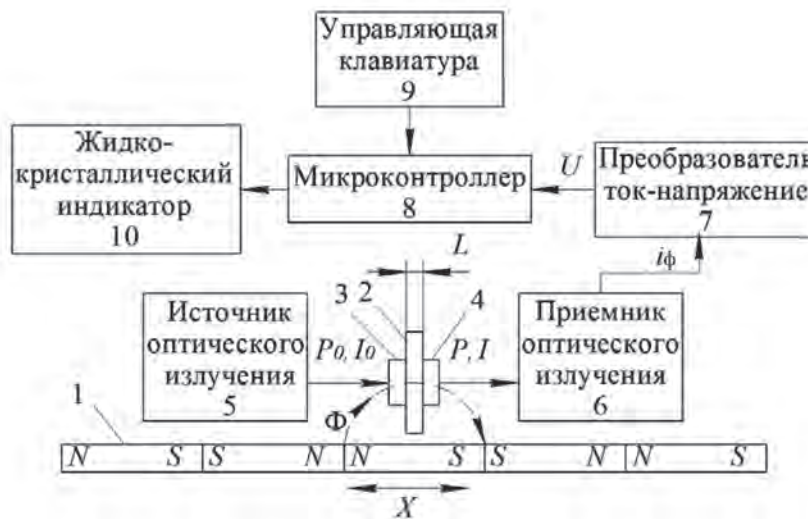


Рис. 1. Преобразователь перемещений с магнитными метками: 1 – подвижный носитель магнитных меток в виде кодовой шкалы; 2 – ФГП; 3 – поляризатор; 4 – анализатор

Луч света падает на поверхность поляризатора нормально. В отсутствие внешнего магнитного поля происходит преобразование мощности  $P_0$  светового луча лазерного диода в мощность  $P$  на выходе фотодиода [1]:

$$P = P_0 \cos^2(\alpha), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол между осями поляризатора и анализатора.

При воздействии внешнего магнитного поля плоскость поляризации линейно поляризованного света в ФГП дополнительно поворачивается [2] на угол  $\beta = \varphi L \cos \Theta$ , где  $\varphi = VH$  – удельное фарадеевское вращение;  $V$  – постоянная Верде, характеризующая чувствительность пленки ФГП;  $H$  – напряженность магнитного поля, создаваемого магнитной меткой;  $L$  – активная длина взаимодействия, равная толщине пленки;  $\Theta$  – угол отклонения намагниченности пленки от перпендикуляра к ее поверхности. Тогда формула (1) примет вид

$$P = c P_0 e^{-bL} (\cos^2(\alpha + \frac{M}{M_s} VHL \cos \Theta) + p), \quad (2)$$

где  $b$  – коэффициент поглощения материала;  $p$  – коэффициент, учитывающий наличие конечного пропускания света в системе «поляризатор – ФГП – анализатор»;  $c$  – учитывает потери на излучение в системе;  $M$  – магнитный момент единицы объема образца;  $M_s$  – намагниченность насыщения.

В приемнике оптического излучения 6 происходит преобразование светового луча мощностью  $P$  в фототок:

$$i_\phi = S \cdot P, \quad (3)$$

где  $S$  – чувствительность.

В преобразователе ток – напряжение 7 происходит преобразование напряжения  $U_1 = i_\phi R$  в напряжение  $U_2 = U_1 K_y$ , где  $R$  – сопротивление на входе усилителя;  $K_y$  – коэффициент усиления усилителя.

В аналого-цифровом преобразователе микроконтроллера 8 напряжение  $U_2$  преобразуется в цифровой код, и вычисляется величина перемещения кодовой шкалы путем подсчета изменений поляриностей магнитных меток (грубое и быстрое вычисление) и изменения напряженности магнитного поля магнитных меток конца и начала движения (точное и медленное вычисление). Информация с микроконтроллера передается во внешние устройства обработки информации и отображается жидкокристаллическим индикатором 10.

С помощью управляющей клавиатуры 9 происходит управление работой ПП: включение и выключение, просмотр записанной информации об измеренных значениях перемещений в определенные моменты времени, передача этой информации на подвижный носитель информации.

Таким образом, основным параметром, определяющим точность разрабатываемого ПП, является фототок  $i_\phi$  приемника оптического излучения. Для построения математической модели ПП необходимо знать напряженность магнитного поля  $H$ , создаваемую магнитной меткой.

*Расчет поля, создаваемого магнитной меткой*

В измерительном ПП на подвижный носитель магнитных меток должен быть нанесен периодически-

ский сигнал. Для анализа выбран синусоидальный тип сигнала с синусоидальным распределением поверхностной индукции и внешнего магнитного потока вдоль носителя.

Если обозначить (рис. 2) через  $\alpha$  угол в каждой точке внешнего поля между направлением  $y$  и век-

тором  $\vec{B}$  в этой точке, то составляющие индукции внешнего поля можно представить как

$$\begin{aligned} B_x &= B \sin(\alpha); \\ B_y &= B \cos(\alpha), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $B$  – модуль индукции в каждой точке поля метки.

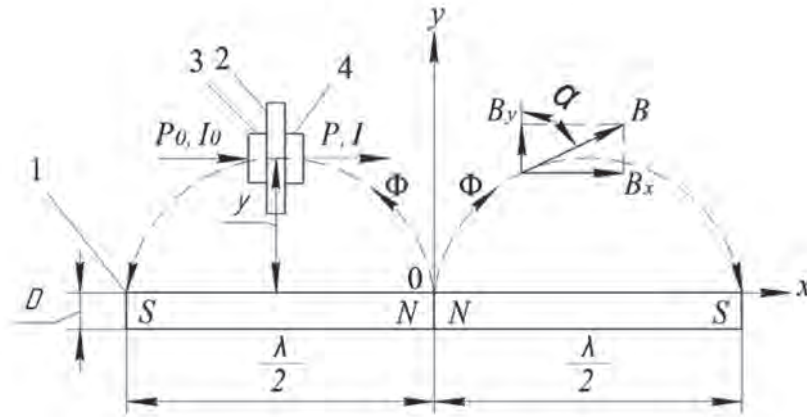


Рис. 2. Распределение индукции над носителем магнитных меток: 1 – подвижный носитель магнитных меток; 2 – ФГП; 3 – поляризатор; 4 – анализатор

Для магнитного поля в окружающем носитель внешнем пространстве справедливо

$$\text{div} \vec{B} = 0; \quad \text{rot} \vec{B} = 0. \quad (5)$$

Записывая уравнение (5) в частных производных и подставляя в них значения составляющих индукции, получим

$$\frac{dB}{dy} + B \frac{d\alpha}{dx} = 0; \quad \frac{dB}{dx} - B \frac{d\alpha}{dy} = 0. \quad (6)$$

Силовые линии магнитных меток синусоидального сигнала, выходя из одного полюса, симметрично расходятся в противоположные стороны. Для них справедливы следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0 \text{ при } x = 0; \\ \alpha &= \frac{\pi}{2} \text{ при } x = \frac{\lambda}{4}; \\ B &= B_{ym} \text{ при } y = 0; \\ B &= 0 \text{ при } y = \infty, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $B_{ym}$  – амплитуда поверхностной индукции на рабочей стороне носителя;  $\lambda$  – длина волны записи синусоидального сигнала.

Решая дифференциальные уравнения (6) при условии (4) и (7), получим:

$$\begin{aligned} B_x &= B_{ym} e^{-\frac{2\pi y}{\lambda}} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right), \\ B_y &= B_{ym} e^{-\frac{2\pi y}{\lambda}} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

Значение  $\delta B_{ym}$  (рис. 3а) для очень тонкого носителя толщиной  $\delta y$  [3]:

$$\delta B_{ym} = \frac{\pi \delta y}{\lambda} \mu \mu_0 M_m, \quad (9)$$

где  $\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость вакуума;  $\mu$  – магнитная проницаемость носителя магнитных меток;  $M_m$  – намагниченность на поверхности носителя.

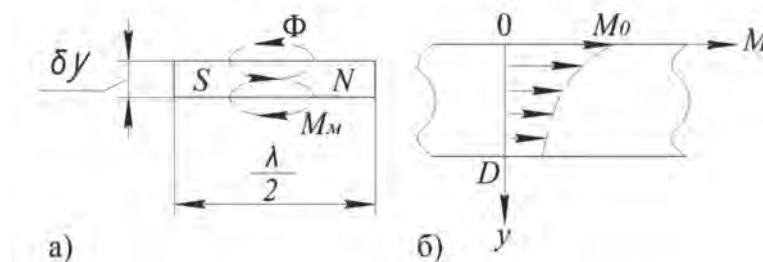


Рис. 3. Распределение намагниченности магнитного потока метки: а) очень тонкого носителя; б) носителя произвольной толщины

Амплитуда поверхностной индукции носителя произвольной толщины  $D$  (рис. 3б) составит

$$B_{ym} = \int_0^D \delta B_{ym}(y). \quad (10)$$

В общем случае в носителе магнитных меток произвольной толщины намагниченность распространяется неравномерно и зависит от координаты  $y$ . При записи коротковолновых синусоидальных сигналов на носитель магнитных меток оптимальным током без подмагничивания функция намагниченности может быть аппроксимирована выражением [3]:

$$M = M_m e^{-\frac{Ky}{\lambda}}, \quad (11)$$

где  $K$  – постоянный коэффициент.

Проинтегрировав выражение (9) в соответствии с условиями выражений (10), (11), получим:

$$B_{ym} = \frac{\pi D}{\lambda} \mu \mu_0 M_m \frac{1 - e^{-\frac{k+2\pi D}{\lambda}}}{\frac{k+2\pi D}{\lambda}}. \quad (12)$$

Магнитная индукция  $B$  связана с напряженностью магнитного поля  $H$  [3]:

$$B = \mu \mu_0 H. \quad (13)$$

Подставив в формулу (8) зависимости (12), (13), получим обобщенную формулу горизонтальной и вертикальной проекций вектора напряженности магнитного поля подвижного носителя магнитных меток:

$$H_x = \frac{\pi D}{\lambda} M_m \frac{1 - e^{-\frac{k+2\pi D}{\lambda}}}{\frac{k+2\pi D}{\lambda}} e^{-\frac{2\pi y}{\lambda}} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right), \quad (14)$$

На основании выражения (16) рассмотрим расчетные зависимости величины фототока на выходе чувствительного элемента ПП с магнитными метками от параметров оптической системы (рис. 4, 5). Для этого в качестве пленки ФГП выбираем иттриевый феррит-гранат ( $Y_3Fe_5O_{12}$ ) [2], работающий на длине светового излучения 1300 нм с коэффициентом поглощения  $b=3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ , постоянной Верде  $V = 5,6520^\circ/\text{А}$  [4]. В соответствии с рабочей длиной волны  $Y_3Fe_5O_{12}$  выбираем: источник оптического излучения с длиной волны 1300 нм – ИЛПН-1300-100 фирмы НПФ «Диалаз» с выходной мощностью  $P_0 = 100 \text{ мВт}$ ; приемник оптического излучения – фотодиод ДФД1000Т0 со спектральной чувствительностью  $S=0,85 \text{ А/Вт}$  на 1300 нм, темновым током 40 нА. В качестве носителя магнитных меток рассмотрим гамаоксид железа  $\gamma Fe_2O_3$  [3] толщиной  $D = 0,5 \text{ мм}$  и насыщенным до значений намагниченности насыщения  $M_m = 350 \cdot 10^3 \text{ А/м}$  в местах магнитных меток.

$$H_y = \frac{\pi D}{\lambda} M_m \frac{1 - e^{-\frac{k+2\pi D}{\lambda}}}{\frac{k+2\pi D}{\lambda}} e^{-\frac{2\pi y}{\lambda}} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right).$$

#### Математическая модель ПП с магнитными метками

Пусть световая волна распространяется внутри ФГП (рис. 1) параллельно  $H_x$  составляющей вектора магнитной индукции. Подставляя в выражение (3) значения (2), (14), получим математическую модель преобразователя перемещений с магнитными метками:

$$i_\phi = ScP_0 e^{-bL} (\cos^2(\alpha + V \frac{\pi D}{\lambda} M_m \frac{1 - e^{-\frac{k+2\pi D}{\lambda}}}{\frac{k+2\pi D}{\lambda}} e^{-\frac{2\pi y}{\lambda}} \sin(\frac{2\pi x}{\lambda}) L \cos\theta) + p). \quad (15)$$

Для определения наибольших влияний параметров на величину фототока ПП с магнитными метками необходимо произвести анализ математической модели. Рассмотрим идеальный случай. В системе «анализатор – ФГП – поляризатор» отсутствуют потери на излучение ( $c=1$ ); пленка ФГП намагничивается магнитным полем до насыщения ( $\frac{M}{M_s} = 1$ ); намагниченность распространена по толщине носителя равномерно ( $k=0$ ); намагниченность пленки ФГП направлена нормально к поверхности ( $\cos\theta = 1$ ); свет в системе «поляризатор – ФГП – анализатор» пропускается в полном объеме ( $p=0$ ). Тогда выражение (15) примет вид:

$$i_\phi = SP_0 e^{-bL} \cos^2\left(\alpha + V \frac{\pi D}{\lambda} M_m \frac{1 - e^{-\frac{2\pi D}{\lambda}}}{\frac{2\pi D}{\lambda}} e^{-\frac{2\pi y}{\lambda}} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) L\right). \quad (16)$$

Значение  $y$  (рис. 2) определяется расстоянием от носителя магнитных меток до центра ФГП. Исходя из геометрических размеров источника – ФГП – приемника оптического излучения 8 мм, а также расстояния от носителя магнитных меток до ПП 1 мм, примем  $y = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

На основании полученных зависимостей (рис. 4, 5) можно сделать выводы о влиянии на величину фототока  $i_\phi$  различных параметров ПП с магнитными метками при прохождении света через ФГП:

1. Наилучшей чувствительностью обладают магнитооптические ПП с углом между осями поляризатора и анализатора равным  $\alpha=45^\circ$ .

2. Магнитооптические ПП малочувствительны к периодическим сигналам волны длиной  $\lambda < 5 \text{ мм}$  с резким возрастанием  $i_\phi$  при  $\lambda > 5 \text{ мм}$ . Указанное положение ограничивает длину магнитной метки  $\frac{\lambda}{2}$  (рис. 2). Для увеличения точности измерения пере-

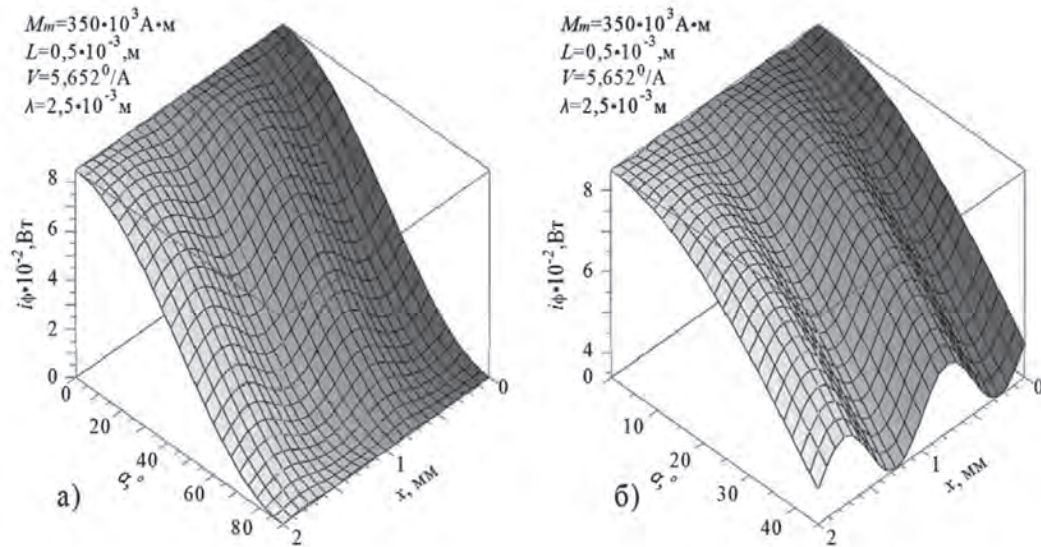


Рис. 4. Зависимость фототока  $i_\phi$  на выходе чувствительного элемента ПП от измеряемого перемещения  $x$  и угла между осями поляризатора и анализатора  $\alpha$ : а)  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ; б)  $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$

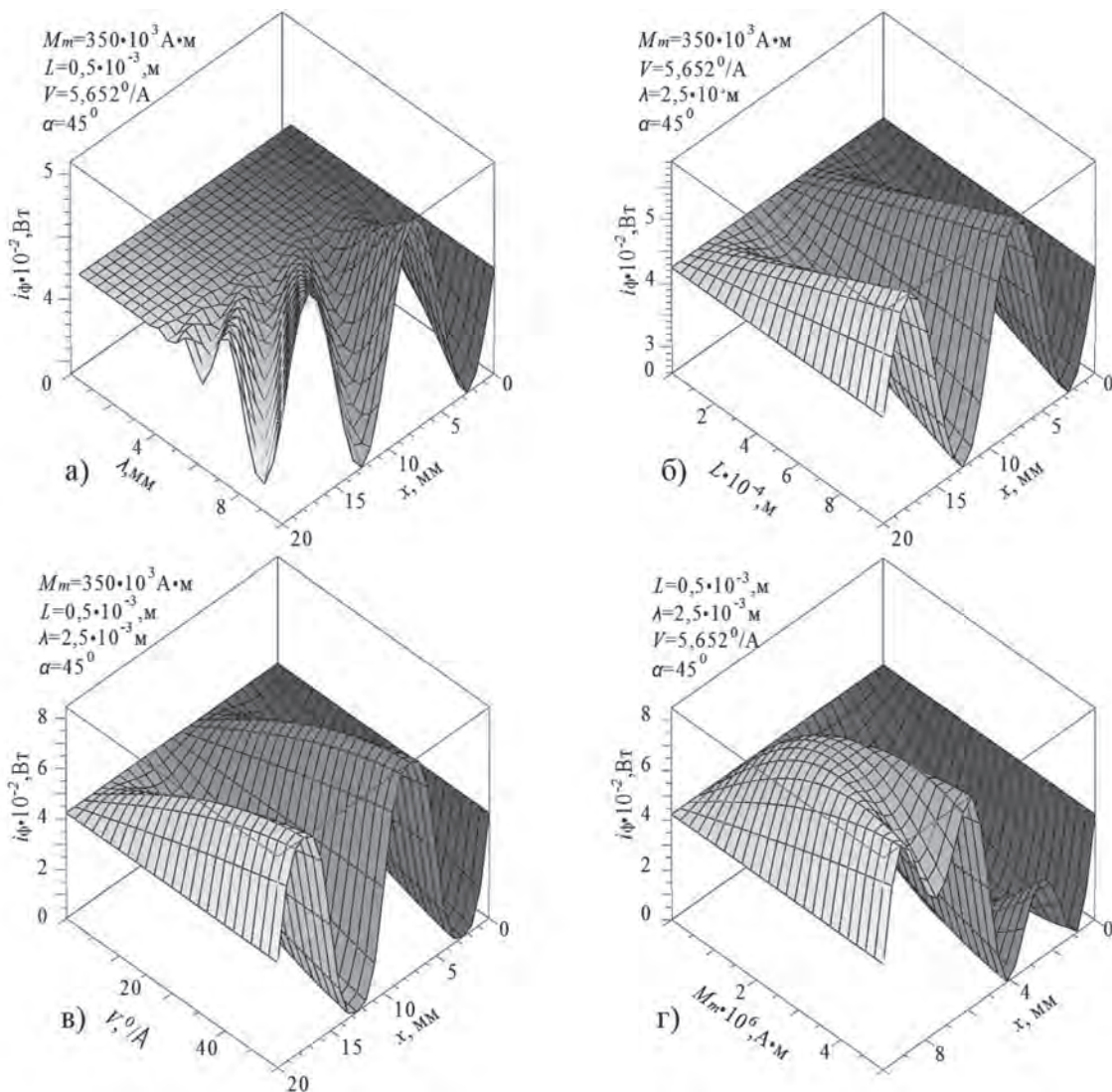


Рис. 5. Зависимость фототока  $i_\phi$  на выходе чувствительного элемента ПП от измеряемого перемещения  $x$  при различных значениях: а) длины волны  $\lambda$  записанного на поверхности подвижного носителя магнитных меток сигнала; б) длины активного взаимодействия  $L$  ФГП; в) постоянной Верде  $V$  материала ФГП; г) намагниченности  $M_m$  на поверхности подвижного носителя магнитных меток

мещения предлагается измерять величину фототока не только в местах с максимальной и минимальной амплитудой фототока  $i_\phi$  магнитных меток с равномерной дискретизацией по оси перемещения

х и неравномерной по оси  $i_\phi$  (рис. 6). Алгоритм такого вычисления может быть записан в память микроконтроллера  $\delta$  (рис. 1).

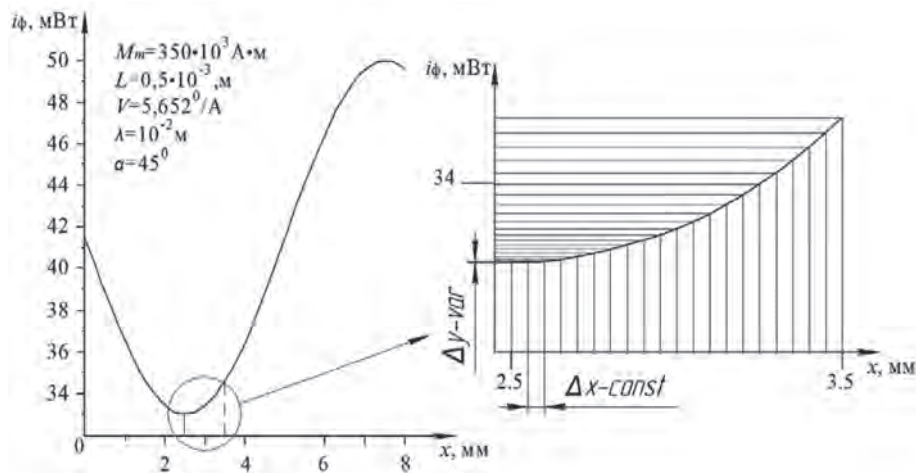


Рис. 6. Зависимость величины фототока  $i_\phi$  от  $x$  при равномерной дискретизации вдоль оси  $x$  с шагом  $\Delta x = 50$  мкм

3. Чувствительность к величине перемещения магнитооптических ПП возрастает с увеличением длины активного взаимодействия ФГП. Оптимальной шириной пленки ФГП является 500 мкм.

4. Чувствительность к величине перемещения магнитооптических ПП возрастает с увеличением постоянной Верде  $V$  и намагниченности  $M_m$  на поверхности подвижного носителя магнитных меток. Указанные величины зависят лишь от физических параметров выбранных материалов.

#### Список литературы

1. Патент РФ. Решение по заявке на ПМ № 2013118780; МПК7G01B7/00. Преобразователь перемещений с магнитными метками [Текст] / М.А. Ураксеев, О.И. Берг; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – 29.05.2013 г.
2. Звездин А.К. Магнитооптика тонких пленок [Текст] / А.К. Звездин, В.А. Котов. – М.: Наука, 1988. – 192 с.
3. Василевский Ю.А. Носители магнитной за-

писи [Текст] / Ю.А. Василевский. – М.: Искусство, 1989. – 287 с.

4. Серба П.В. Нелинейные процессы в электронике и оптике [Текст] / П.В. Серба. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2010. – 170 с.

#### References

1. Patent RF. Reshenie po zajavke na PM № 2013118780; MPK7G01B7/00. Preobrazovatel' peremeshhenij s magnitnymi metkami [Tekst] / M.A. Urakseev, O.I. Berg; zajavitel' i patentoobladatel' GOU VPO «Ufmskij gosudarstvennyj aviacionnyj tehničeskij universitet». – 29.05.2013 g.
2. Zvezdin A.K. Magnitooptika tonkih plenok [Tekst] / A.K. Zvezdin, V.A. Kotov. – M.: Nauka, 1988. – 192 s.
3. Vasilevskij Ju.A. Nositeli magnitnoj zapisi [Tekst] / Ju.A. Vasilevskij. – M.: Iskusstvo, 1989. – 287 s.
4. Serba P.V. Nelinejnye processy v jelektronike i optike [Tekst] / P.V. Serba. – Taganrog: TTI JuFU, 2010. – 170 s.



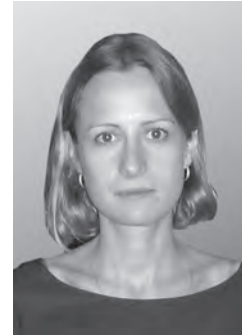
**Васильев А.Н.**  
**Vasilyev A.N.**

доктор технических наук, профессор кафедры «Высшая математика» Института прикладной математики и механики ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», Россия, г. Санкт-Петербург



**Осипов В.П.**  
**Osipov V.P.**

кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша» РАН, Россия, г. Москва



**Сивакова Т.В.**  
**Sivakova T.V.**

младший научный сотрудник ФГБУН «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша» РАН, Россия, г. Москва

УДК 004.415

## СЕТЕВАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ (СКЛ) КАК РАСПРЕДЕЛЕННАЯ НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СРЕДА ПРИКЛАДНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В работе рассматривается концепция единого информационного пространства в виде сетевой компьютерной лаборатории (СКЛ) для образовательной и исследовательской деятельности в виде интегрированной среды прикладного моделирования сложных процессов аэромеханики.

Концепция предполагает интегрировать в единой среде разрозненные образовательные, вычислительные и информационные ресурсы. Это даст возможность создать новые информационные и вычислительные ресурсы, уникальные для образовательной и исследовательской деятельности.

Исследовательская часть СКЛ содержит вычислительные модули, в том числе нейросетевой пакет, который ориентирован на решение широкого круга прикладных задач аэродинамики, тепломассопереноса, механики невесомости и молекулярной динамики как в классической, так и в неклассической постановке, когда трудно или невозможно решать подобные задачи стандартными методами. Мы встречаем такую ситуацию в случае некорректной постановки задач, в частности, проявляющейся при моделировании систем с неточно заданными параметрами, а также в случае неоднородных данных.

При разработке вычислительных модулей СКЛ был использован унифицированный процесс решения сложных задач математической физики. Его основные этапы: 1. Характеристика качества модели в виде функционала (набора функционалов). 2. Выбор функционального базиса (базисов). 3. Выбор и реализация методов подбора структуры модели и настройки параметров. 4. Реализация методов уточнения моделей объектов в процессе их функционирования (и соответствующей подстройки алгоритмов управления ими). 5. Пополнение базы данных моделей, алгоритмов и программ.

Образовательная часть ориентирована на применение технологий дистанционного обучения и содержит структурированные базы данных и знаний по предметной области.

**Ключевые слова:** сетевая компьютерная лаборатория (СКЛ), информационное и математическое моделирование, вычислительный эксперимент, аэромеханика, тепломассоперенос, механика невесомости, молекулярная динамика, база данных, база знаний, нейросетевая технология, нейровычисления, унифицированный процесс.

## NETWORK COMPUTER LAB (NCL) AS THE DISTRIBUTED SCIENTIFICALLY-EDUCATIONAL ENVIRONMENT OF THE APPLIED INFORMATION MODELING

Purpose of project «Network Computer Lab» (NCL) is the realization of the concept of united information space – environment for the scientifically-educational and research activity in the region of aeromechanics by constructing the integrated medium via means of NCL.

This approach intends to integrate and to structure in the united medium the separate educational, computational and information resources. It also makes it possible to create the new resources, unique for the educational and research activity in the field of applied aeromechanics.

The essential parts of the project «Network Computer Lab» (NCL) are «Computational Unit» (CU) and «Neural Network Module» (NNM). CU and NNM are oriented for the solution of the wide circle of the applied problems of aeromechanics and heat-mass transfer, mechanics of weightlessness and molecular dynamics both in the classical and in the non-classical problem statement. It is difficult or it is not possible to solve similar problems by standard methods. For example, we get it in the case of the tasks of incorrectly set, in particular, appearing with the simulation systems with the inaccurately known parameters and also systems in the case of heterogeneous data.

The unified process of the solution of the complex problems of mathematical physics was used for the development of NCL-modules. Its basic stages are the following: 1. Quality characteristic of the model in the form of functional (set of functionals). 2. Selection of functional basis (bases). 3. Selection and realization of the methods of the model structure fitting and the parameters tuning. 4. Application of the methods of refining the models of objects in the process of their functioning (with the corresponding fine adjustment of control algorithms of them). 5. Completion of the base of data of models, algorithms and programs.

*Key words:* network computer lab (NCL), information and mathematical modeling, computing experiment, applied problem, incorrect statement, aeromechanics, heat-mass transfer, mechanics of weightlessness, molecular dynamics, data base, knowledge base, neural network technique, neurocomputing, unified process.

### Введение

Прикладная аэромеханика представляет отдельную область знаний со своей методологией и отработанными приемами исследований. Она тесно связана с теорией вычислительного эксперимента, с теорией программирования, с методами организации высокопроизводительных вычислений и другими смежными дисциплинами.

С одной стороны, мы наблюдаем существенно возросшие возможности пакетов прикладных программ и вычислительных комплексов в области аэромеханики, которые позволяют проводить самостоятельные вычислительные эксперименты для ряда сложных задач, физические условия которых не могут быть воспроизведены в полном объеме в наземных аэродинамических установках. С другой стороны, возрастающий стремительными темпами объем научных и практических знаний и данных по аэродинамике и тепломассообмену требует активного использования существующих и разработки новых информационных ресурсов в виде баз данных и баз знаний для подготовки вычислительных и физических экспериментов.

В свою очередь, результаты моделирования процессов гидромеханики, тепло- и массообмена, молекулярной динамики востребованы в разных

областях науки и техники: авиации, ракетостроении, нанотехнологиях, медицине, электронике, химии, физике и т. д.

Кроме того, в этих областях постоянно возникает потребность повышения квалификации уже работающих и подготовки новых специалистов, которым необходимы навыки изучения процессов аэромеханики, в том числе с помощью методов математического и информационного моделирования.

Для решения этой задачи предлагается все вышеперечисленные области исследования интегрировать в единую информационную среду «СКЛ».

### Предпосылки информатизации научно-образовательной деятельности

#### *Сложность предметной области*

Гидродинамические течения и процессы тепломассопереноса, в большинстве технических, технологических и природных процессов многомасштабные, нестационарные, нелинейные, определяются большим числом безразмерных параметров и отличаются многими другими особенностями. Несмотря на широкое применение различных приближенных, в том числе полуэмпирических, моделей потребности технических и технологических приложений [1, 2] определяют использование (в

том числе для образовательных целей) исходной системы нестационарных уравнений Навье – Стокса. Решение уравнений Навье – Стокса является одной из фундаментальных проблем современной механики, и математическое моделирование систем на их основе по-прежнему является своего рода искусством [3]. Очевидно, что использование в процессе научной и практической деятельности специалистами-гидродинамиками только базовых знаний, полученных в высшем учебном заведении, заведомо недостаточно. К настоящему времени достигнут значительный прогресс в решении этих уравнений в трехмерном приближении как для несжимаемой вязкой жидкости, так и для сжимаемой вязкой среды с различными уравнениями состояния, в том числе плазмы (см., например, [4]). Это позволяет охватить широкий круг современных фундаментальных и прикладных исследований и особенно проявляется в анализе и интерпретации экспериментов с гравитационно-чувствительными процессами в сложных условиях сопряжения уравнений механики космического полета и гидродинамики [5]. Вместе с тем стремительный прогресс создает проблему передачи знаний новому поколению студентов и молодых ученых, что является задачей ведущих научных школ.

*Появление новых вычислительных методов и специализированного математического обеспечения*

Новые подходы к моделированию [6, 7] определяют мотивацию выпускников вузов, ученых и специалистов на регулярное получение новых знаний, необходимых для поддержания высокого уровня разработок и собственной работоспособности в научных и прикладных исследованиях.

Это связано с обработкой и освоением больших потоков информации. Поэтому не случайно именно в сфере научно-образовательной и исследовательской деятельности идет внедрение новых информационных технологий.

Основными предпосылками информатизации являются:

- существенное повышение сложности фундаментальных, прикладных и образовательных задач;
- перенос центра тяжести от физического к математическому и имитационному моделированию физических процессов;
- интенсивное изменение носителей информации об объектах научной, прикладной и образовательной деятельности.

Создаются виртуальные математические лаборатории, в которых формируется виртуальный

образ объекта исследования и проводятся вычислительные эксперименты с использованием математических и компьютерных моделей физических явлений. При этом компьютерная модель физического процесса или явления должна качественно и количественно отражать внешние и внутренние свойства моделируемого объекта.

Первые программы, которые можно отнести к компьютерным лабораториям, появились уже более 15 лет назад. Эти программы возникли не на пустом месте. Решающим импульсом к их появлению стали профессиональные математические пакеты типа Maple, MatLab и Mathematica.

Основные черты виртуальных математических лабораторий, такие как: имитационное моделирование, вычислительный эксперимент, возможность вариации параметров в процессе эксперимента, присущи и современным сложным компьютерным системам. Именно они легли в основу интегрированных технологий и систем моделирования (системы CAD/CAM/CAE). Такие системы, за рубежом раньше (Unigraphics, SolidWorks), а сейчас и в России (КОМПАС, КРЕДО), все чаще и охотнее применяются разработчиками при проектировании новой техники, а преподавателями – при обучении студентов по различным специальностям. Это обеспечивает идентичность информационной среды специалиста и студента. Важное направление применения интегрированных систем – дистанционное обучение, при котором особенно актуальными становятся вопросы создания обучающей среды по изучаемым дисциплинам. Такая среда может одинаково эффективно использоваться как при обучении (например, в качестве лабораторного практикума), так и при автоматизации различных форм и методов контроля знаний и навыков обучаемого.

Интенсивно развиваются нейрокомпьютерные технологии.

В математической физике имеется достаточно широкий круг задач (относящихся, как правило, к описанию систем с распределенными параметрами), которые приводят к изучению краевых задач для уравнений в частных производных (или интегро-дифференциальных уравнений).

Основная методологическая ошибка работ по математической физике состоит в том, что дифференциальное уравнение в частных производных (вместе с краевыми условиями) принимается за объект моделирования, по которому строится его приближенная модель – решение, найденное тем или иным численным методом. Правильнее рассматривать дифференциальные уравнения (вместе с сопутствующими начально-краевыми условиями)



как приближенную модель, содержащую информацию о моделируемом объекте, от которой требуется перейти к более удобной модели (например, функциональной), используя уравнения и иную доступную информацию. Еще более правильным является рассмотрение иерархии моделей разной точности и области применимости, которые могут уточняться по мере поступления новой информации.

Лишь небольшое число задач математической физики, обычно обладающих симметрией, допускает точное аналитическое решение. Существующие приближенные методы решения либо позволяют получить лишь поточечную аппроксимацию подобно сеточным методам (получение из поточечного решения некоторого аналитического выражения представляет собой отдельную задачу), либо предъявляют специальные требования к набору аппроксимирующих функций и требуют решения важной вспомогательной задачи разбиения исходной области подобно тому, как это происходит в методе конечных элементов. Использование нейронных сетей в качестве новой методологии решения как старых – классических, так и новых – неклассических задач основано на целом ряде особенных свойств нейросетей. Нейронные сети можно рассматривать как универсальные аппроксиматоры. Это заключение следует из обобщенной аппроксимационной теоремы Стоуна.

Очень важной для мотивации выбранного подхода представляется устойчивость нейросетевой модели по отношению к ошибкам в данных – неточностям в задании коэффициентов уравнений, граничных и начальных условий, возмущениям границы, погрешностям вычислений.

Нейросетевой подход в предлагаемой форме слабо зависит от формы области и может быть применен в случае задач со сложной геометрией области, позволяет учесть разрывы и изменение типа уравнения в подобластях.

Другим принципиальным моментом, характерным для нейросетевого подхода, является распараллеливание задачи и возможность использования набора сетей, что существенно при построении моделей систем с кусочно заданными параметрами. К тому же указанный подход позволяет применить хорошо отработанные для нейронных сетей приемы поиска оптимальной структуры, использующие кластеризацию, генетические алгоритмы (например, процедуры типа многорядного алгоритма МГУА и др.).

Не отстают в своем развитии и современные компьютерные системы вычислительной гидродинамики – Computational Fluid Dynamics (CFD). За

последние десятилетия были разработаны универсальные программные продукты типа Fluent, CFX, StartCD, Femlab (зарубежные), COMGA, ASTRA, FlowVision, GDT (российские) и т. п., которые предоставляют новые возможности не только для проведения серьезных вычислительных экспериментов, но и для совершенствования высшего образования на всех его этапах – от комплексного обучения до целенаправленной подготовки специалистов к профессиональной деятельности. CFD-пакеты имеют широкий диапазон применения и могут быть использованы как в практике обучения, так и для профессиональных исследований. В газовой динамике и смежных областях известны десятки прикладных программ и баз данных. Наличие большого числа разнородных программных продуктов создает значительные проблемы как при организации их взаимодействия, так и для работы пользователей.

#### *Развитие вычислительных средств и сети Интернет*

В настоящее время основными вычислительными средствами при проведении расчетных исследований различных задач в научно-образовательном процессе являются рабочие станции и персональные ЭВМ (ПК) с уровнем производительности около  $10^3 - 10^4$  Мфлпс (1 флпс = 1 операции с плавающей точкой в секунду). Такая производительность позволяет исследовать лишь частные задачи, возникающие в различных областях. Реализация данного проекта решает проблему подготовки специалистов высшей квалификации для перехода к широкомасштабному вычислительному моделированию разнообразных физических, технических, технологических процессов переноса в сплошных средах с производительностью на уровне  $10^6 - 10^7$  Мфлпс.

Наиболее эффективно использование CFD-средств для практических задач – с привлечением многопроцессорных компьютеров с широким распараллеливанием процессов вычислений. В России с конца 80-х годов в различных организациях ведутся разработки параллельных алгоритмов и программ. При этом используются ЭВМ с различной архитектурой. Наиболее известными из них являются суперкомпьютеры семейства МВС-1000 и «Скиф», относящиеся к семейству параллельных компьютеров и представляющие собой мультипроцессорный массив, объединенный с внешней дисковой памятью и устройствами ввода-вывода информации под общим управлением персонального компьютера или рабочей станции. К настоящему времени в России введены в действие многопроцессорные вычислительные системы производитель-

ностью на уровне до 500 Терафлопс.

Таким образом, в России произошел прорыв в части создания современных высокопроизводительных вычислительных систем. Тенденция такова, что уже сейчас архитектура ПК основывается на многопроцессорной схеме организации вычислений. В ближайшей перспективе это сделает каждый ПК суперкомпьютером в современном понимании этого термина.

В последнее десятилетие, в том числе и в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, активно развивается новая форма организации вычислительных средств, получившая название ГРИД. Эта организация вычислений основывается на том, что современные телекоммуникационная аппаратура и каналы связи дают возможность интегрировать разнесенные на любые расстояния компьютерные системы разных типов и назначений.

#### *Новые схемы организации вычислений и хранения информации*

Взрывной рост сети Интернет и массированные инвестиции в ее развитие создают новые возможности и новые проблемы. Возможности связаны с появлением уникальной глобальной среды распределенных вычислений и хранения информации, проблемы – с тем, что сеть «наполняется содержанием» существенно медленнее, чем развивается коммуникационная инфраструктура. Так, теоретически обоснована и получает аппаратную базу «сетевая» модель вычислений, представляющая логическое развитие клиент-серверного подхода. Однако если развитие клиентской стороны уже привело к появлению сначала концепции, а недавно – и промышленных образцов «сетевых компьютеров» (NC, NetPC), то развитие серверной, «содержательной» стороны практически во всех предметных областях заметно отстает. Задача создания такого программного обеспечения – не техническая, а фундаментальная. По этой причине представляется необходимым создание интегрированной среды (информационно-вычислительной системы), которая позволяла бы исследователю использовать единый пользовательский интерфейс при обращении к любым прикладным программам и базам данных, подготовке входных данных для программ, визуализации, анализе и архивировании результатов расчетов. Такая система неминуемо должна иметь свое собственное представление данных и средства манипулирования ими; только при этом возможна организация «конвейера», обеспечивающего анализ конкретных задач всеми доступными методами, реализованными в базах дан-

ных и пакетах прикладных программ.

Аналог подобной системы, получивший название NetLaboratory («сетевая лаборатория») разрабатывался коллективом сотрудников ИПМ РАН им. М.В. Келдыша, НИФХИ им. Л.Я. Карпова и Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова [8].

Кроме того, следует отметить систему COMGA (CONvection in MicroGravity and Applications), адаптированную к персональной ЭВМ. Система в течение ряда лет разрабатывалась под руководством профессора В.И. Полежаева. На ее основе разрабатывалась концепция инженерного образования и практикумов по изучению элементарных течений, тепло- и массообмена на основе нестационарных уравнений Навье – Стокса [9].

#### **Цель и задачи сетевой компьютерной лаборатории**

Цель проекта СКЛ – это реализация концепции единого информационного пространства для научно-образовательной и исследовательской деятельности в области аэромеханики путем построения специализированной интегрированной среды (рис. 1).

Для достижения этой цели СКЛ должна обеспечить унифицированный сетевой доступ к образовательным, вычислительным и информационным ресурсам участников партнерской группы ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и предоставить пользователям единый тематический комплекс научных, вычислительных, образовательных и информационных ресурсов.

Проблему создания такого рода систем можно отнести к наиболее актуальным проблемам разработки технических средств, интегрирующих сервисные возможности систем дистанционного образования (в т. ч. средств обучения и сертификации), экспертных систем, баз данных и распределенной интеллектуальной среды поддержки и проведения вычислительного эксперимента. При этом не обойтись без современных сетевых (Интернет) технологий, которые позволят объединить вокруг единого информационного пространства прикладной аэромеханики профессиональное сообщество.

Именно поэтому наиболее перспективным направлением является не создание еще одного информационного ресурса, а разработка интегрированной среды – объединяющей, структурирующей и описывающей образовательные, вычислительные и информационные ресурсы участников партнерской группы. Этот подход предполагает не только структурирование и интеграцию в единую среду разрозненных ресурсов, но и создание новых, в том

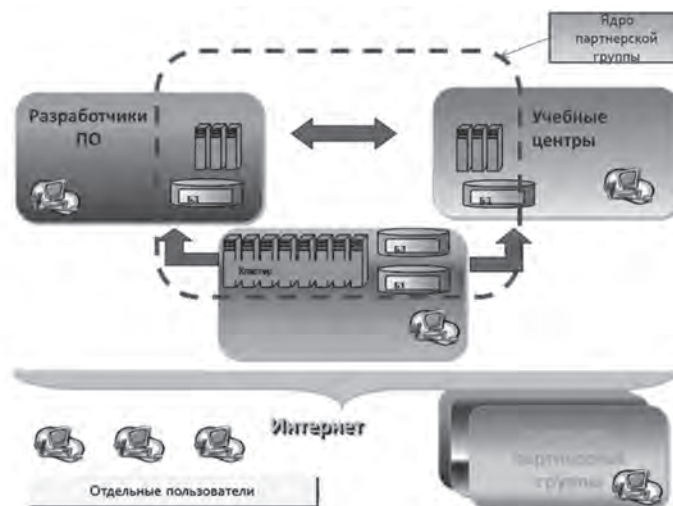


Рис. 1. Схема объединения ресурсов

числе уникальных для образовательной и исследовательской деятельности в области прикладной аэромеханики.

Предполагается, что СКЛ позволит:

1) создать благоприятные условия для подготовки ученых и специалистов-исследователей процессов аэрогидромеханики, тепломассопереноса и механики невесомости;

2) привлечь к научно-исследовательской и образовательной деятельности ведущих специалистов РАН, отраслевых предприятий, преподавателей и выпускников профильных вузов.

### Этапы создания сетевой компьютерной лаборатории

Процесс создания СКЛ включает работы по

анализу требований пользователей, проектирование системы, программирование приложений, сборку системы и ее тестирование, ввод в действие и приемку программных продуктов.

На начальной стадии разработки СКЛ при анализе требований и проектировании происходит понимание того, что будет делать разрабатываемая система и каким образом она будет работать, чтобы удовлетворить предъявляемые к ней требования. Для этого необходимо определить и конкретизировать (смоделировать, формализовать) требования, а также осуществить разработку и компоновку функциональных и информационных моделей системы (рис. 2, 3, 4).

Здесь же определяются вспомогательные (нефункциональные) требования и другие ограничения.

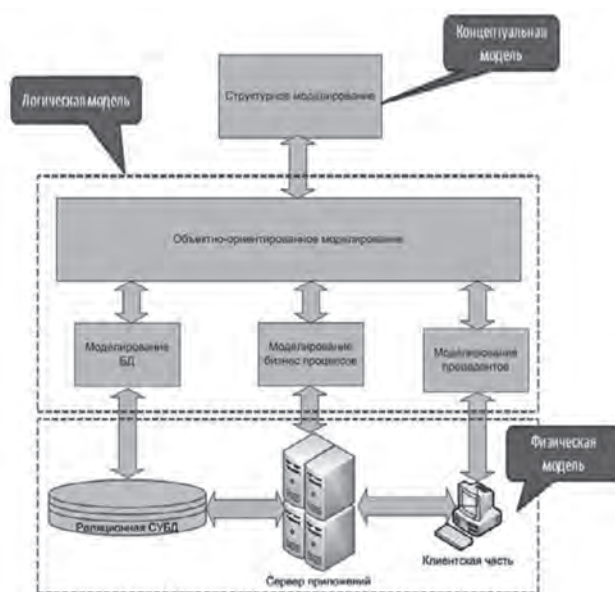


Рис. 2. Компоненты модели системы

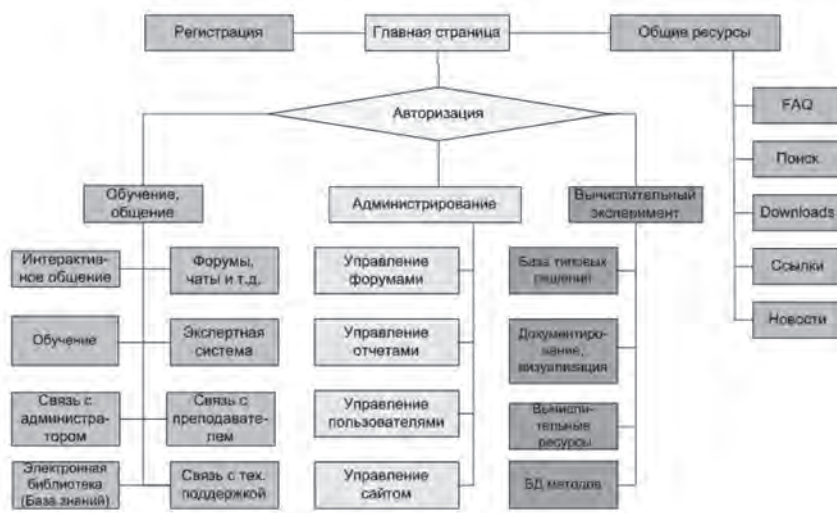


Рис. 3. Функциональные модули и ресурсы СКЛ

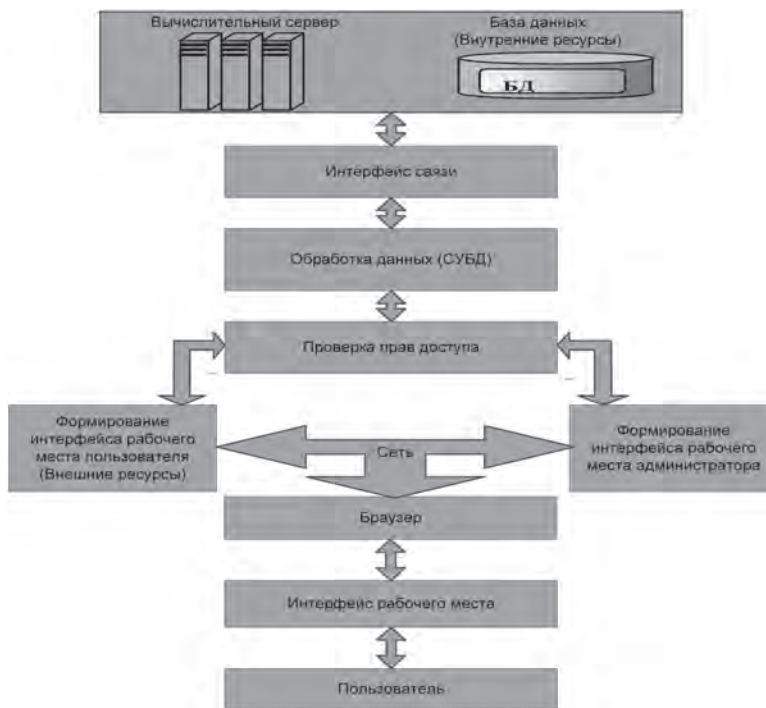


Рис. 4. Информационные потоки СКЛ

**Разработка методического обеспечения сетевой компьютерной лаборатории**

На этом этапе были собраны и систематизированы сведения об истории и современном состоянии математических моделей на основе уравнений динамики несжимаемой и сжимаемой жидкости, в том числе околокритической среды и соответствующих вычислительных кодов для решения двух- и трехмерных задач. Модели предназначены для описания процессов аэромеханики, актуальных для изучения как фундаментальных проблем аэродинамики, тепломассопереноса и механики невесомости, так и для прикладных задач современной

ракетно-космической и авиационной техники и технологий получения новых материалов, монокристаллов и полупроводниковых структур для электроники и оптоэлектроники.

Основу для используемых математических моделей составляют уравнения Навье – Стокса, дополненные описанием сопутствующих физических явлений. Должны быть рассмотрены реалистичные физико-химические модели среды, учитывающие все многообразие имеющихся процессов. Требуется анализ имеющихся в настоящее время моделей описания турбулентных течений, включая как прямые методы и методы типа крупных вихрей, так и при-

ближенные модели турбулентности типа k-eps или k-omg.

Отдельную позицию занимают также модели молекулярной динамики, которые в последнее время получили широкое распространение. Особенно востребованы модели, где столкновения между частицами разыгрываются с использованием методов Монте-Карло, при этом используются различные описания частиц – отдельные молекулы, группы из большого числа молекул, молекулярные облака и т. п.

После проведенных исследований были сформулированы требования к типовым задачам сетевой компьютерной лаборатории и перечень таких задач, включающий задачи по аэрогазодинамике, аэроакустике и тепломассопереносу, решение которых предусмотрено с использованием ресурсов СКЛ.

#### *Формирование требований к СКЛ*

Поскольку СКЛ предназначена для реализации концепции единого информационного пространства для научно-образовательной и исследовательской деятельности, она должна обеспечить унифицированный сетевой доступ к образовательным, вычислительным и информационным ресурсам участников партнерской группы и предоставить пользователям единый комплекс научных, вычислительных, образовательных и информационных ресурсов.

В качестве заинтересованных пользователей системы, чьи потребности принимаются во внимание, выступают участники творческого коллектива проекта:

- участники образовательной деятельности – студенты, преподаватели, методисты;
- участники исследовательской деятельности – аспиранты, инженеры-исследователи, научные работники, эксперты;
- разработчики и администраторы системы – системные интеграторы, программисты, администраторы.

Это позволяет достаточно широко учитывать потребности различных групп заинтересованных пользователей, обобщить их, представить в виде требований к СКЛ, выделить направления разработки интегрированной среды. В итоге вырабатывается понимание того, что же в действительности необходимо сделать.

#### *Создание информационной модели СКЛ*

Информационная модель СКЛ, наряду с ее функциональной моделью, является важной компонентой системного проекта. Информационные тех-

нологии обычно специализируются на конкретных отраслевых проблемах. Для этого они используют формализованные модели соответствующих предметных областей, накопленные знания и индивидуальный опыт многих специалистов. Поэтому любое информационное моделирование начинается с анализа предметной области. С этой точки зрения современную аэромеханику можно рассматривать как согласованную совокупность физических и математических (вычислительных) моделей целого ряда изучаемых явлений аэродинамики, акустики, турбулентности, конвекции.

Опыт создания интегрированных сред моделирования в конкретной предметной области показывает, что сначала разрабатываются несколько отдельных вычислительных комплексов – «кирпичиков» большой системы, специализированных на обслуживании конкретных довольно узких физических проблем. Отдельные компоненты таких комплексов могут оказаться более или менее универсальными (инвариантными) и пригодными для решения других задач разрабатываемой предметной области (например, диалоговые, графические и сервисные средства).

К разработке таких вычислительных комплексов нужно подходить так, чтобы можно было пользоваться ими, не дожидаясь завершения большого проекта, и в то же время, чтобы выполненная работа с минимальными переделками была пригодна к включению в интегрированную среду.

Эта концепция ложится в основу проектирования системы, которое начинается с информационного моделирования и включает построение концептуальной и логической моделей (рис. 6, 7, 8).

Концептуальная составляющая информационной модели СКЛ определяет контекст (границы) системы, ее поэлементный состав с необходимой функциональностью для взаимодействия элементов между собой и с внешней средой (рис. 6).

Логическая компонента информационной модели (семантическая модель) моделирует структуру системы и описывает характер взаимодействия с внешней средой и внутри системы (рис. 7, 8).

Характер работы по созданию информационной модели определялся следующими особенностями:

- участием в партнерской группе проекта отдельных разнородных групп разработчиков, разных по уровню квалификации и сложившимся традициям;
- постоянно изменяющимися или уточняющимися информационными потребностями предполагаемых пользователей, что усложняет проектирование СКЛ;



Рис 6. Концептуальная модель

### Трёхуровневая архитектура (среда вычислительного эксперимента)

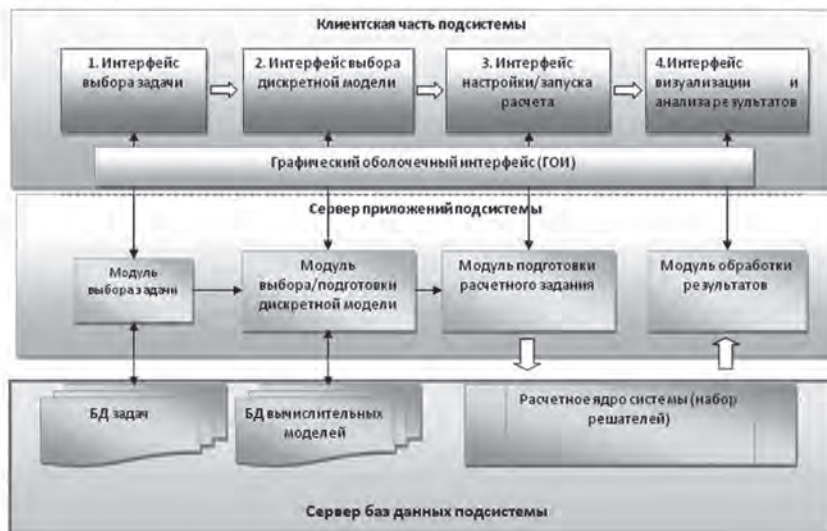


Рис 7. Логическая модель исследовательского модуля

– сложностью описания (достаточно большое количество функций, процессов, данных и сложные взаимосвязи между ними), требованием тщательного моделирования и анализа информационных процессов;

– малым числом аналогов, ограничивающим возможность использования каких-либо типовых проектных решений;

– разработкой вычислительных и программных модулей (будущих «кирпичиков» большой системы), которая осуществлялась, как правило, на интуитивном уровне неформализованными методами, включающими в себя элементы искусства, практический опыт, экспертные оценки и продолжи-

тельные тестовые проверки качества функционирования;

– наличием совокупности тесно взаимодействующих компонентов (подсистем) и, как следствие, необходимостью интеграции существующих и вновь разрабатываемых приложений. При создании СКЛ реализуется подход, при котором отдельные вычислительные и программные модули, специализированные на обслуживании конкретных задач моделирования, встраиваются в «каркас» среды моделирования и играют роль «кирпичиков» большой системы. В «каркас» СКЛ входят диалоговые, графические и сервисные средства;

– функционированием в неоднородной среде



Рис.8. Логическая модель образовательного модуля

на нескольких аппаратных платформах.

Поскольку сложность системы высокая, важно использовать наиболее эффективные методы моделирования. Свою эффективность в качестве средства визуального моделирования показал язык UML – *Unified Modeling Language* [10], обладающий богатым набором изобразительных средств объектно-ориентированного моделирования, таких как диаграммы вариантов использования, взаимодействия, классов, состояний и т. д., которые были использованы для описания, обсуждения и корректного документирования компонентов информационной модели СКЛ в виде схем и диаграмм (см., например, рис. 9).

Важным дополнением к графическим образам информационной модели является словарь терминов (глоссарий) предметной области. Во всех перечисленных случаях может возникнуть ситуация, когда тот или иной термин используется заинтересованными лицами в несколько различных значениях (контекстах). Такие противоречия (иногда это не является противоречием: смысл термина может меняться в зависимости от контекста) необходимо разрешать с помощью словаря с однозначными формулировками определений. Главное при этом – выявление связей между сущностями, построение семантической модели предметной области.

На данной стадии проекта разработаны общие подходы к структуре словаря, собраны и систематизированы наиболее важные термины и определения, необходимые как для проектирования системы, так и для работы с ней.

#### *Разработка вычислительных и информационных ресурсов СКЛ*

Вычислительные ресурсы СКЛ состоят из ряда компонент, представляющих собой библиотеки выполнения базовых операций, программы, выполняющие моделирование, модули решения типовых задач с соответствующими интерфейсами.

Информационные ресурсы объединяют программное обеспечение и сервисы, необходимые для информационного обеспечения, управления и сопровождения вычислительного эксперимента и образовательного процесса средствами СКЛ.

В стандартных промышленных пакетах программ пользователь, как правило, имеет дело с фиксированной структурой программы и ограниченным набором тщательно проверенных моделей и методов. Это положение – почти противоположное статусу любого исследовательского кода. К тому же современные промышленные пакеты пока еще не способны в полной мере использовать появившиеся ресурсы высокопроизводительных многопроцессорных суперЭВМ.

Анализ проблем интеграции вычислительных и информационных ресурсов в рамках распределенной среды моделирования показал, что программное обеспечение для научных и образовательных задач должно разрабатываться так, чтобы оно допускало быструю реорганизацию и включение новых математических моделей и методов. Важно исследовать особенности организации работ в открытых системах-прототипах, таких как зарубежный пакет

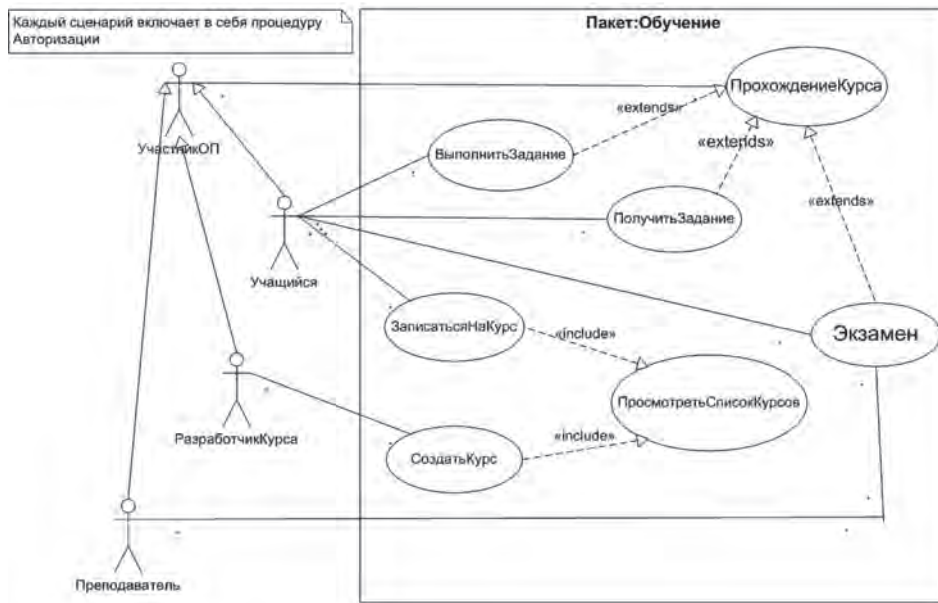


Рис.8. Логическая модель образовательного модуля

OpenFOAM и российский пакет прикладных программ GIMM. Пакет GIMM разрабатывался в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН для проведения масштабных численных экспериментов. В нем эффективное взаимодействие ресурсов осуществляется с помощью программных компонентов в составе программной оболочки, работающей под управлением диспетчера программ. Это позволило автоматизировать каждый этап вычислительного эксперимента с использованием многопроцессорных суперЭВМ.

#### Сборка и тестирование макетной версии СКЛ

При разработке макета СКЛ были созданы программные средства, обеспечивающие доступ к информационным ресурсам СКЛ через Интернет и их управление. Основным результатом работы стал интернет-портал СКЛ <http://net-lab.keldysh.ru>.

Сборка макета позволила проверить эффективность выбранных решений для реализации четырех основных функций СКЛ:

1. Обучение и повышение квалификации – формирование и использование учебных материалов для студентов, аспирантов и молодых специалистов, тестирование знаний, составление индивидуальных планов обучения и повышение квалификации.

2. Вычислительные эксперименты с использованием вычислительных ресурсов СКЛ – закрепление теоретического материала на практике для студентов и параметрические исследования для исследователей.

3. Информационное обеспечение пользователей – предоставление информации о ресурсе, информационная поддержка научных семинаров, уведомление о событиях в партнерской группе, за-

грузка справочных материалов и т. п.

4. Администрирование – регистрация, авторизация и разграничение прав пользователей (гость, студент, исследователь, преподаватель, администратор, разработчик, тестировщик и т. п.). Контроль за выполнением задач, устранение сбоев и т. п.

В процессе выполнения работ по сборке системы было рассмотрено три способа подключения внешних ресурсов и организации взаимодействия абонентских пунктов с системой:

1. Технология «тонкого» клиента с делегированием клиенту интерфейса доступа ко всем ресурсам, реализуемого в рамках web-сервиса (web-browser на стороне клиента). По данной методике были реализованы следующие подсистемы:

- основной ресурс СКЛ в ИПМ: <http://net-lab.keldysh.ru/>;
- web-ресурс в ИПМех: <http://ipmnet.ru/~pivovar/websolver>;
- web-ресурс в ИПМех: <http://nu.ipmnet.ru/~pivovar/websolver3>;
- web-ресурс подсистемы обучения Гекадем: <http://hecadem.keldysh.ru/>.

2. Технология «тонкого» клиента с предоставлением пользователю графической оболочки – клиентского приложения, обеспечивающей взаимодействие с удаленным вычислительным сервером, на котором располагаются и вычислительные модули, и все вспомогательные приложения. По данной методике реализованы подсистемы:

- комплекс GIMM\_QGD;
- комплекс аэродинамических расчетов VIRAu в режиме удаленного терминала.



3. Технология «толстого клиента» – все вычислительные и вспомогательные операции выполняются непосредственно на клиентской ЭВМ, на которой располагаются все необходимые вычислительные модули и ресурсы. Данные модули и ресурсы могут быть загружены с основного портала СКЛ (<http://net-lab.keldysh.ru/>). По данной технологии реализованы следующие подсистемы:

- комплекс VIRAU в автономном режиме;
- модуль молекулярной динамики МПВМ;
- модуль нейросетевого моделирования NEURO\_2D.

Проанализированы методики организации процесса тестирования и основные техники тестирования, такие как тестирование, основанное на сценариях использования, выбраны специфичные для web-ресурсов тестовые случаи и методы тестирования.

#### **Разработка методики организации вычислительных экспериментов и инструкций пользователей**

На данном этапе проводится подробный анализ содержания прикладного моделирования и методов планирования экспериментов в современном понимании проблем. Формируется концептуальный базис построения среды моделирования динамических систем и технологии планирования эксперимента с использованием принципов обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде.

К числу важнейших проблем прикладных исследований относится оценка достоверности результатов моделирования [11]. Важно сформулировать принципы организации вычислительных комплексов, использующих интеллектуальные технологии, направленные на повышение эффективности моделирования и достоверности получаемых оценок. Центральное место занимают меры по организации оценки достоверности (адекватности) математического моделирования тех или иных процессов, в том числе с учетом неопределенности в исходных данных и неполноты информации о внешних воздействиях. Здесь необходимы методы и процедуры по:

- поддержке принятия решений при планировании вычислительных экспериментов;
- разработке критериального базиса оценки достоверности;
- развитию методологической схемы валидации моделей;
- разработке программных средств для информационной поддержки принятия решений при планировании вычислительных экспериментов на базе сетевой компьютерной лаборатории.

#### **Заключение**

Разработанный макет СКЛ, доступный на сайте <http://net-lab.keldysh.ru/>, стал рабочей средой участников проекта из разных организаций. Он позволяет объединить информационные и вычислительные ресурсы в среду моделирования и обучения. Системообразующими компонентами СКЛ являются ее ресурсы, которые включают унифицированные средства информационного обмена и обработки данных, а также единое расчетное ядро системы. Реализованы основные функции СКЛ, такие как обучение, вычислительный процесс, информационное сопровождение, администрирование. Впервые разработаны и применены новые подходы: оригинальные технологии системной интеграции на основе каркасного подхода к сборке программных комплексов; принципы унификации вычислительной процедуры, в том числе на основе нейросетевых подходов.

Основное отличие от зарубежных аналогов (OpenFoam) заключается в том, что в проекте впервые реализована системная интеграция распределенных ресурсов исследовательской и образовательной деятельности.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 13-01-00895-а, 13-01-12046 офи-м.*

#### *Список литературы*

1. *Авдуевский В.С.* Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике [Текст] / В.С. Авдуевский, Б.М. Галицейский, Г.А. Глебов и др. – М.: Машиностроение, 1992. – 528 с.
2. *Анфимов Н.А.* Моделирование обтекания и теплообмена гиперзвуковых летательных аппаратов в поршневых газодинамических установках многокаскадного сжатия (ПГУ МКС) [Текст] / Н.А. Анфимов, В.В. Кислых // В сборнике: Проблемы современной механики. К 85-летию со дня рождения академика Г.Г. Черного / Под ред. А.А. Бармина. – М.: МГУ, Омега-Л, 2008. – 639 с.
3. *Полежаев В.И.* Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе нестационарных уравнений Навье – Стокса [Текст] / В.И. Полежаев, А.В. Бунэ, Н.А. Вerezуб и др. – М.: Наука, 1987. – 272 с.
4. *Методы численного решения уравнений динамики вязкой среды* [Текст] // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Справочные приложения и банки данных. Т. VII–1. Математическое моделирование в низкотемпературной плазме, гл. VII / Под ред. Ю.П. Попова. – М.: Янус-К, 2008. – С. 177–370.

5. *Полежаев В.И.* Конвекция и процессы тепло- и массообмена в условиях космического полета [Текст] / В.И. Полежаев // Известия РАН. МЖГ. – 2006. – № 5. – С. 67–88.

6. *Четверушкин Б.Н.* Кинетически согласованные схемы в газовой динамике [Текст] / Б.Н. Четверушкин. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 232 с.

7. *Васильев А.Н.* Унифицированный процесс моделирования систем с распределенными параметрами [Текст] / А.Н. Васильев, В.П. Осипов, Д.А. Тархов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – М.: Радиотехника, 2010. – № 7. – С. 20–28.

8. *Емельянов В.Н.* Информационно-вычислительная система на основе технологий internet для химии и смежных областей [Текст] / В.Н. Емельянов, И.В. Плетнев, А.Л. Чугреев // Препринт ИПМ, Москва, 2003. – № 100. – 18 с.

9. *Полежаев В.И.* Система и компьютерная лаборатория для решения задач конвективного тепло-массообмена [Текст] / М.К. Ермаков, С.А. Никитин, В.И. Полежаев // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1997. – № 3. – С. 22–38.

10. *Мацяшек Л.* Анализ и проектирование информационных систем с использованием UML 2.0. [Текст] / Л. Мацяшек – М.: Издательский дом «Вильямс», 2008. – 816 с.

11. *Осипов В.П.* Нейрокомпьютеры и интеллектуальные технологии XXI века [Текст] / Ю.И. Нечаев, В.П. Осипов и др., под. общ. ред. Ю.И. Нечаева. – М.: Радиотехника, 2012. – 352 с.

#### References

1. *Avduevskij V.S.* Osnovy teploperedachi v aviacionnoj i raketno-kosmicheskoj tehnike [Текст] / V.S. Avduevskij, B.M. Galicejskij, G.A. Glebov i dr. – М.: Mashinostroenie, 1992. – 528 s.

2. *Anfimov N.A.* Modelirovanie obtekanija i teploobmena giperzvukovyh letatel'nyh apparatov v porshnevnyh gazodinamicheskih ustanovkah mnogokaskadnogo szhatija (PGU MKS) [Текст] / N.A. Anfimov, V.V. Kislyh // V sbornike: Problemy sovremennoj mehaniki. K 85-letiju so dnja rozhdenija akademika G.G. Chernogo / Pod. red. A.A. Barmina. –

М.: MGU, Omega-L, 2008. – 639 s.

3. *Polezhaev V.I.* Matematicheskoe modelirovanie konvektivnogo teploobmena na osnove nestacionarnykh uravnenij Nav'e – Stoksa [Текст] / V.I. Polezhaev, A.V. Bujne, N.A. Verezub i dr. – М.: Nauka, 1987. – 272 s.

4. *Metody chislennogo reshenija uravnenij dinamiki vjazkoj sredy* [Текст] // Jenciklopedija nizkotemperaturnoj plazmy. Serija B/ Spravochnye prilozhenija i banki dannyh. T. VII–I. Matematicheskoe modelirovanie v nizkotemperaturnoj plazme, gl.VII / Pod red. Ju.P. Popova. – М.: Janus-K, 2008. – С. 177–370.

5. *Polezhaev V.I.* Konvekcija i processy teplo- i massoobmena v uslovijah kosmicheskogo poleta [Текст] / V.I. Polezhaev // Izvestija RAN. MZhG. – 2006. – № 5. – С. 67–88.

6. *Четверушкин Б.Н.* Кинетически согласованные схемы в газовой динамике [Текст] / Б.Н. Четверушкин. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 232 с.

7. *Vasil'ev A.N.* Unificirovannyj process modelirovanija sistem s raspredelennymi parametrami [Текст] / A.N. Vasil'ev, V.P. Osipov, D.A. Tarhov // Nejrokom'jutery: razrabotka, primenenie. – М.: Radiotehnika, 2010. – № 7. – С. 20–28.

8. *Emel'janov V.N.* Informacionno-vychislitel'naja sistema na osnove tehnologij internet dlja himii i smezhnyh oblastej [Текст] / V.N. Emel'janov, I.V. Pletnev, A.L. Chugreev // Preprint IPM, Moskva, 2003. – № 100. – 18 s.

9. *Polezhaev V.I.* Sistema i komp'juternaja laboratorija dlja reshenija zadach konvektivnogo teploobmena [Текст] / M.K. Ermakov, S.A. Nikitin, V.I. Polezhaev // Izv. AN SSSR. MZhG. – 1997. – № 3. – С. 22–38.

10. *Macjashek L.* Analiz i proektirovanie informacionnyh sistem s ispol'zovaniem UML 2.0. [Текст] / L. Macjashek – М.: Izdatel'skij dom «Vil'jams», 2008. – 816 s.

11. *Osipov V.P.* Nejrokom'jutery i intellektual'nye tehnologii XXI veka [Текст] / Ju.I. Nechaev, V.P. Osipov i dr. pod. obshh. red Ju.I. Nechaeva – М.: Radiotehnika, 2012. – 352 s.



**Павлов С.В.**  
**Pavlov S.V.**

*доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Геоинформационные системы» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа*



**Давлетбакова З.Л.**  
**Davletbakova Z.L.**

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



**Абдуллин А.Х.**  
**Abdullin A.Kh.**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа*

УДК 004.49

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ОТХОДАМИ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН НА ОСНОВЕ БАЗЫ НЕЧЕТКИХ ЗНАНИЙ**

В статье рассмотрены основные принципы формирования базы знаний и обработки информации о сфере обращения с отходами на основе методов нечеткой логики, а также аспекты интеграции указанной базы знаний в автоматизированную систему поддержки принятия решений по управлению отходами на территории Республики Башкортостан.

Рассмотрена структура хранения разнородных данных, необходимых для управления объектов, вовлеченных в сферу обращения с отходами, в которой значительная часть информации характеризует географически распределенные объекты. Представлена упрощенная архитектура системы, функционирование которой обеспечивается поддержкой серверов Microsoft SQL Server и ArcSDE для хранения и многопользовательского доступа к данным. На основе проведенного анализа предложено использование концепции нечетких реляционных баз данных, в которых можно учесть неточности, неопределенности и степень достоверности хранимой информации и расширить реляционную модель для представления неточных данных и таким образом обеспечить достижение приемлемых решений.

Авторами подробно показано, каким образом база нечетких знаний о размещении промышленных отходов может быть определена с помощью реляционной базы данных для хранения нечетких атрибутов – весь массив знаний выделен в несколько взаимосвязанных блоков: входные лингвистические переменные, выходные лингвистические переменные и правила логического вывода, а также блок интеграции базы знаний с информационными объектами, хранимых в базах данных системы. В целом рассмотренный подход позволяет на основе системы нечеткой логики хранить суждения экспертов и использовать их в автоматизированной системе поддержки принятия решений по управлению отходами.

Благодаря реляционному представлению базы нечетких знаний в системе достигается взаимодействие базы пространственных и атрибутивных данных и базы знаний на основе использования принятых в системе запросов (триггеров, хранимых процедур), что существенно облегчает реализацию системы в целом и позволяет добиться целостности и непротиворечивости всех накопленных сведений в сфере обращения с отходами.

*Ключевые слова:* нечеткая логика, нечеткая база знаний, обработка нечетких пространственных данных, объекты размещения отходов.

## INFORMATION SYSTEM OF DECISION-MAKING SUPPORT ON WASTE MANAGEMENT WITHIN THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN

In article the principles of the knowledge base formation and processing of the waste management information based on fuzzy logic, and also integration aspects of the above-mentioned knowledge base in the automated decision-making support system on waste management within the territory of the Republic of Bashkortostan are considered.

The structure of heterogeneous data storage required to manage the objects involved in the field of waste management, where the most part of information characterizes geographically distributed objects is viewed. A simplified architecture of the system, the operation of which is ensured by the support for the Microsoft SQL Server and ArcSDE servers and by storage and multi-user access to data is presented. On the basis of the analysis it is suggested to use the concept of fuzzy relational databases, which can take into account discrepancies, uncertainties and the reliability of stored information, and extend the relational model to represent imprecise data and thus to achieve acceptable solutions.

The author has shown in detail how the fuzzy knowledge base about the placement of industrial waste can be determined by using a relational database to store fuzzy attributes – the whole body of knowledge is subdivided into several interrelated parts: input linguistic variables, output linguistic variables and rules of inference as well as the block of the knowledge base integration with informational objects stored in the database system. In general, the analyzed approach makes it possible on the basis of fuzzy logic to store experts' judgments, and use them in an automated decision making support system for waste management.

The interaction of spatial and attribute data and knowledge base through the use of accepted in the system requests (triggers, stored procedures) is achieved in the system due to a relational database representation of fuzzy knowledge base, that greatly facilitates the implementation of the system as a whole and allows for the integrity and consistency of all collected data in the waste management field.

*Key words:* fuzzy logic, fuzzy knowledge base, processing of fuzzy spatial data, waste disposal facility.

### *Введение*

В рамках деятельности по совершенствованию системы управления отходами в Республике Башкортостан с 2009 года проводится формирование и ведение Республиканского кадастра отходов – информационного ресурса Министерства природопользования и экологии РБ (Минэкологии РБ), предназначенного для накопления, анализа и распространения информации о состоянии сферы обращения с промышленными и бытовыми отходами на территории республики [1].

При оценке негативного влияния отходов на экологическое состояние прилегающих территорий, а также применения способов снижения указанного воздействия и обеспечения рационального хранения и переработки отходов появляется необходимость в совместной обработке разнородной информации, имеющей несколько составляющих:

- описательную информацию, включающую справочные сведения о характеристиках отходов, объектах их долговременного хранения, используемых установках переработки и обезвреживания;

- пространственную (картографическую) информацию о географическом положении объектов размещения, приема и первичной переработки отходов, а также различных административных, про-

мышленных, сельскохозяйственных и природных территорий;

- информацию, связанную с изменением во времени показателей образования, захоронения, утилизации и вторичной переработки отходов.

Между тем при практическом использовании перечисленной информации лицами, осуществляющими принятие решений и/или формирующими какие-либо экспертные выводы, возникает специфический вид новой информации, сочетающий как их знания и профессиональный опыт, так и имеющуюся в их распоряжении фактическую информацию. Содержащая суждения специалистов, такая информация часто выражает приблизительные оценки рассматриваемой ситуации, имеет неточный характер и представлена суждениями вида «*большой*», «*незначительный*», «*средний*». Ее учет и дальнейшее использование представляет определенную сложность, поскольку она не формализована и не структурирована, а существует в форме представлений специалистов-экспертов. Очевидно, что явное использование ранее разработанных и применявшихся для Республиканского кадастра отходов моделей и способов хранения данных не применимо для такого рода информации.

С другой стороны, при работе с информацион-

ными массивами, характеризующимися большим объемом и разнородностью обрабатываемых данных, наличием пространственной информации, применение известных подходов к проектированию и автоматизации информационного обеспечения для систем поддержки принятия решений, имеющих компоненты в виде экспертных знаний, сопряжено с трудностями методологического плана.

В этой связи авторы статьи сосредоточили свое внимание на ключевых аспектах формирования структуры базы нечетких знаний системы поддержки принятия решений по управлению отходами и ее интеграции с ранее разработанными базами данных Республиканского кадастра отходов.

#### *Особенности информационной системы Республиканского кадастра отходов*

Информационный массив Республиканского кадастра отходов состоит из трех взаимосвязанных частей, каждая из которых выделена в отдельную реляционную базу данных (рис. 1):

- сведения, имеющие непосредственное отношение к сфере обращения с отходами: каталог отходов, объекты размещения отходов, установки по утилизации отходов, разнообразные кодификаторы и классификаторы, исторические данные (БД<sub>1</sub>);

- информация, описывающая субъектов сферы обращения с отходами: юридических лиц, индивидуальных предпринимателей, их адреса и реквизиты, некоторые общероссийские классификаторы и справочники (БД<sub>2</sub>);

- пространственная информация о территории республики в составе электронных топографических карт, карт расположения объектов размещения, утилизации и переработки отходов, мест их временного складирования, особо охраняемых природных территорий и других карт (БД<sub>3</sub> или БПД).

Такое разграничение позволяет добиться некоторых преимуществ по сравнению с использованием единой базы данных:

- повышения гибкости в типовых задачах администрирования: резервирования, репликации, разграничения прав доступа;

- повышения надежности хранения данных за счет их частичной обособленности друг от друга;

- обеспечения независимого доступа к данным со стороны других информационных систем и программных приложений Минэкологии РБ или сторонних ведомств;

- сокращения аппаратных и программных ресурсов на хранение однотипной информации.



Рис. 1. Схема хранения информации Республиканского кадастра отходов

Для обеспечения ссылочной целостности, согласованности и непротиворечивости данных, обусловленных описанной организацией хранения данных, используются механизмы, реализованные с помощью триггеров и хранимых процедур. Ниже на рис. 2 приведен фрагмент информационной модели Республиканского кадастра отходов с некоторыми сущностями, которые относятся к отмеченным базам данных и между которыми установлены отношения «родитель» – «потомок».

Базы данных функционируют под управлением СУБД Microsoft SQL Server, причем хранение пространственной информации осуществляется в специализированной базе пространственных данных под управлением ArcGIS SDE (рис. 3).

Несмотря на комплексный и разносторонний характер информации Республиканского кадастра отходов, использование обычных реляционных структур для хранения данных имеет некоторые ограничения. Дело в том, что значения в отношении

состоят из конечного набора строго типизированных значений домена, что фактически означает абсолютную истинность заключений, которые формируются с использованием запросов к базам данным [3]. Такая детерминированность дает недостаточное представление о рассматриваемой области, предлагая в результатах выборки данных исключительно две крайние ситуации <записи, удовлетворяющие запросу> или <NULL> и игнорируя результаты с промежуточной истинностью.

Используя концепцию нечетких реляционных баз данных [3], можно учесть неточности, неопределенности и степень достоверности хранимой информации и расширить реляционную модель для представления неточных данных и таким образом обеспечить достижение приемлемых решений. Этот подход позволит на основе системы нечеткой логики хранить с помощью реляционных структур суждения экспертов и использовать их в автоматизированной системе поддержки принятия решений по управлению отходами.

Авторами предложено дальнейшее развитие информационной системы Республиканского кадастра отходов за счет реализации дополнительной реляционной базы данных, позволяющей хранить нечеткие атрибуты для баз данных БД<sub>1</sub>, БД<sub>2</sub> и БД<sub>3</sub> и формировать нечеткие логические выводы.

*Проектирование базы нечетких знаний на основе системы нечеткого вывода*

В работах [3, 4] показано, каким образом база

нечетких знаний (*FKB – fuzzy knowledge base*) может быть определена с помощью реляционной базы данных для хранения нечетких атрибутов и правил нечеткого вывода. Также отметим, что формирование системы нечеткого вывода является известной задачей и для обсуждаемой области представлено в [5, 6]. Рассмотрим основные составляющие системы нечеткого вывода:

- $R_I$  – часть базы знаний, содержащая набор входных лингвистических переменных  $A^{In} = \{A_q^{In}\}, q = \overline{1, n}$  и соответствующих им термножеств  $A_q^{In} \in T_q^{In} : T_q^{In} = \{a_l^{q,In}\}, l = \overline{1, s}$ ;
- $R_O$  – часть базы знаний, содержащая набор выходных лингвистических переменных  $A^{Out} = \{A_g^{Out}\}, g = \overline{1, r}$  и соответствующих им термножеств  $A_g^{Out} \in T_g^{Out} : T_g^{Out} = \{d_j^{g,Out}\}, j = \overline{1, m}$ ;
- $R_R$  – часть базы знаний, содержащая набор правил логического вывода вида ЕСЛИ – ТО, объединяющий  $R_I$  и  $R_O$ :

$$\text{ЕСЛИ } r_1 = a_l^{1,In} \text{ И } r_2 = a_l^{2,In} \text{ И...И } r_n = a_l^{n,In},$$

$$\text{то } y = d_j^{g,Out}, \tag{1}$$

где  $\{r_q\}, q = \overline{1, n}$  – некоторая числовая величина, поступающая на вход системы нечеткого вывода: расстояние от места захоронения отходов до водного объекта, объем накопленных отходов и др.

Таким образом, необходимо разработать такую реляционную структуру:

$$FKB = R_I \cup R_O \cup R_R, \tag{2}$$

которая будет обеспечивать целостность и непротиворечивость хранения всех составляющих системы

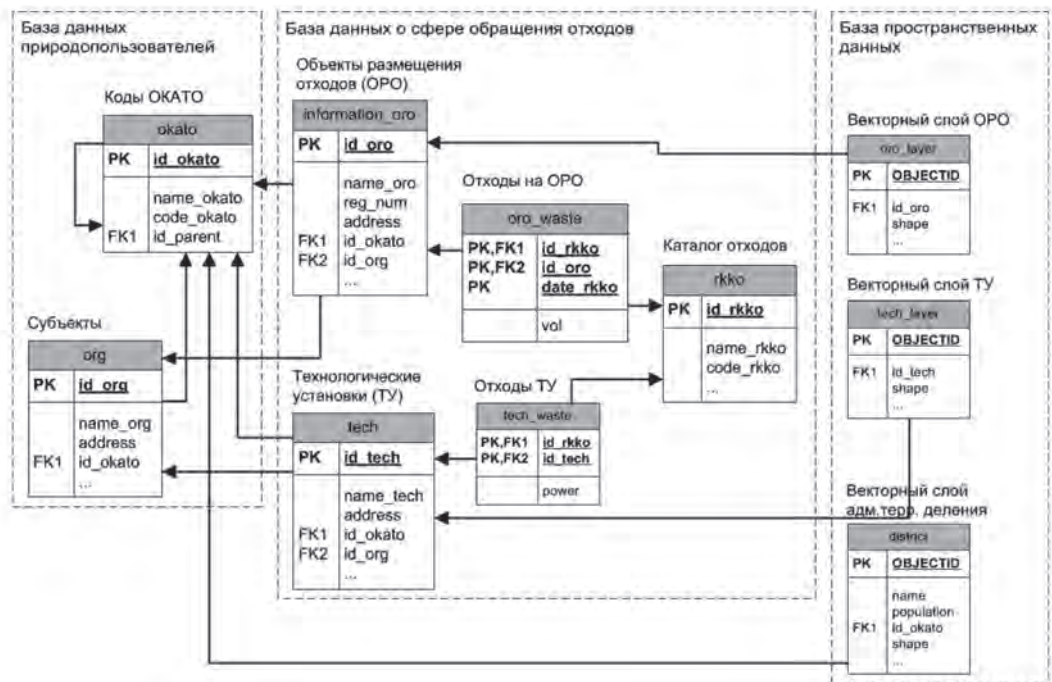


Рис. 2. Фрагмент информационной модели Республиканского кадастра отходов

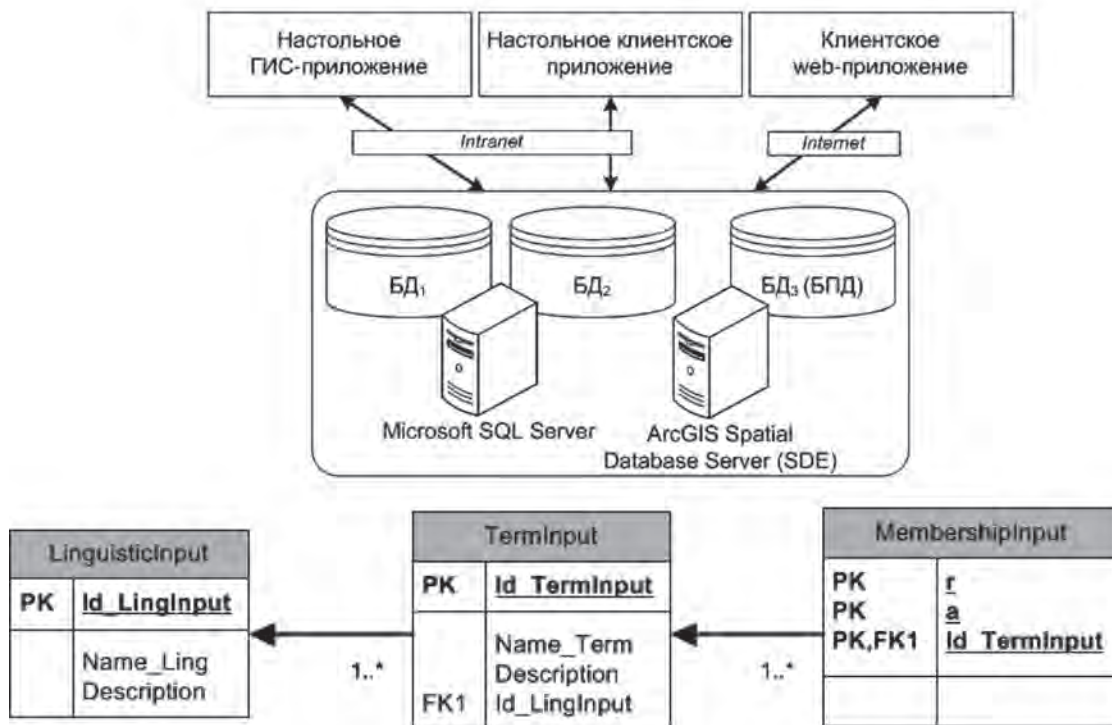


Рис. 3. Архитектура информационной системы Республиканского кадастра отходов

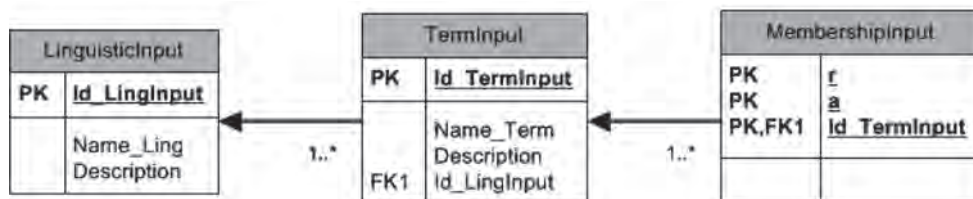


Рис. 4. Фрагмент  $R_I$  информационной модели базы нечетких знаний

нечеткого вывода. Последовательно рассмотрим информационные модели для хранения  $R_p$ ,  $R_o$  и  $R_r$ .

В составляющей  $R_I$  можно выделить три сущности, связанные отношением «один ко многим» (рис. 4):

- *LinguisticInput* – лингвистические переменные;
- *TermInput* – термины лингвистических переменных;
- *MembershipInput* – функции принадлежности, заданные в табличном виде.

Например, для лингвистической переменной  $A_1$  – «Расстояние до населенного пункта» термины из множества  $\{a_1^1(\text{близко}), a_1^2(\text{недалеко}), a_1^3(\text{далеко})\}$  могут быть заданы с помощью трех предварительно определенных функций принадлежности (рис. 5). В этом случае нечеткость информации будет представлена записями так, как показано на рис. 6.

Отметим здесь, что предлагаемая структура хранения обеспечивает однозначное определение

по предъявленному терму  $a_i^q$  соответствующей ему лингвистической переменной  $A_q$ . Другими словами, в дальнейшем можно оперировать только идентификаторами термов.

Очевидно, что структура  $R_o$  аналогична  $R_I$  и также состоит из трех сущностей:

- *LinguisticOutput* – выходные лингвистические переменные;
- *TermOutput* – термины выходных лингвистических переменных;
- *MembershipOutput* – функции принадлежности для выходных числовых величин.

Далее, для формирования в реляционной форме составляющей  $R_r$  системы нечеткого вывода необходимо установить отношения между наборами правил *Rules* и логических выводов *Output* с помощью термов входной и выходной лингвистических переменных (рис. 7). Мощность отношений между ними обусловлена MISO-структурой [2] – «много входов – один выход».

Применение базы нечетких знаний в реальных ситуациях обеспечивается взаимосвязью информационных объектов, содержащихся в базах данных БД<sub>1</sub>, БД<sub>2</sub> и БД<sub>3</sub> (объектов размещения отходов, установок по утилизации отходов и др.) с системой нечеткого вывода. В свою очередь, это достигается с помощью вспомогательных сущностей (рис. 8):

- *SurveyAreas* – участков территорий, представленных в виде полигональных пространственных объектов электронной карты;

- *LinguisticSet* – совокупности лингвистических переменных, использование которых для данного участка оправданно.

Таким образом, процесс формирования выводов с использованием нечетких знаний в моди-

фицированной информационной системе Республиканского кадастра отходов (рис. 9) состоит из следующих этапов:

- настройки системы нечеткого вывода и наполнения базы нечетких знаний;

- ограничения и создания участка территории, для которого следует провести анализ;

- формирования ограниченного набора входных лингвистических переменных из всего располагаемого множества таких переменных;

- определения фактических числовых величин, соответствующих отобранным переменным;

- определения степени уверенности пригодности рассматриваемого участка территории целям анализа с помощью SQL-запросов к базам данным.

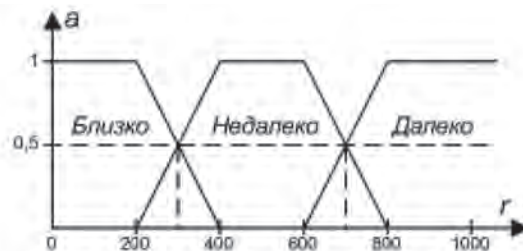


Рис. 5. Функции принадлежности для лингвистической переменной  $A_1$

<i>LinguisticInput</i>			
Id_LingInput	Name_Ling	Description	
1	$A_1$	Расстояние до населенного пункта	
2	$A_2$	...	

<i>TermInput</i>			
Id_TermInput	Name_Term	Description	Id_LingInput
1	$a_1^1$	Близко	1
2	$a_2^1$	Недалеко	1
3	$a_3^1$	Далеко	1
4	$a_1^2$	...	2
5	$a_2^2$	...	2

<i>MembershipInput</i>		
r	a	Id_TermInput
0	1	1
200	1	1
300	0.5	1
400	0	1
200	0	2
300	0.5	2
400	1	2
600	1	2
700	0.5	2
800	0	2
600	0	3
700	0.5	3
800	1	3

Рис. 6. Записи, кодирующие нечеткую информацию



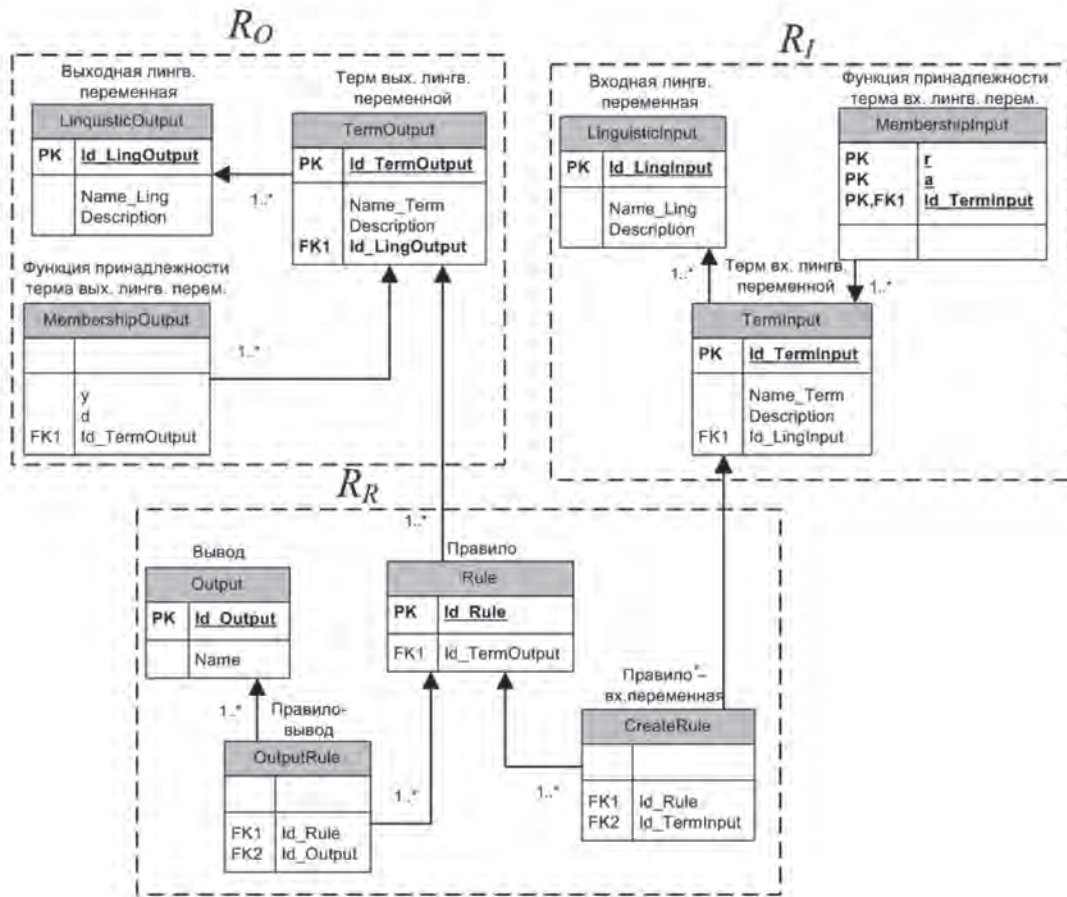


Рис. 7. Информационная модель базы нечетких знаний

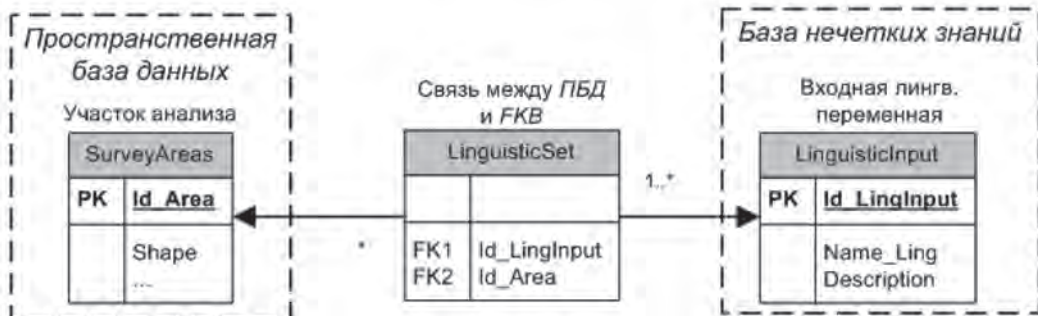


Рис. 8. Фрагмент модифицированной информационной модели



Рис. 9. Схема модифицированной архитектуры информационной системы

### Заключение

В статье предложено развитие существующего подхода организации системы поддержки принятия решений при управлении отходами в сторону новых, более продвинутых технологий, основанных на методах нечеткой логики, что позволит существенно улучшить и упростить процесс оценки негативного влияния отходов на окружающую среду, более эффективно обеспечивать рациональное использование и хранение отходов промышленных предприятий.

Предложенная организация базы нечетких знаний при помощи реляционного подхода позволит использовать ее в составе организованной структуры хранения данных о сфере обращения с отходами. Благодаря чему достигается взаимодействие базы пространственных и атрибутивных данных и базы знаний на основе использования принятых в системе запросов (триггеров, хранимых процедур), что существенно облегчает реализацию системы в целом и позволяет добиться целостности и непротиворечивости всех накопленных сведений в сфере обращения с отходами.

### Список литературы

1. *Абдуллин А.Х.* Автоматизация формирования и ведения Республиканского кадастра отходов производства и потребления [Текст] / А.Х. Абдуллин, З.Л. Давлетбакова, Г.Ф. Закиева // Табигат: науч.-практ. эколог. журнал. – 2010 – № 9 (104). – С. 14–15.
2. *Zimmermann H.-J.* Fuzzy set theory and its applications. 4th. ed [Text] / H.-J. Zimmermann. – Boston: Kluwer Academic Publishers Norwell, 2001. – 544 p.
3. *Frederick E. Petry.* Fuzzy Databases: Principles and Applications [Text] / E. Petry Frederick. – Boston: Kluwer Academic Publishers Norwell, 1996. – 240 p.
4. *Robinson V.* On Fuzzy Sets and the Management of Uncertainty in an Intelligent Geographic Information System [Text] / V. Robinson // Recent Issues on Fuzzy Databases; editors G. Bordogna, G. Pasi. – Heidelberg: Physica-Verlag, 2000. – P. 109–128.

5. *Абдуллин А.Х.* Планирование границ санитарно-защитных зон в ArcGIS с использованием инструментов нечеткой логики [Текст] / А.Х. Абдуллин, З.Л. Давлетбакова, С.В. Павлов // ArcReview. – 2012. – № 3 (62) – С. 36–47.

6. *Давлетбакова З.Л.* Нечеткие модели при осуществлении природоохранной деятельности [Текст] / З.Л. Давлетбакова // Труды Международной конференции «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений». – Уфа: УГАТУ, 2013. – С. 5–9.

### References

1. *Abdullin A.H.* Avtomatizacija formirovanija i vedenija Respublikanskogo kadastra othodov proizvodstva i potreblenija [Tekst] / A.H. Abdullin, Z.L. Davletbakova, G.F. Zakieva // Tabigat: nauch.-prakt. jekolog. zhurnal. – 2010. – № 9 (104). – S. 14–15.
2. *Zimmermann H.-J.* Fuzzy set theory and its applications. 4th.ed [Text] / H.-J. Zimmermann. – Boston: Kluwer Academic Publishers Norwell, 2001. – 544 p.
3. *Frederick E. Petry.* Fuzzy Databases: Principles and Applications [Text] / E. Petry Frederick. – Boston: Kluwer Academic Publishers Norwell, 1996. – 240 p.
4. *Robinson V.* On Fuzzy Sets and the Management of Uncertainty in an Intelligent Geographic Information System [Text] / V. Robinson // Recent Issues on Fuzzy Databases; editors G. Bordogna, G. Pasi. – Heidelberg: Physica-Verlag, 2000. – P.109–128.
5. *Abdullin A.H.* Planirovanie granic sanitarno-zashhitnyh zon v ArcGIS s ispol'zovaniem instrumentov nechetkoj logiki [Tekst] / A.H. Abdullin, Z.L. Davletbakova, S.V. Pavlov // ArcReview. – 2012. – № 3 (62) – S. 36–47.
6. *Davletbakova Z.L.* Nechetkie modeli pri osushhestvlenii prirodoohrannoj dejatel'nosti [Tekst] / Z.L. Davletbakova // Trudy Mezhdunarodnoj konferencii «Informacionnye tehnologii intellektual'noj podderzhki prinjatija reshenij». – Ufa: UGATU, 2013. – S. 5–9.



**Журавлева Н.А.**  
**Zhuravleva N.A.**

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



**Доломатов М.Ю.**  
**Dolomatov M.Yu.**

кандидат технических наук, доктор химических наук, профессор кафедры «Физика» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», руководитель лаборатории «Электроника и нанотехнологии», Россия, г. Уфа



**Мартынов В.В.**  
**Martynov V.V.**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экономическая информатика» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», директор Башкирского РЦНИТ УГАТУ, Россия, г. Уфа



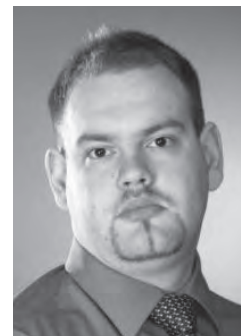
**Филосова Е.И.**  
**Filosova E.I.**

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



**Ширяев О.В.**  
**Shiryaev O.V.**

ассистент кафедры «Экономическая информатика» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа



**Швецов А.И.**  
**Shvetsov A.I.**

ассистент кафедры «Экономическая информатика» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа

УДК 004; 316.48; 351.746.1

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЯ СОЦИАЛЬНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ**

В настоящее время регулярная оценка уровня социальной напряженности государственными органами Российской Федерации отсутствует, она проводится только в исследованиях ученых. Однако существующая напряженность в обществе наблюдается как в регионах, в целом в России, так и в большинстве других стран мира. В связи с этим задача обеспечить органы власти и управления диагностическим и прогностическим инструментом оценки уровня социальной напряженности является актуальной. Целью статьи является разработка информационной системы оценки уровня социальной напряженности. Анализ литературы показал, что до настоящего времени как в России, так и за рубежом

отсутствует информационная система для осуществления контроля и непрерывного слежения за динамикой социальной напряженности. Представленная в данной работе информационная система расчета социальной напряженности выполнена на языке высокого уровня PHP, позволяет вести базу данных MySQL. Информационная система оценки уровня социальной напряженности общества состоит из модуля расчета параметров распределения доходов населения, модуля расчета интегрального показателя уровня социальной напряженности и модуля отчетов для просмотра значений показателей в динамике. Модуль расчета параметров распределения доходов населения позволяет рассчитать показатель уровня социальной напряженности по дифференциации доходов населения. Модуль расчета интегрального показателя уровня социальной напряженности позволяет выполнять расчет комплексного показателя социальной напряженности на основе энтропийного подхода с учетом ряда факторов, оказывающих наибольшее влияние на степень неудовлетворенности в обществе. В модуле отчетов для просмотра значений показателей в динамике заложена возможность отбора требуемых данных по временному и региональному факторам. Система рекомендуется к использованию в органах государственной статистики и исполнительной власти и направлена на повышение степени и своевременности осведомленности ответственных за принятие решений лиц государственных служб об уровне социальной напряженности в регионах и Российской Федерации в целом, а также на увеличение адекватности и надежности показателей социальной напряженности.

*Ключевые слова:* информационная система, социальная напряженность, оценка, прогнозирование, распределение доходов.

## INFORMATION SYSTEM OF AN ASSESSMENT AND FORECASTING OF SOCIAL TENSION LEVEL

At present time the regular assessment of social tension level by public authority of Russian Federation is absent, it is carried out only in researches of scientists. However, existing intensity in society is observed as in regions, as a whole in Russia, and in the majority of other countries of the world. Therefore to provide the government authority and management bodies with the diagnostic and predictive tool of an social tension level assessment is of current importance. The purpose of research is creation of information system of an social tension level assessment. The literature analysis showed that so far as in Russia and abroad there is no information system for control and continuous tracking dynamics of social tension. The information system of social tension calculation presented in this work is executed in language of the high level PHP, allows to conduct the MySQL database. Information system of an social tension level assessment society consists of three modules: the module of calculation of income distribution parameters, the module of an integrated indicator of social tension level calculation and the module of reports for viewing the indicators values in dynamics. The module of calculation of income distribution parameters allows to calculate the indicator of social tension level on income differentiation. The module of an integrated indicator of social tension level calculation allows to carry out calculation of the complex indicator of social tension on the basis of entropy approach taking into account a number of the factors having the greatest impact on degree of a dissatisfaction in society. In the module of reports for viewing the indicators values in dynamics is put the possibility of demanded data selection on temporary and regional factors. The system is recommended to use in bodies of the state statistics and executive power and is directed on increase of degree and timeliness of persons awareness, who are responsible for decision-making on social tension level normalization in regions and the Russian Federation in whole, and also on increase in adequacy and reliability of social tension indicators.

*Key words:* information system, social tension (inequality), assessment, forecasting, income distribution.

Разработка автоматизированной информационной системы оценки социальной напряженности является важнейшей задачей служб безопасности, социальных технологий и политологии [1]. Несмотря на наличие работ в этой области задача является актуальной, так как такие информационные системы отсутствуют.

Задачей статьи является разработка информационной системы оценки уровня социальной напряженности с целью предотвращения возникновения конфликтных ситуаций.

В основе информационной системы проводится расчет комплексного показателя уровня социальной напряженности по разработанной авторами методи-

ке [2–5], представленного в виде модели:

$$H_c = \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \quad (1)$$

где  $p_i$  – вероятность уровня  $i$ -го фактора, влияющего на уровень социальной напряженности.

Уровень социальной напряженности является критическим при достижении значения 0,33 [6].

Изучение отечественных и зарубежных источников информации в области дифференциации доходов населения и социальной напряженности, статистических и методических материалов Госкомстата, Всероссийского центра изучения общественного мнения (ВЦИОМ), Всероссийского центра уровня жизни (ВЦУЖ) и данных статистических ежегодников Госкомстата РФ позволило сделать вывод, что на данный момент отсутствует информационная система оценки уровня социальной напряженности.

Наиболее близкими информационными системами к разрабатываемой являются программные продукты ВЦУЖ: Автоматизированный программно-методический комплекс «Уровень жизни», Программный комплекс «Адресная социальная поддержка населения» и Автоматизированная информационно-расчетная система «Зарплата» (<http://www.vcug.ru/program.html>), также информационные системы Тульского проектного конструкторско-технологического института ав-

томатизированных систем управления: Автоматизированная информационная система (АИС) «Адресная социальная помощь», АИС «Региональное социальное законодательство», АИС «Прожиточный минимум», программный комплекс «Модельные методики автоматизированного учета доходов и уровня жизни населения» и программное обеспечение международной компании SPSS Inc. со штаб-квартирой в США: программное обеспечение для государственного управления (<http://www.predictivesolutions.ru/atwork/government.htm>), также программный продукт DAD (Distributive analysis/Analyse distributive) [7].

В перечисленных выше программных продуктах отсутствует расчет социальной напряженности. Таким образом, согласно проведенному литературному обзору было выявлено, что на настоящее время отсутствует информационная система, которая позволит проводить оперативную оценку социальной напряженности для проведения своевременной социальной политики, кроме того, регулярная оценка социальной напряженности государственными органами не проводится.

Представленная в данной работе информационная система расчета социальной напряженности выполнена на языке высокого уровня PHP, позволяет вести базу данных MySQL. Интерфейс программы показан на рисунке 1.

Введите параметры фильтрации. Несколько параметров вводите через "пробел"  
Ингушетия

Страна	Год	Показатель социальной напряженности	Уровень социальной напряженности	Энтропия
Ингушетия	2000	0,76341894	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,5701103
Ингушетия	1999	0,71110954	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,6090940
Ингушетия	1995	0,57832095	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,4519243
Ингушетия	1998	0,74399438	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,4851041
Ингушетия	1997	0,66111025	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,4440675
Ингушетия	1996	0,76672244	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,3346133
Ингушетия	2001	0,71850390	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,6541118
Ингушетия	2002	0,60499390	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,7418596
Ингушетия	2003	0,64420825	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,7734569
Ингушетия	2004	0,61544811	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,8096281
Ингушетия	2005	0,43766387	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,9142932
Ингушетия	2006	0,55676794	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,9168144
Ингушетия	2007	0,41692136	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,9928523
Ингушетия	2008	0,21392136	НОРМАЛЬНЫЙ	-1,9531244
Ингушетия	2009	0,24384703	НОРМАЛЬНЫЙ	-1,9676859
Ингушетия	2010	0,15556324	НОРМАЛЬНЫЙ	-1,9035083
Ингушетия	2011	0,09877044	НОРМАЛЬНЫЙ	-1,4179698
Ингушетия	2012	0,09877044	НОРМАЛЬНЫЙ	-1,4279921

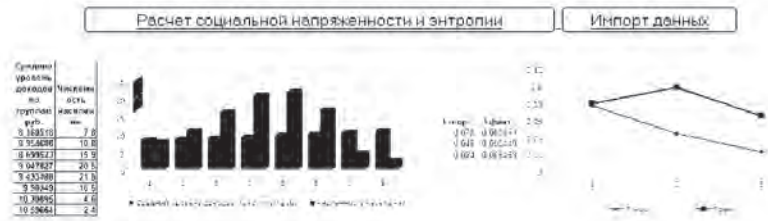


Рис. 1. Интерфейс информационной системы расчета уровня социальной напряженности

Информационная система оценки уровня социальной напряженности общества для предотвращения конфликтных ситуаций состоит из следующих компонент (рис. 2):

- а) модуль расчета параметров распределения доходов населения;
- б) модуль расчета показателя уровня социальной напряженности;
- в) модуль – отчеты для просмотра значений показателей в динамике.

а) модуль расчета параметров распределения

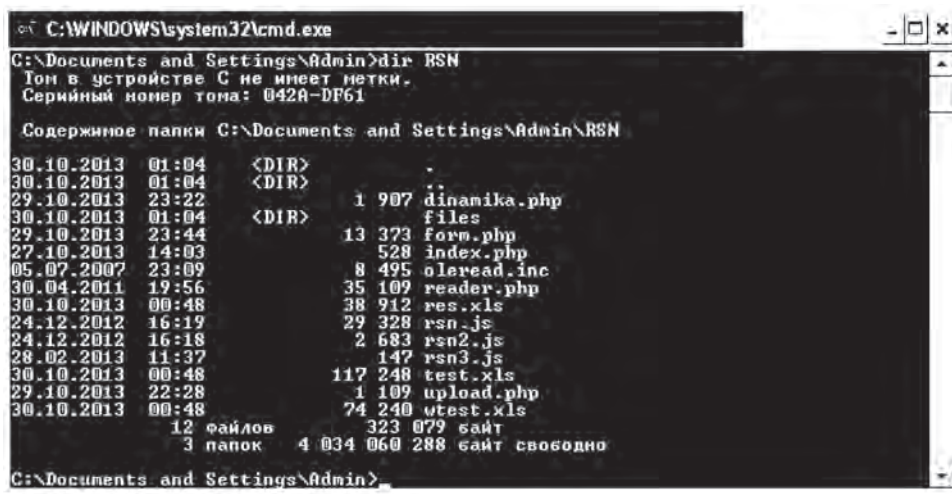


Рис. 2. Компоненты информационной системы расчета уровня социальной напряженности

Информационная система оценки уровня социальной напряженности общества для предотвращения конфликтных ситуаций (волнений, гражданских войн) в Российской Федерации функционирует на технических средствах: ПК IBMPC (или совместимым с ним оборудованием) с параметрами не менее: ОЗУ 128 Мб, процессор IntelPentium – 233 МГц, объем жесткого диска 500 МБ и выше, под управ-

лением операционной системы семейства Windows. *Входные и выходные данные.* В качестве входных данных используются данные о распределении доходов населения (например, представленные в открытой базе данных Госкомстата) в формате \*.xls определенного шаблона (рис. 3). Результат импортирования исходных данных представлен на рисунке 4.

Средний уровень доходов по группам руб.	Численность населения	Социальная напряженность	Введите название фактора	Введите название фактора	Введите название фактора	Год	Субъект
		текущ2013 макс					

Данные вносить строго в ячейки следующего формата:

Рис. 3. Шаблон для заполнения исходных данных

### Файл успешно импортирован

#### Информация об импортированном файле:

Оригинальное имя импортированного файла: test.xls

Mime-тип импортированного файла: application/vnd.ms-excel

Размер импортированного файла в байтах: 116736

Временное имя импортированного файла: Z:\tmp\php1F5.tmp

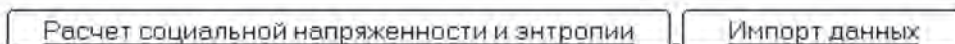


Рис. 4. Результат импорта исходных данных

Введите параметры фильтрации. Несколько параметров вводите через "пробел"  
Ингушетия

Страна	Год	Показатель социальной напряженности	Уровень социальной напряженности	Энтропия
Ингушетия	2000	0,76341894	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,5701103
Ингушетия	1999	0,71110954	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,6090940
Ингушетия	1995	0,57832095	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,4519243
Ингушетия	1998	0,74399438	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,4851041
Ингушетия	1997	0,66111025	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,4440675
Ингушетия	1996	0,76672244	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,3346133
Ингушетия	2001	0,71850390	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,6541118
Ингушетия	2002	0,60499390	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,7418596
Ингушетия	2003	0,64420825	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,7734569
Ингушетия	2004	0,61544811	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,8096281
Ингушетия	2005	0,43766387	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,9142932
Ингушетия	2006	0,55676794	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,9168144
Ингушетия	2007	0,41692136	КРИТИЧЕСКИЙ	-1,9928523
Ингушетия	2008	0,21392136	НОРМАЛЬНЫЙ	-1,9531244
Ингушетия	2009	0,24384703	НОРМАЛЬНЫЙ	-1,9676859
Ингушетия	2010	0,15556324	НОРМАЛЬНЫЙ	-1,9035083
Ингушетия	2011	0,09877044	НОРМАЛЬНЫЙ	-1,4179698
Ингушетия	2012	0,09877044	НОРМАЛЬНЫЙ	-1,4279921

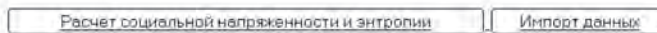


Рис. 5. Результаты расчета социальной напряженности

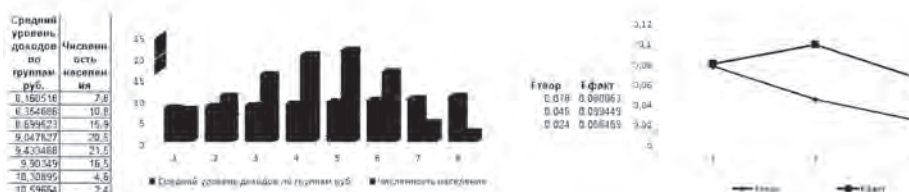


Рис. 6. Визуализация результатов

Выходные данные экспортируются в Microsoft Excel 2010 (версии 14 и выше) в форматах \*.xls или \*.xlsx.

Разработанная информационная система обеспечила:

1) автоматизированный сбор значений входных параметров из открытых источников, что позволит за счет исключения ручного ввода и потенциальных ошибок оператора, соответственно необходимости введения процедур контроля и коррекции, ускорить не менее чем в 3 раза процесс получения информации, увеличить не менее чем в 1,5 раза ее достоверность;

2) функцию автосохранения материалов при возникновении программно-аппаратных сбоев, что позволит посредством записи через устанавливаемые пользователем промежутки времени уменьшить на 25% вероятность ее утраты, соответственно проведения работ по восстановлению утраченных материалов;

3) выбор формата визуализации результатов, что позволит в 3–5 раз сократить время и средства на конвертацию в необходимый формат за счет уменьшения затрат рабочего времени на поиск конвертирующего программного обеспечения и самого процесса конвертации;

4) сокращение трудозатрат на расчет показателя уровня социальной напряженности за счет использования разработанной программной реализации не менее чем в 2 раза в отличие от применяемого сейчас метода расчета социальной напряженности по результатам социологических опросов;

5) создание отчетов для просмотра значений показателей в динамике (модуль отчетов для просмотра значений показателей в динамике реализован на языке Java).

С помощью разработанной информационной системы были проведены расчеты социальной напряженности в республике Ингушетия за 1995–2005 годы (рис. 5), визуализированы результаты (рис. 6).

Таким образом, разработанная информационная система позволяет оценивать и прогнозировать уровень социальной напряженности с целью предотвращения возникновения конфликтных ситуаций. В программе предусмотрены расчеты по предлагаемой авторами новой методике. Данная информационная система позволит проводить оперативную регулярную оценку уровня социальной напряженности для проведения своевременной политики.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по государственному контракту от*

*10.10.2013 г. № 14.514.11.4113 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».*

#### Список литературы

1. Пирогов И.В. Социальная напряженность: Теория, методология и методы измерения: Дис. ... канд. соц. наук [Текст] / И.В. Пирогов. – Иваново, 2002. – 177 с.

2. Доломатов М.Ю. Фрагменты теории реального вещества. От углеводородных систем к галактикам [Текст] / М.Ю. Доломатов. – М.: Химия, 2005. – 208 с.

3. Доломатов М.Ю. К вопросу о применимости нормального распределения к экономическим статистическим моделям [Текст] / М.Ю. Доломатов, Г.Н. Шутько, А.А. Шемякин // Тез. докл. международной теоретической конференции. – Уфа: УТИС, 1995. – С. 137–138.

4. Доломатов М.Ю. Об аналогии законов равновесной термодинамики в сложных экономических и природных системах [Текст] / М.Ю. Доломатов // Сборник трудов Международной научно-практической конференции: Актуальные проблемы методологии, философии науки и образования. – М.; Уфа: АТиСО, 2007. – Т. 1. – 184 с. – С. 43–48.

5. Доломатов М.Ю. Программа оценки социальной напряженности в регионах [Текст] / М.Ю. Доломатов, Н.А. Журавлева // Сборник трудов XIII Международной конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии». – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2013.

6. Яновский Р.Г. Глобальные изменения и социальная безопасность [Текст] / Р.Г. Яновский. – М.: Academia, 1999. – 44 с.

7. Duclos Jean-Yves Poverty and equity: measurement, policy and estimation with DAD [Text] / Jean-Yves Duclos, Abdelkrim Araar. – Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 2006. – 393 с.

#### References

1. Pirogov I.V. Social'naja naprjazhennost': Teorija, metodologija i metody izmerenija: Dis. ... kand. soc. nauk [Tekst] / I.V. Pirogov. – Ivanovo, 2002. – 177 s.

2. Dolomatov M.Ju. Fragmenty teorii real'nogo veshhestva. Ot uglevodородnyh sistem k galaktikam [Tekst] / M.Ju. Dolomatov. – M.: Himija, 2005. – 208 s.

3. Dolomatov M.Ju. K voprosu o primenimosti normal'nogo raspredelenija k jekonomicheskim statisticheskim modeljam [Tekst] / M.Ju. Dolomatov,



G.N. Shut'ko, A.A. Shemjakin // Tez. dokl. mezhdunarodnoj teoreticheskoj konferencii. – Ufa: UTIS, 1995. – S. 137–138.

4. Dolomatov M.Ju. Ob analogii zakonov ravnovesnoj termodinamiki v slozhnyh jekonomicheskikh i prirodnyh sistemah [Tekst] / M.Ju. Dolomatov // Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: Aktual'nye problemy metodologii, filosofii nauki i obrazovanija. – M.; – Ufa: ATiSO, 2007. – T. 1. – 184 s. – S.43–48.

5. Dolomatov M.Ju. Programma ocenki social'noj naprjazhennosti v regionah [Tekst] / M.Ju. Dolomatov,

N.A. Zhuravleva // Sbornik trudov XIII Mezhdunarodnoj konferencija «Informatika: problemy, metodologija, tehnologii». – Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj universitet, 2013.

6. Janovskij R.G. Global'nye izmenenija i social'naja bezopasnost' [Tekst] / R.G. Janovskij. – M.: Academia, 1999. – 44 s.

7. Duclos Jean–Yves Poverty and equity: measurement, policy and estimation with DAD [Text] / Jean-Yves Duclos, Abdelkrim Araar. – Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 2006. – 393 s.



**Шулаева Е.А.**  
**Shulaeva E.A.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Автоматизиро-  
ванные технологические и информа-  
ционные системы»  
Стерлитамакского филиала ФГБОУ  
ВПО «Уфимский государственный  
нефтяной технический универси-  
тет», Россия, г. Стерлитамак



**Даминев Р.Р.**  
**Damintv R.R.**

доктор технических наук,  
профессор, директор  
Стерлитамакского филиала  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государ-  
ственный нефтяной технический  
университет», Россия,  
г. Стерлитамак



**Исламутдинова А.А.**  
**Islamutdinova A.A.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Общая  
химическая технология»  
Стерлитамакского филиала  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государ-  
ственный нефтяной технический  
университет», Россия,  
г. Стерлитамак

УДК 004.457

## ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ИМИТАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ РАСПРОСТРАНЕННЫХ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА ВИНИЛАЦЕТАТА

Винилацетат является одним из важнейших мономеров, производство которого во всем мире возрастает быстрыми темпами, является сырьем в производстве поливинилацетата, поливинилового спирта, поливинилацеталей, сополимеров и др., используемых в производстве лаков, красок, клеев, волокон, лекарственных средств и т. д. Компьютерное моделирование процесса синтеза винилацетата, реализованное в рассматриваемом имитационно-моделирующем комплексе, способствует формированию компетенций выпускников технических вузов и повышению качества их подготовки и конкурентоспособности, а также позволяет: изучать перспективные технологии синтеза винилацетата методом ацетоксилирования; моделировать и анализировать оптимальные условия проведения процесса с возможностью интерактивного изменения и расчета значений основных технологических параметров; проводить

построение графиков зависимостей выбранного выходного параметра процесса от выбранного входного параметра с возможностью увеличения в необходимой области для более точного исследования; разрабатывать архитектуру и состав технических средств автоматизированной системы управления технологического процесса с помощью интерактивной функциональной схемы автоматизации с интегрированной базой средств автоматизации и их характеристик; визуализировать в трехмерном представлении реакционную установку для отображения размещения оборудования, трубопроводов и исполнительных механизмов; создавать отчеты, включающие все основные параметры проведения процессов и результаты расчетов. Применение имитационно-моделирующего комплекса «Синтез винилацетата на основе этилена» позволит студентам в процессе обучения приобретать навыки управления технологическим процессом синтеза винилацетата, создавать автоматизированную систему управления процессом, что в целом повысит качество обучения студентов и конкурентную способность инженерно-технического персонала.

*Ключевые слова:* синтез винилацетата, имитационно-моделирующий комплекс, моделирование, функциональная схема автоматизации, средства автоматизации, контур регулирования.

## FEATURES OF IMITATIONAL MODELING COMPLEX PREVALENT PETROCHEMICAL PROCESSES ON THE EXAMPLE OF VINYL ACETATE SYNTHESIS

Vinyl acetate is one of the major monomers, which production worldwide growing rapidly, is the raw material in the production of polyvinyl acetate, polyvinyl alcohol, polyvinyl copolymers, etc., used in the production of varnishes, paints, adhesives, fibers, drugs, etc. The simulation of vinyl acetate synthesis, simulation and implemented the considered modeling complex contributes to the formation of competencies of graduates of technical universities and improve the quality of their training and competitiveness, as well as allows you to: explore emerging technologies vinyl acetate synthesis method acetoxylation, simulate and analyze the optimal process conditions with the possibility of interactive changes and calculating the values of the main technological parameters; spend plotting the selected output parameter of the process on the selected input parameter with the option to increase in the required area for more precise research, to develop the architecture and composition of the technical means of automated control system of technological process with the help of an interactive functional circuit with integrated automation base of automation and their characteristics; visualize the three-dimensional representation of reaction unit to display the placement of equipment, pipelines and actuators, create reports, including all the major parameters of the processes and results of the calculations. The use of simulation and modeling complex «Synthesis of ethylene vinyl acetate» will allow students in learning to learn skills of process control vinyl acetate synthesis, creating an automated process control system, which generally improve the quality of student learning and the competitiveness of the engineering staff.

*Key words:* vinyl acetate synthesis, simulation and modeling complex, simulation, functional layout automation, automation, control loop.

В настоящее время системы имитационного моделирования являются наиболее эффективным средством исследования сложных систем. В отличие от традиционного аналитического моделирования принцип имитационного основывается на том, что математическая модель воспроизводит процесс функционирования во времени, причем имитируются элементарные события, протекающие в системе с сохранением логики их взаимодействия [1].

Использование имитационно-моделирующего комплекса (ИМК) «Синтез винилацетата на основе этилена» [2, 3] в процессе обучения и тренировки инженерно-технического персонала повышает безопасность реальных технологических процессов за

счет отработки навыков их проведения в штатных режимах (рис. 1).

Существует ряд аналогов, рассматриваемого имитационно-моделирующего комплекса, разработчиками которых являются крупные фирмы, специализирующиеся на разработке программного обеспечения, предназначенного для использования в промышленной сфере, включая подготовку специалистов в той или иной отрасли. Как правило, такие продукты технически крайне сложны и управлять ими могут только хорошо подготовленные специалисты. К тому же их цена составляет несколько тысяч долларов.

Обзор литературных источников [4, 5] и анализ

работы действующих производств по получению винилацетата показали, что наиболее прочные пози-

ции в промышленности занимает парофазный синтез винилацетата из этилена.

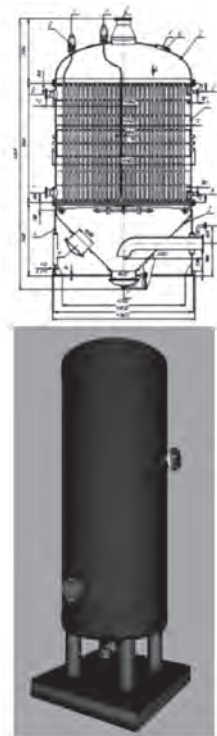
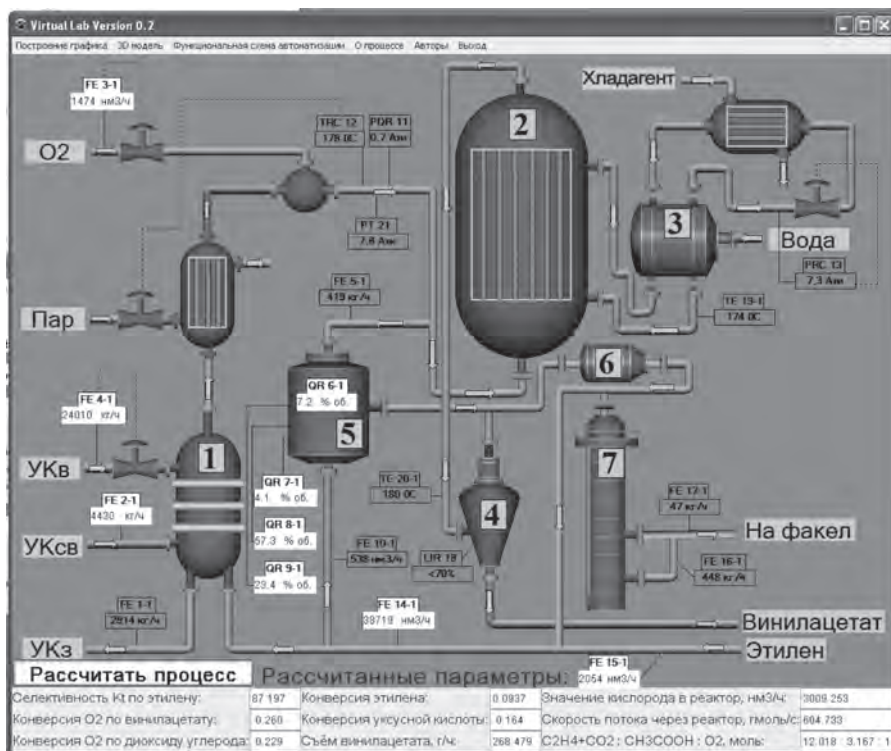


Рис. 1. Рабочее окно программы, окно с описанием реактора винилацетата и его 3D-модель

Используемая упрощенная функциональная схема автоматизации (ФСА), представленная на рис. 2, предполагает осуществление надежного и быстрого автоматического контроля за важнейшими показателями процесса синтеза конверсией кислорода, этилена и уксусной кислоты, селективностью катализатора по этилену, съемом винилацетата, обеспечение возможности оптимального управления процессом синтеза винилацетата путем надежного поддержания съема винилацетата и перепада температуры в реакторе на заданном уровне, что позволяет увеличить производительность установки по винилацетату и снизить себестоимость винилацетата.

ФСА состоит (рис. 2) из узла подготовки парогазовой смеси 1, реактора синтеза винилацетата 2, паросборника реактора 3, узла отделения циркуляционного газа от жидких продуктов синтеза 4, анализаторной 5, узла компримирования циркуляционного газа 6, узла очистки циркуляционного газа от инертных и диоксида углерода 7, теплообменников 8 и 9.

Расход свежей уксусной кислоты в узел 1 подготовки парогазовой смеси измеряют и регулируют автоматизированным контуром 3. Расход возвратной уксусной кислоты в узел 1 измеряют и регулируют автоматизированным контуром 4. Расход уксусной

кислоты из узла подготовки парогазовой смеси на очистку от высококипящих соединений измеряется автоматизированным контуром 1. Расход циркуляционного газа в узел подготовки парогазовой смеси измеряется автоматизированным контуром 14, а расходы циркуляционного газа и парогазовой смеси на анализ измеряются соответственно автоматизированными контурами 10 и 5. Расход этилена на подпитку циркуляционного газа измеряется автоматизированным контуром 15, расходы на факел диоксида углерода и циркуляционного газа из узла 7 измеряются соответственно автоматизированными контурами 16 и 17.

Содержание кислорода, этилена, диоксида углерода в циркуляционном газе измеряется автоматизированными контурами 7, 8, 9, содержание кислорода в парогазовой смеси измеряется автоматизированным контуром 6.

Температура парогазовой смеси на входе в реактор измеряется и регулируется автоматизированным контуром 12.

Давление парогазовой смеси на входе в реактор измеряется автоматизированным контуром 21, а перепад давления на реакторе – контуром 11.

Температура хладагента, поступающего в рубашку реактора из паросборника 3, измеряется ав-

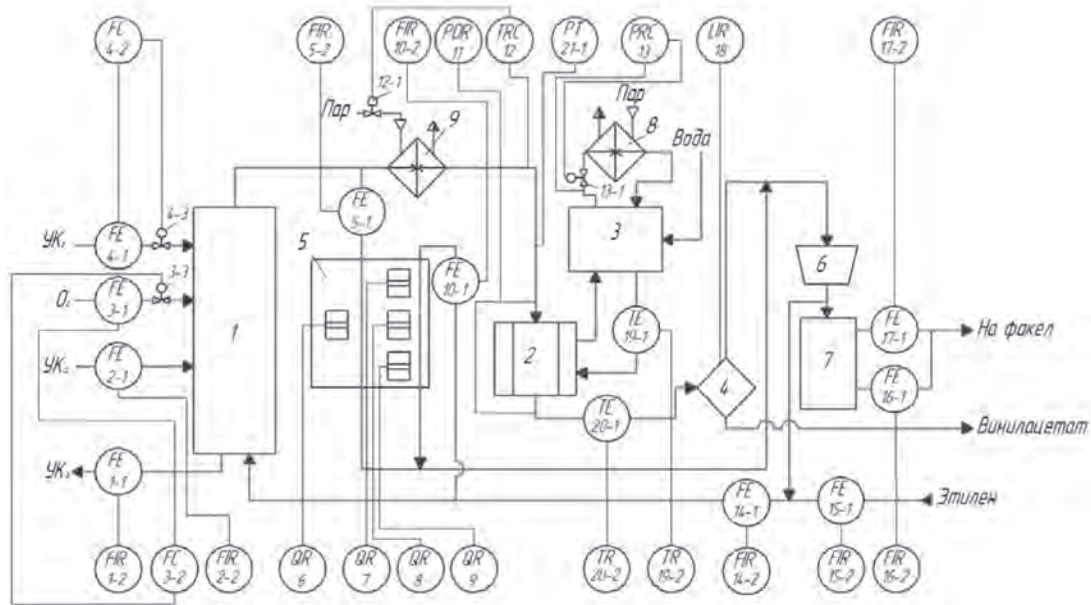


Рис. 2. Упрощенная ФСА по производству винилацетата на основе этилена

томатизированным контуром 19, а температура продуктов синтеза на выходе из реактора – контуром 20.

Давление паров хладагента в паросборнике 3 измеряется и регулируется автоматизированным контуром 13.

Информация от датчиков 1-1, 2-1, 3-1, 4-1, 5-1, 6-1, 7-1, 8-1, 9-1, 10-1, 11-1, 12-1, 13-1, 14-1, 15-1, 16-1, 17-1, 19-1, 20-1, 21-1 поступает на входы контроллера, в котором вычисляются контролируемые показатели процесса синтеза винилацетата, коэффициенты математической модели данного процесса, определяются задания регуляторам температуры парогазовой смеси на входе в реактор, давления паров

хладагента в паросборнике реактора, расходов возвратной уксусной кислоты и кислорода в узел подготовки парогазовой смеси.

Контроль и управление процессом синтеза винилацетата по предлагаемому способу осуществляется следующим образом [4].

На основании информации, поступающей в контроллер от датчиков расхода 3-1, 14-1, 10-1 и 5-1, анализаторов кислорода 6-1 и 9-1 вычисляются и контролируются расход кислорода в реактор и мольное отношение на входе в реактор смеси этилена, диоксида углерода и инертных к кислороду:

$$F_{KIC}^P = (F_{ЦГ} - F_{ЦГ}^{АН}) \cdot 0,01 \cdot A_{ЦГ}^{KIC} + F_{KIC} - F_{ПС}^{АН} \cdot A_{ПС}^{KIC} \cdot 0,01, \quad (1)$$

$$d_1^P = \frac{(F_{ЦГ} - F_{ЦГ}^{АН}) (1 - 0,01 \cdot A_{ПС}^{KIC}) - F_{ПС}^{АН} (1 + 0,01 \cdot A_{ПС}^{KIC})}{F_{KIC}^P}, \quad (2)$$

где  $F_{KIC}^P$  – вычисленное текущее значение кислорода в реактор,  $\text{нм}^3/\text{ч}$ ;  $d_1^P$  – вычисленное текущее значение мольного отношения смеси этилена, диоксида углерода и инертных к кислороду на входе в реактор, моль/моль;  $F_{ЦГ}$ ,  $F_{KIC}$  – расходы циркуляционного газа и кислорода в узел подготовки парогазовой смеси, измеряемые соответственно датчиками 14-1 и 3-1,  $\text{нм}^3/\text{ч}$ ;  $F_{ЦГ}^{АН}$ ,  $F_{ПС}^{АН}$  – расходы циркуляционного газа и парогазовой смеси на анализ, измеряемые соответственно датчиками 10-1 и 5-1,  $\text{нм}^3/\text{ч}$ ;  $A_{ЦГ}^{KIC}$ ,  $A_{ПС}^{KIC}$  – концентрации кислорода в потоках циркуляционного газа и парогазовой смеси, поступающих на анализ, измеряемые соответственно датчиками

6-1 и 9-1, об. %.

На основании информации, поступающей от датчиков расхода на факел диоксида углерода 16-1 и циркуляционного газа 17-1, от датчиков расхода на анализ циркуляционного газа 10-1 и парогазовой смеси 5-1, от датчика расхода циркуляционного газа 14-1, анализаторов кислорода 6-1 и 9-1, анализатора диоксида углерода 8-1, от датчика расхода этилена 15-1 и по вычисленному значению расхода кислорода в реактор  $F_{KIC}^P$  контроллером рассчитываются и контролируются конверсии кислорода на образование диоксида углерода и винилацетата, а также селективность катализатора по этилену:

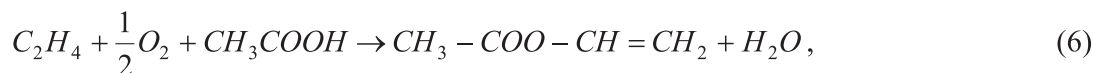
$$X_2^P = 1,5 \cdot \frac{\left[ F_{ДУ}^{\Phi} + \frac{F_{ЦГ}^{\Phi} \cdot F_{ЦГ} \cdot A_{ЦГ}^{ДУ} \cdot 0,01}{(F_{ЦГ} - F_{ЭТ})} \right]}{F_{КИС}^P}, \quad (3)$$

$$X_1^P = 1 - X_2^P - \frac{(F_{ЦГ} - F_{ЭТ} + F_{ЦГ}^{\Phi}) \cdot F_{ЦГ} \cdot A_{ЦГ}^{КИС} \cdot 0,01}{(F_{ЦГ} - F_{ЭТ})} - \frac{-0,01 \cdot F_{ЦГ}^{АН} \cdot A_{ЦГ}^{КИС} - 0,01 \cdot F_{ПС}^{АН} \cdot A_{ПС}^{КИС}}{F_{КИС}^P}, \quad (4)$$

$$S_L^P = \frac{2X_1^P \cdot F_{КИС}^P}{\frac{1}{3}X_2^P \cdot F_{КИС}^P + 2X_1^P \cdot F_{КИС}^P} \cdot 100\% = \frac{6 \cdot 100\%}{6 + \frac{X_2^P}{X_1^P}}, \quad (5)$$

где  $X_2^P$  – рассчитанное текущее значение конверсии кислорода на образование диоксида углерода, доли ед.;  $X_1^P$  – рассчитанное текущее значение конверсии кислорода на образование винилацетата, доли ед.;  $S_L^P$  – рассчитанное текущее значение селективности катализатора синтеза по этилену, %.

Коэффициент, равный 1,5 в формуле (3), отра-



Коэффициент, равный 2 в формуле (5), отражает тот факт, что одна молекула кислорода реагирует с 2 молекулами этилена в реакции (6), а коэффициент 1/3 в формуле (5) отражает то, что в реакции (7) одна молекула этилена реагирует с 3 молекулами кислорода.

По вычисленным значениям текущего расхода кислорода в реактор  $F_{КИС}^P$  и текущей конверсии кислорода на образование винилацетата  $X_1^P$  вычисляется с учетом загрузки реактора катализатором и контролируется сьем винилацетата:

$$S_E^P = \frac{2X_1^P \cdot F_{КИС}^P \cdot 86 \cdot 1000}{22,4 \cdot V_K}, \quad (8)$$

где  $V_K$  – объем катализатора, загруженного в реактор, л; 86 – вес одного моля винилацетата, кг/моль;  $\frac{2X_1^P \cdot F_{КИС}^P}{22,4}$  – текущее количество молей винилацетата, образующегося в реакторе, моль/ч; 1000 – переводной коэффициент из кг в г; 22,4 – объем, занимаемый 1 молем газа при нормальных

условиях, что в соответствии с принятым химизмом процесса синтеза винилацетата из этилена на образование 2 молекул  $CO_2$  расходуется 3 молекулы кислорода:

условиях,  $nm^3/моль$ .

Мольное отношение на входе в реактор уксусной кислоты к кислороду определяется по формуле [моль/моль]:

$$d_2^P = \frac{22,4 \cdot F_{УК}^P}{60 \cdot F_{КИС}^P}, \quad F_{УК}^P = F_{УК}^C + F_{УК}^B - F_{УК}^3, \quad (9)$$

где  $F_{УК}^C$  – расход свежей уксусной кислоты в узел подготовки парогазовой смеси, измеряемый датчиком 10, кг/ч;  $F_{УК}^B$  – расход возвратной уксусной кислоты после очистки парогазовой смеси, измеряемый датчиком 14, кг/ч;  $F_{УК}^3$  – расход уксусной кислоты из узла парогазовой смеси на очистку от высококипящих соединений, измеряемый датчиком расхода 17, кг/ч;  $F_{УК}^P$  – вычисленное значение расхода уксусной кислоты в реактор, кг/ч; 60 – вес одного моля уксусной кислоты, кг/моль.

Контроллером контролируется также мольная скорость потока смеси через реактор в [г·моль/с], которая рассчитывается по формуле:

$$v_0^P = \frac{1}{36} \cdot \left( \frac{F_{ЦГ} + F_{КИС} - F_{ЦГ}^{АН} - F_{ПС}^{АН}}{22,4} + \frac{F_{УК}^C + F_{УК}^B - F_{УК}^3}{60} \right), \quad (10)$$

где  $1/36$  – переводной коэффициент из [кг·моль/ч] в [г·моль/с].

Конверсия этилена рассчитывается следующим образом:

$$X_{\text{Э}}^P = \frac{F_{\text{ЭТ}} - \frac{F_{\text{ЦГ}}^{\Phi} (F_{\text{ЦГ}} \cdot A_{\text{ЦГ}}^{\text{ЭТ}} - 100 \cdot F_{\text{ЭТ}}) \cdot 0,01}{F_{\text{ЦГ}} - F_{\text{ЭТ}}}}{(F_{\text{ЦГ}} - F_{\text{ЦГ}}^{\text{АН}}) \cdot A_{\text{ЦГ}}^{\text{ЭТ}} \cdot 0,01 \left[ 1 - \frac{F_{\text{ПС}}^{\text{АН}}}{F_{\text{ЦГ}} - F_{\text{ЦГ}}^{\text{АН}} + F_{\text{КИС}}} \right]}, \quad (11)$$

где  $A_{\text{ЦГ}}^{\text{ЭТ}}$  – концентрация этилена в циркуляционном газе, измеряемая датчиком 8-1, об. %.

Конверсия уксусной кислоты определяется по следующей формуле:

$$X_{\text{УК}}^P = 1 - \frac{(d_2^P - 2X_1^P) \cdot F_{\text{КИС}}^P \cdot 60}{(F_{\text{УК}}^C + F_{\text{УК}}^B - F_{\text{УК}}^3) \cdot 22,4}. \quad (12)$$

Реализованная функциональная схема автома-

тизации в имитационно-моделирующем комплексе является интерактивной [2]. Она позволяет пользователю самостоятельно подбирать средства автоматизации, входящие в ранее рассмотренные контуры, используя встроенную базу данных с характеристиками приборов (рис. 3) и автоматически проверять правильность выбора (рис. 4).

Выберите из списка, а затем щелкните на соответствующей цветной надписи с номером прибора.

**Прибор 1:** Расходомеры Метран-350, Rosemount 3051SFA  
**Прибор 2:** Не выбран  
**Прибор 3:** Не выбран  
**Прибор 4:** Не выбран

Измеряемые среды:	вязкость, твл. пар:
Температура измеренной среды:	-40...400°C - интегральный монтаж датчика; -184...677°C - удаленный монтаж датчика.
Ныбточное давление в трубопроводе:	до 25 МПа;
Условный проход:	Dy 50...2400 (для Dy более 2400 - по спецзаказу);
Выходной сигнал:	4-20 мА/HART, Foundation Fieldbus, Modbus, WirelessHART;
Межповерочный интервал:	4 года;

Расходомеры Метран-350, Rosemount 3051SFA, Rosemount 3095MFA

Расходомеры предназначены для измерения расхода жидкости, газа, пара в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности, а также в системах технологического и коммерческого учета.

Основные преимущества:

- Интегральная конструкция расходомера исключает потребность в импульсных линиях и дополнительных устройствах, сокращается количество потенциальных мест утечек среды;
- Низкие безвозвратные потери давления в трубопроводе сокращают затраты на электроэнергию;
- Многопараметрические преобразователи 3095MV в составе расходомеров обеспечивают вычисление мгновенного массового расхода жидкости, пара, газа, или объемного расхода газа, приведенного к стандартным условиям;
- Установка расходомера экономична и менее трудоемка по сравнению с установкой измерительного комплекса на базе стандартной диафрагмы;
- Возможность установки расходомера без остановки техпроцесса благодаря конструкции Flo-Tap;
- Пределы измерений расхода рассчитываются для конкретного технологического процесса.

Рис. 3. Выбор расходомера в качестве первого прибора контура из базы средств автоматизации и его характеристик

Представленные зависимости (1)–(12) визуализируются в ИМК в виде графиков зависимостей выбранного выходного параметра процесса от выбранного входного параметра с возможностью увеличения в необходимой области для более точного исследования (рис. 5). Трехмерный режим отображения технологической установки позволяет пользователю наглядно видеть конструктивные особенности аппаратов, расположение оборудования, средств автоматизации и разветвления трубопроводов (рис. 6).

Имитационно-моделирующий комплекс используется в учебном процессе на кафедрах «Автоматизированные технологические и информационные системы» и «Общая химическая технология» филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета (УГНТУ) в г. Стерлитамаке; на кафедре «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» филиала УГНТУ в г. Салавате и на кафедре «Нефтехимия и химическая технология» УГНТУ.

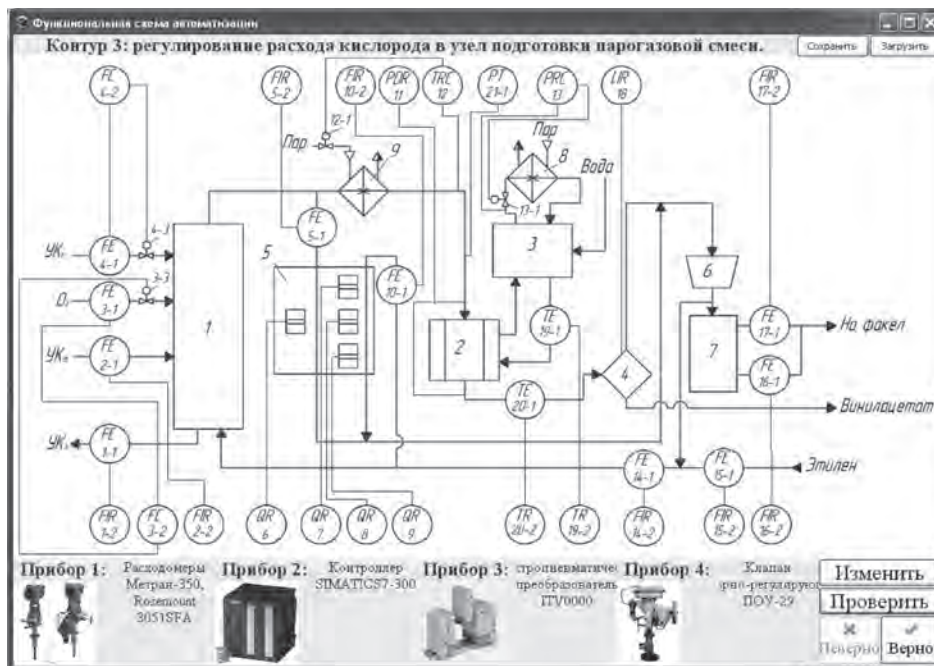


Рис. 4. Проверка правильности собранного контура регулирования расхода кислорода в интерактивной ФСА

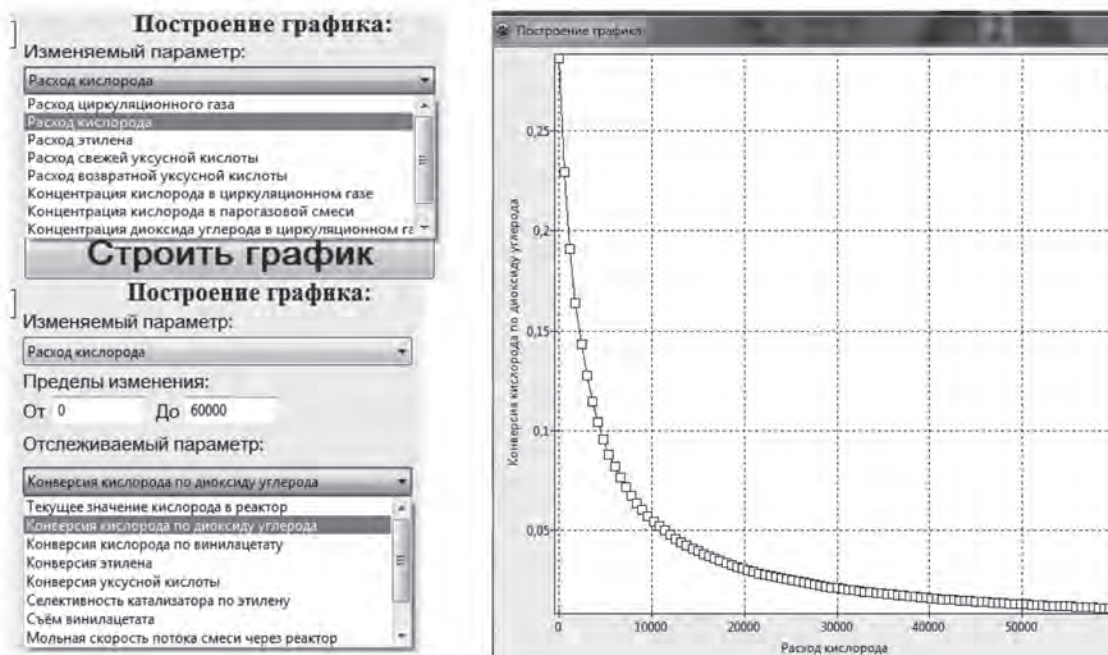


Рис. 5. Рабочее окно программы «Построение графика» и окна выбора измеряемого и отслеживаемого параметра

Реализация технологии синтеза винилацетата на основе этилена возможна на ОАО «Башкирская содовая компания» (г. Стерлитамак). Доступность сырья, востребованность продукта свидетельствуют об актуальности выбранной технологии для создания имитационно-моделирующего комплекса «Синтез винилацетата на основе этилена». В качестве даль-

нейшего развития проекта предполагается разработка компьютерного тренажера для других наиболее распространенных процессов химической технологии, в частности полимеризации винилхлорида.

#### Список литературы

1. Шулаева Е. Технологические процессы в

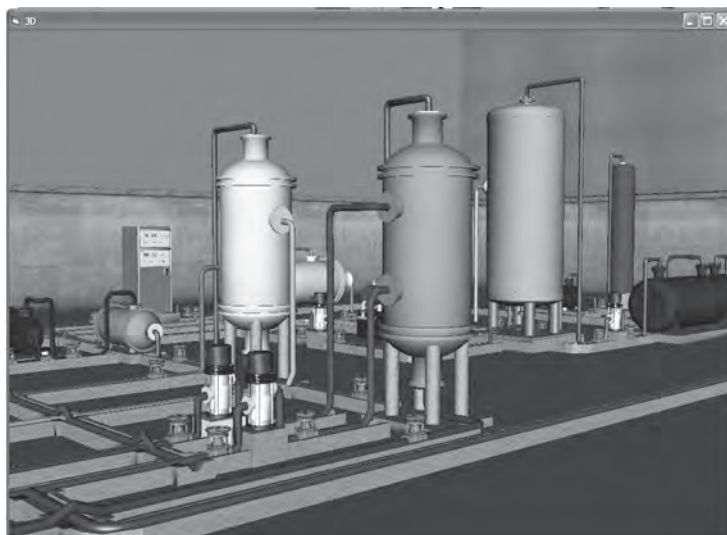


Рис. 6. 3D-модель технологической установки

электродинамических реакторах. Моделирование и системы управления. – Издатель: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Germany, ISBN 978-3-659-11692-6, 2012. – 160 с.

2. Шулаева Е.А. Интерактивная функциональная схема автоматизации процесса «Синтез винилацетата на основе этилена» / Е.А. Шулаева, Р.Р. Даминев, А.А. Исламутдинова, Я.М. Ярославцев, И.Т. Шарипов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – № 2013616017 от 25.06.2013 г.

3. Шулаева Е.А. Синтез винилацетата на основе этилена: виртуальная лабораторная работа / Е.А. Шулаева, Р.Р. Даминев, А.А. Исламутдинова и др. // Регистрационное свидетельство обязательного федерального экземпляра электронного издания № 29065 от 15.02.2013. Номер гос. регистрации обязательного экземпляра электронного издания – 0321204297.

4. Способ автоматического контроля и управления процессом получения винилацетата на основе этилена: пат. 2184725 Рос. Федерация. № 2001128929/12: заявл. 26.10.2001: опубл. 10.07.2002.

5. Лебедев Н.Н. Химия и технология основного органического и нефтехимического синтеза. – М.: Химия, 1981. – 608 с.

#### References

1. Shulaeva E. Tehnologicheskie processy v jelektrodinamicheskikh reaktorah. Modelirovanie i sistemy upravlenija. – Izdatel': LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Germany, ISBN 978-3-659-11692-6, 2012. – 160 s.

2. Shulaeva E.A. Interaktivnaja funkcional'naja shema avtomatizacii processa «Sintez vinilacetata na osnove jetilena» / E.A. Shulaeva, R.R. Daminev, A.A. Islamutdinova, Ja.M. Jaroslavcev, I.T. Sharipov // Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM. – Federal'naja sluzhba po intellektual'noj sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam. – № 2013616017 от 25.06.2013.

3. Shulaeva E.A. Sintez vinilacetata na osnove jetilena: virtual'naja laboratornaja rabota / E.A. Shulaeva, R.R. Daminev, A.A. Islamutdinova i dr. // Registracionnoe svidetel'stvo objazatel'nogo federal'nogo jekzempljara jelektronnogo izdanija № 29065 от 15.02.2013. Nomer gos. registracii objazatel'nogo jekzempljara jelektronnogo izdanija – 0321204297.

4. Sposob avtomaticheskogo kontrolja i upravlenija processom poluchenija vinilacetata na osnove jetilena: pat. 2184725 Ros. Federacija. № 2001128929/12: zajavl. 26.10.2001: opubl. 10.07.2002.

5. Lebedev N.N. Himija i tehnologija osnovnogo organicheskogo i neftehimicheskogo sinteza. M.: Himija, 1981. 608 s.





**Давыдов А.И.**  
**Davidov A.I.**

*аспирант кафедры «Машины, аппараты,  
приборы и технологии сервиса»  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный уни-  
верситет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа*



**Мухамадиев А.А.**  
**Mukhamadiev A.A.**

*кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Информационно-измерительная техника»  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный универси-  
тет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа*

УДК 681.335

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Применение в современных информационно-измерительных и телекоммуникационных системах волоконно-оптических линий связи обусловлено высокой скоростью и широким каналом передачи информации, что обеспечивает устойчивое функционирование системы. Поскольку волоконно-оптические линии связи всё чаще имеют распределенную структуру, существует необходимость в их коммутации. Для раскрытия потенциала волоконно-оптических линий связи коммутация каналов должна осуществляться на фотонном уровне. К такому типу коммутаторов относится акустооптический преобразователь для коммутации волоконно-оптических линий связи распределенных информационно-измерительных систем, принцип работы которого основан на отклонении света ультразвуковой волной, создающейся в оптически прозрачном кристалле. Акустооптический (АО) преобразователь для коммутации волоконно-оптических линий связи распределенных информационно-измерительных систем передает всю полосу частот, передающуюся по волоконно-оптическим линиям связи, обладает высоким быстродействием, емкостью, простотой конструкции и отсутствием подвижных частей. В данной статье рассмотрены основы моделирования акустооптического преобразователя для коммутации волоконно-оптических линий связи распределенных информационно-измерительных систем. Представлена его структура, состоящая из входного оптического волокна, коллимирующей и фокусирующей линзы, поляризатора, акустооптического дефлектора, выходного массива коллиматоров. Описан характер пространственного распространения гауссова излучения в системе акустооптического преобразователя для коммутации волоконно-оптических линий связи распределенных информационно-измерительных систем. Приведены выражения, определяющие гауссов пучок в заданной точке коммутатора вдоль оси распространения. Рассмотрен характер преобразования волнового фронта излучения с гауссовым распределением элементами оптики. Определено взаимное расположение элементов системы коммутатора. Полученные выражения являются основой при конструировании акустооптического преобразователя для коммутации волоконно-оптических линий связи распределенных информационно-измерительных систем, подборе элементов оптики, и разработке его математической модели.

*Ключевые слова:* акустооптический преобразователь, коммутация, волоконно-оптические линии связи, информационно-измерительная, телекоммуникационная система.

## OPTICAL SYSTEM MODELING OF ACOUSTO-OPTIC SWITCHING TRANSDUCER FOR INFORMATION-MEASURING AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Fiber-optic lines application for present-day information-measuring systems and telecommunications determine by high transfer rate and wide bandwidth throughput that provides stable system operation. Since fiber-optic lines tend to have a distributed structure, there is the need for switching. Channels switching should be carried out on photon level for realizing the fiber-optic lines potential. To this type of switches refers acousto-optic switching transducer for distributed information-measuring systems' fiber-optic lines. The principle of its work is based on light beam diffraction by ultrasonic wave, created in optically transparent media. Acousto-optic switching transducer for distributed information-measuring systems' fiber-optical lines has wide bandwidth throughput, high transfer rate and capacity, design simplicity and no moving parts. This article covers the basics of acousto-optic switching transducer modeling, presents its structure consisting of the input optical fiber, collimating and focusing lenses, polarizer, acousto-optic deflector, and output fiber-optic collimators array. The principles of a Gaussian beam spatial distribution in a system of acousto-optic switching transducer for distributed information-measuring systems' fiber-optic lines are discussed. Expressions defining the Gaussian beam at given point of the switch along the axis of the distribution are taken. Gaussian beam wave front transformation is considered. Determined the relative position of the switch elements. The obtained expressions are used for acousto-optic switching transducer constructing, the selection of the optical components, and development of its mathematical model.

*Key words:* acousto-optic transducer, switching, fiber optical lines, information-measuring, telecommunication system.

Устойчивое функционирование современных информационно-измерительных (ИИС) и телекоммуникационных систем обеспечивается применением волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) для передачи информации, обладающих высокой пропускной способностью.

Для раскрытия потенциала ВОЛС процессы передачи, обработки и коммутации оптических сигналов должны проходить на фотонном уровне, без участия электронных процессов и устройств [1].

В связи с этим в современных волоконно-оптических линиях связи применяются полностью оптические коммутаторы. К такому типу коммутаторов относится акустооптический преобразователь для коммутации (АОПК) волоконно-оптических

линий связи распределенных информационно-измерительных систем, принцип действия которого основан на управлении положением оптического пучка в пространстве акустическим высокочастотным сигналом. АОПК ВОЛС распределенных ИИС передает всю полосу частот, передающуюся по волоконно-оптическим линиям связи, обладает высоким быстродействием ( $10^{-15}$  с) и емкостью, простотой конструкции и отсутствием подвижных частей [2–4].

На рисунке 1 приведена структура акустооптического преобразователя для коммутации волоконно-оптических линий связи распределенных информационно-измерительных систем.

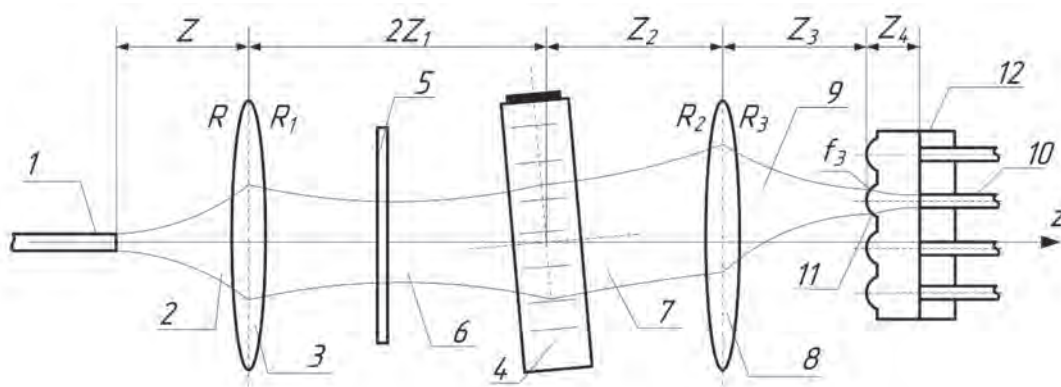


Рис. 1. Структура АОПК ВОЛС распределенных ИИС

Оптическое излучение, сгенерированное источником сигнала, передается по одномодовому оптическому волокну 1.

Дифракция приводит к поперечному распро-

странению световой волны. Расходящийся пучок света 2 на границе «оптическое волокно – среда» распространяется от перетяжки  $w_0$  как волна с гауссовым поперечным профилем (рис. 2).

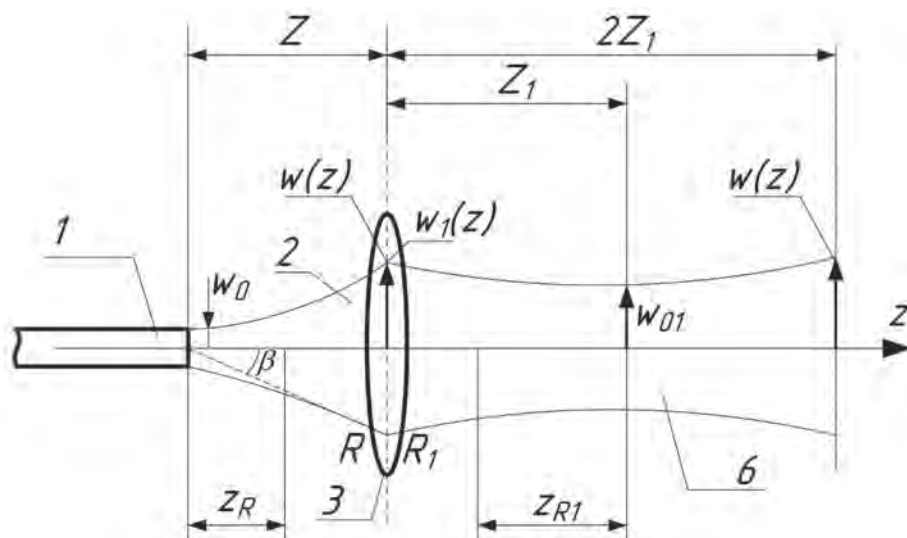


Рис. 2. Преобразование входного гауссова излучения коллимирующей линзой

Пространственное изменение радиуса гауссова пучка с изменением расстояния  $z$  описывается выражением

$$w(z) = w_0 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $z$  – расстояние распространения луча,  $\lambda$  – длина световой волны,  $w_0$  – радиус перетяжки.

Перетяжка  $w_0$  – область, в которой радиус пучка  $w(z)$  минимален. Перетяжка  $w_0$ , как правило, располагается около источника сигнала и имеет крайне небольшой угол расхождения.

Распределение амплитуды по волновому фронту гауссова пучка обладает осевой симметрией и радиусом  $w(z)$ .

Изменение радиуса кривизны волнового фронта в зависимости от расстояния  $z$  описывается выражением

$$R(z) = z \left[ 1 + \left( \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda \cdot z} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

Радиус кривизны  $R(z)$  профиля гауссова излучения равен бесконечности при  $z = 0$ , проходит через минимум при некотором конечном значении  $z$  и снова стремится к бесконечности при возрастании  $z$ , асимптотически приближаясь к значению  $z$  [5].

Ширина гауссова пучка  $w(z)$  и радиус кривизны волнового фронта  $R(z)$  полностью определяют гауссов пучок в заданной точке вдоль оси распространения.

При  $z \rightarrow \infty$  радиус гауссова излучения  $w(z)$  асим-

птотически приближается к значению

$$w(z) = \frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot w_0}, \quad (3)$$

где  $z \gg \pi w_0^2 / \lambda$  так, чтобы профиль гауссова излучения сближался с асимптотой.

Половинный угол расходимости гауссова луча в дальней зоне будет определяться отношением (рис. 2)

$$\beta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{w(z)}{z} = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0}. \quad (4)$$

Диапазон Рэлея ( $z_R$ ) определяется как расстояние, при котором радиус пучка  $w(z)$  изменяется на величину  $\sqrt{2}$  при распространении от перетяжки  $w_0$ .

$$z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda}. \quad (5)$$

Диапазон Рэлея – расстояние, позволяющее получить наилучшее сочетание минимального диаметра входного луча  $w_0$  и наилучшего коллимирования пучка (отношение  $w(z)$  к  $w_0$ ).

С учетом формулы (5) выражение (1) можно записать в виде:

$$w(z) = w_0 \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_R} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Расстояние  $z$  от входного оптического волокна 1 до коллимирующей линзы 3, при котором оптическое излучение распространяется от радиуса перетяжки  $w_0$ , соответствующего радиусу сердцевин входного оптического волокна, до требуемого раз-

мера оптического пятна на коллимирующей линзе  $w_0$ , определяется выражением.

$$z = z_R \sqrt{\left(\frac{w(z)}{w_0}\right)^2} - 1. \quad (7)$$

Размер пятна на коллимирующей линзе  $3$  определяется величиной апертуры АО дефлектора  $4$  [6].

Если поперечные размеры сферической линзы достаточно велики, то действие линзы сводится только к изменению кривизны волнового фронта. Так, линза  $3$  преобразует гауссово излучение, оставляя его распределение гауссовым.

Сферическая коллимирующая линза  $3$  с радиусами изгиба  $R$  и  $R_1$  и фокусным расстоянием  $f_1$  преобразует волновой фронт расходящегося гауссова пучка с радиусом кривизны волнового фронта  $R$  в коллимированное оптическое излучение  $5$  с гауссовым распределением и кривизной волнового фронта  $R_1$ .

Перетяжка коллимированного излучения  $w_{01}$  располагается на расстоянии  $z_1$ , а диапазон Релея равняется  $z_{R1}$ .

Согласно формуле для фокусного расстояния  $f_1$  коллимирующей линзы  $3$

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{R} - \frac{1}{R_1}, \quad (8)$$

где  $R$  – радиус изгиба линзы со стороны падающего оптического излучения,  $R_1$  – радиус изгиба линзы со стороны преломленного оптического луча.

Радиус коллимированного излучения  $w_1(z)$  в плоскости коллимирующей линзы  $3$  равен радиусу падающего излучения  $w(z)$ :

$$w_1(z) = w(z). \quad (9)$$

Выразив радиус коллимированного оптического излучения  $w_1(z)$  через радиус кривизны  $R_1$ , получим:

$$w_{01} = \frac{w(z)}{\left[1 + (\pi w^2(z) / \lambda R_1)^2\right]^{1/2}}, \quad (10)$$

где  $w_{01}$  – радиус перетяжки коллимированного гауссова пучка.

Центр перетяжки  $w_{01}$  расположен от коллимирующей линзы на расстоянии

$$z_1 = \frac{R_1}{1 + (\lambda R_1 / \pi w^2(z))^2}. \quad (11)$$

Расстояние, при котором радиус пучка на акустооптическом дефлекторе равен радиусу пятна  $w(z)$  на коллимирующей линзе  $3$ , будет определяться как  $2z_1$ .

Поляризатор  $6$  (рис. 1) преобразует гауссов пучок в линейно поляризованное гауссово излучение, не изменяя характер распределения волнового фронта.

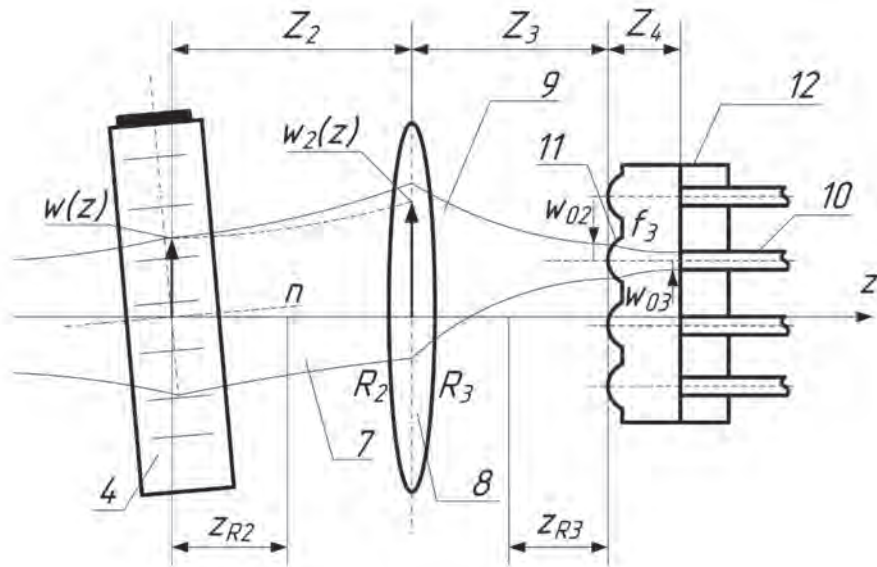


Рис. 3. Преобразование гауссова пучка элементами выходной подсистемы АОПК ВОЛС распределенной ИИС

Дифрагированный луч первого порядка  $7$  распространяется с гауссовым распределением от перетяжки  $w_{02} = w_1(z) = w(z)$  под углом  $\alpha$  относительно нормали  $n$  (рис. 3). Расстояние до фокусирующей линзы  $8$  вдоль оси  $z$  будет определяться как

$$z_{02} = z_{R2} \sqrt{\left(\frac{w_2(z)}{w_{02}}\right)^2} - 1 = z_{R2} \sqrt{\left(\frac{w_2(z)}{w^2(z)}\right)^2} - 1, \quad (12)$$

где  $w_2(z)$  – размер оптического излучения на фокусирующей линзе,  $w_{02}$  – радиус перетяжки оптического излучения между АО дефлектором  $4$  и фокусирующей линзой  $8$ .

В случае ограничения луча с гауссовым распределением апертурой дефлектора  $4$ , диаметр перетяжки будет равен  $2w_{02} = D$ .

$$z_{02} = z_{R2} \sqrt{\left(\frac{2w_2(z)}{D}\right)^2} - 1, \quad (13)$$

где  $D$  – апертура АО дефлектора 4,  $z_{02}$  – расстояние до фокусирующей линзы 8 вдоль оси  $z$ .

Поскольку луч отклонен относительно оси  $z$  на угол  $(\theta_B + \alpha)$ , расстояние  $z_2$ :

$$z_2 = \frac{z_{02}}{\cos(\theta_B + \alpha)} = \frac{z_{R2} \sqrt{\left(\frac{w_2(z)}{w(z)}\right)^2} - 1}{\cos(\theta_B + \alpha)}. \quad (14)$$

Сферическая линза 8 с радиусами кривизны  $R_2$  и  $R_3$  преобразует отклоненный луч 7 в сходящийся поток 9 излучения до величины радиуса перетяжки  $w_{03}$ .

Перетяжка  $w_{03}$  располагается от сферической линзы на расстоянии  $z_3$ :

$$z_3 = \frac{R_3}{1 + (\lambda R_3 / \pi w_2^2(z))^2}, \quad (15)$$

$$w_{03} = \frac{w_2(z)}{[1 + (\pi w_2^2(z) / \lambda R_3)^2]^{1/2}}, \quad (16)$$

где  $w_2(z)$  – радиус оптического луча на фокусирующей линзе [5].

Окончательная фокусировка оптического сигнала в выходное волокно 10 осуществляется микролинзой 11 волоконно-оптического массива коллиматоров 12, расположенной на постоянном фокусном расстоянии от него. Оптическое излучение фокусируется до величины перетяжки  $w_{04}$ :

$$w_{04} = \frac{w_{03}}{[1 + (z_{R4} / f_3)^2]^{1/2}}, \quad (17)$$

где  $w_{03}$  – радиус оптического излучения на микролинзе, равный радиусу перетяжки  $w_{03}$ ,  $f_{03}$  – фокусное расстояние микролинзы волоконно-оптического массива коллиматоров,  $z_{R4}$  – диапазон Релея оптического сигнала между оптическим волокном и микролинзой [7].

Расстояние  $z_{\text{общ}}$  от микролинзы до оптического волокна определяется выражением

$$z_4 = \frac{f_3}{1 + (f_3 / z_{R4})^2}. \quad (18)$$

Расстояние  $z_{\text{общ}}$  между входным оптическим волокном 1 и выходным массивом коллиматоров 12 будет равно сумме расстояний между элементами системы:

$$z_{\text{общ}} = z + 2z_1 + z_2 + z_3 + z_4. \quad (19)$$

Данная статья описывает структуру АОПК ВОЛС распределенных ИИС, характер пространственного распространения оптического сигнала, преобразования его волнового фронта элементами системы, взаимное расположение оптических элементов.

Найденные выражения будут основой для подбора элементов оптики, конструирования структуры АОПК ВОЛС распределенных ИИС и построения его математической модели.

#### Список литературы

1. Маккавеев В.И. Фотонные коммутаторы [Текст] / В.И. Маккавеев // Компоненты и технологии. – 2006. – № 2. – 5 с.
2. Давыдов А.И. Акустооптический коммутатор волоконно-оптических линий связи для информационно-измерительных систем [Текст] / А.И. Давыдов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2012. – № 4. – С. 12–17.
3. Давыдов А.И. Акустооптическая коммутация элементов в информационно-измерительных системах [Текст] / А.И. Давыдов, А.А. Мухамадиев, М.А. Ураксеев // Датчики и системы. – 2013. – № 2. – С. 33–36.
4. Давыдов А.И. Построение волоконно-оптической распределенной информационно-измерительной системы с акустооптической коммутацией каналов [Текст] / А.И. Давыдов, А.А. Мухамадиев, М.А. Ураксеев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – № 1. – Т. 9. – С. 80–83.
5. Bahaa E.A. Fundamentals of photonics [Text] / Saleh E.A. Bahaa, Saleh, C.T. Malvin. – A Wiley-Interscience publication, 1991. – С. 85–95.
6. Siegman A.E. Lasers: university science books [Text] / A.E. Siegman. – Mill Valley, California, 1986. – С. 664–672.
7. Self S.F. Focusing of spherical Gaussian beams [Text] / S.F. Self // Applied optics. – 1983. – Vol. 22, № 5. – С. 658–661.

#### References

1. Makkaveev V.I. Fotonnye kommutatory [Tekst] / V.I. Makkaveev // Komponenty i tehnologii. – 2006. – № 2. – 5 s.
2. Davydov A.I. Akustoopticheskij kommutator volokonno-opticheskikh linij svyazi dlja informacionno-izmeritel'nyh sistem [Tekst] / A.I. Davydov // Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii. – 2012. – № 4. – S. 12–17.
3. Davydov A.I. Akustoopticheskaja kommutacija jelementov v informacionno-izmeritel'nyh sistemah [Tekst] / A.I. Davydov, A.A. Muhamadiev, M.A. Urakseev // Datchiki i sistemy. – 2013. – № 2. – S. 33–36.
4. Davydov A.I. Postroenie volokonno-opticheskoy raspredelennoj informacionno-izmeritel'noj sistemy

s akustoopticheskoj kommutaciej kanalov [Tekst] / A.I. Davydov, A.A. Muhamadiev, M.A. Urakseev // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – № 1. – T. 9. – S. 80–83.

5. *Bahaa E.A.* Fundamentals of photonics [Text]/ Saleh E.A. Bahaa, Saleh, C.T. Malvin. – A Wiley-Interscience publication, 1991. – S. 85–95.

6. *Siegman A.E.* Lasers: university science books [Text] / A.E. Siegman. – Mill Valley, California, 1986. – S. 664–672.

7. *Self S.F.* Focusing of spherical Gaussian beams [Text] / S.F. Self // Applied optics. – 1983. – Vol. 22, № 5. – S. 658–661.



**Шapiro С.В.**  
**Shapiro S.V.**

доктор технических наук,  
профессор, заведующий кафедрой «Физика»  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный  
университет экономики и сервиса»,  
Россия, г. Уфа



**Муфтиев С.Р.**  
**Muftiev S.R.**

аспирант кафедры «Физика»  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный  
университет экономики и сервиса»,  
Россия, г. Уфа

УДК 621.313

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА В СРЕДЕ ORCAD 9.2

Статья посвящена вопросам исследования модели системы стабилизации напряжения (ССН) тяговых подстанций городского электротранспорта в среде OrCAD 9.2. Рассматриваются вопросы построения модели с использованием стандартной библиотеки пакета OrCAD 9.2, получения статических, динамических и нагрузочных характеристик.

Данная компьютерная модель ССН позволяет получить предварительные данные о работе системы стабилизации в различных режимах и может быть использована при разработке различных преобразователей.

*Ключевые слова:* модель системы стабилизации напряжения тяговых подстанций городского электротранспорта, OrCAD 9.2.

## MODELING OF THE SYSTEM OF STABILIZATION OF VOLTAGE OF TRACTION SUBSTATIONS OF CITY ELECTRIC TRANSPORT IN THE SISTEM ORCAD 9.2

The article is devoted to research of the model of the system of stabilization of voltage of traction substations of city electric transport in the environment, OrCAD 9.2. Deals with the construction of the model using a standard library OrCAD 9.2, retrieve static, dynamic and load characteristics.

The resulting computer model of stabilization sistem allows to obtain preliminary data on the performance of stabilization in different modes and can be used when developing various converters.

*Key words:* model of the system of stabilization of voltage of traction substations of city electric transport, OrCAD 9.2.

На рис. 1 дана схема компьютерной модели системы стабилизации напряжения тяговых подстанций городского электротранспорта, разработанная в научно-исследовательской лаборатории кафедры физики УГУЭС совместно с производственно-техническим отделом МУЭТ г. Уфы.

Основу системы составляет программа PSpice, которая является наиболее известной модификаци-

ей программы схемотехнического моделирования SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), разработанной в начале 70-х годов в Калифорнийском университете г. Беркли [1]. Инвертор на этой модели представлен транзисторами Z1–Z4 (CM600HA-12H), модели взяты из стандартной библиотеки IGBT пакета OrCAD 9.2. На рис. 2 представлены данные PSpice-модели CM600HA-12H [2].

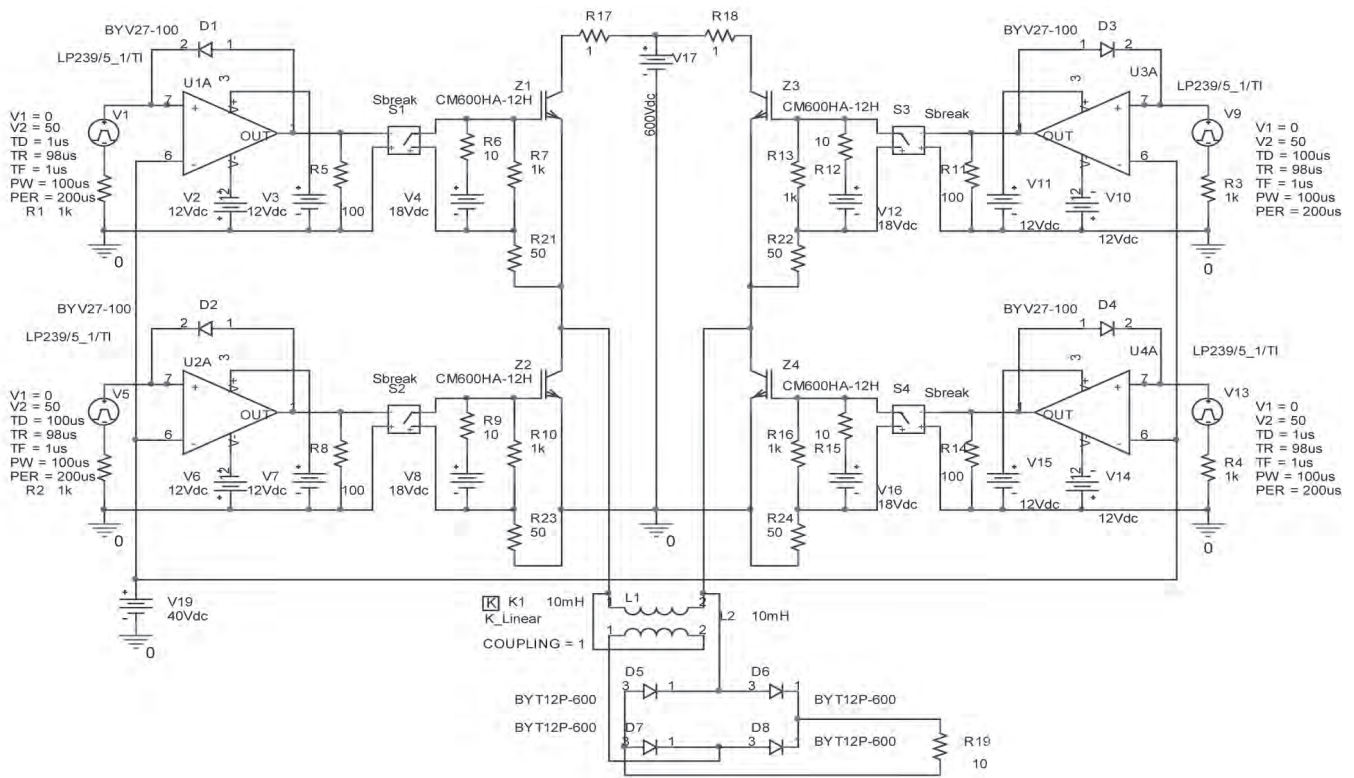


Рис. 1. Модель системы стабилизации напряжения тяговых подстанций в пакете OrCAD 9.2

Parameter Name	Value	Minimum	Maximum	Default	Active	Fixed
AREA	0.001	1e-012	0.001	1e-005	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
AGD	0.00025	1e-007	0.001	5e-006	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
WB	0.000117	1e-009	0.001	9e-005	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
VT	6.8046	0.8	100	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
MUN	1500	0.0001	1000000	1500	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
MUP	450	0.0001	1000000	450	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
BVF	2	0.0001	10	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
NB	2e+014	1	1e+030	2e+014	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
JSNE	6.5e-013	1e-015	0.001	6.5e-013	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
BVN	4	0.1	100	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
KF	13.491	0.5	1000	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THETA	0.02	0.0001	10	0.02	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CGS	1.9496e-008	1e-015	0.001	1.24e-008	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
COXD	3.581e-008	1e-015	0.001	3.5e-008	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
VTD	-11.8	-100	100	-5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Рис. 2. Данные PSpice-модели CM600HA-12H

На рис. 3 показаны диаграммы напряжений при работе системы стабилизации в различных режимах. Управление транзисторами Z1–Z4 осуществляется четырехканальным широтно-импульсным моду-

лятором на базе операционных усилителей U1A–U4A и ключей S1–S4. Работа всех каналов ШИМ идентична, поэтому рассмотрим только один из них (канал управления Z1) [3].

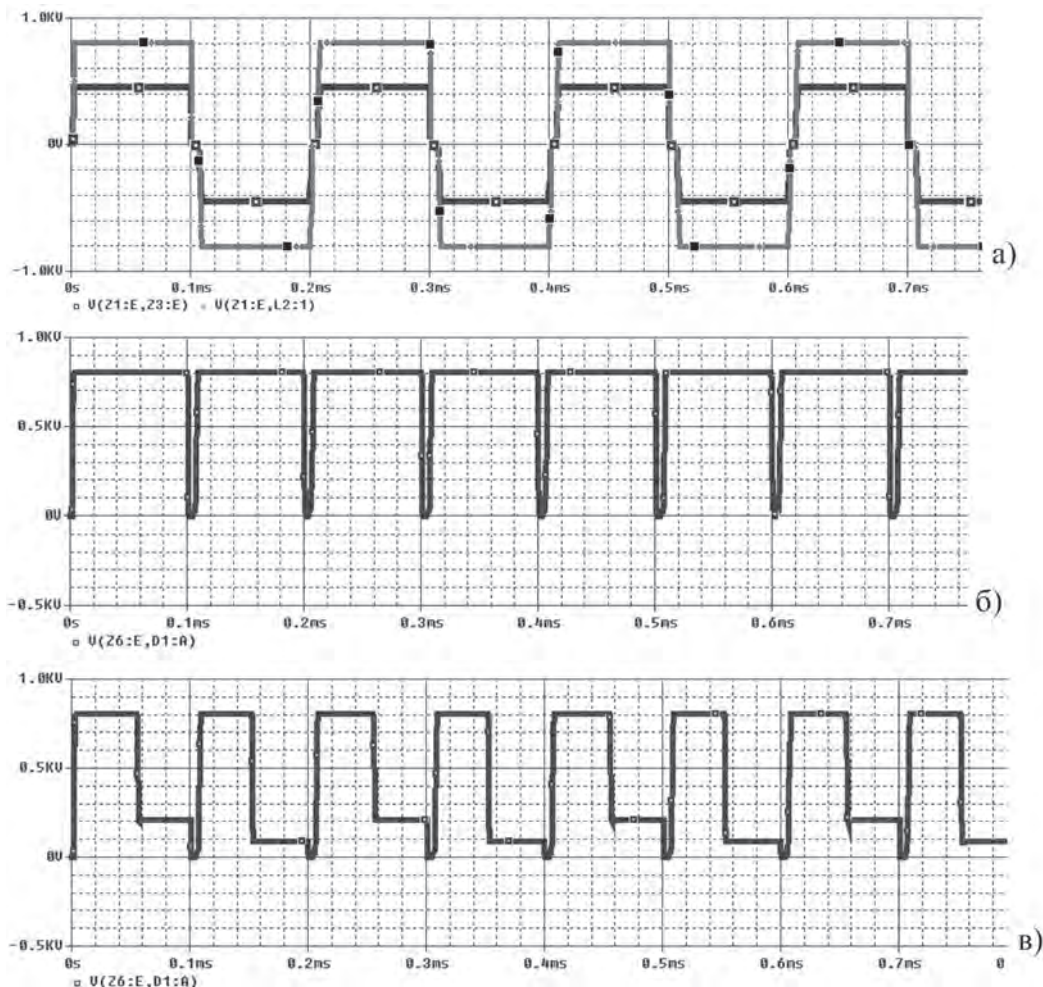


Рис. 3. Диаграммы напряжений при работе системы стабилизации: а – форма напряжения на входе и на выходе автотрансформатора; б – форма напряжения на выходе выпрямителя при полностью открытых модулях Z1–Z4; в – форма напряжения на выходе выпрямителя при открытых на 50 % модулях Z1–Z4

Операционный усилитель U1A и диод D1 выполняют функцию компаратора, на инвертирующий вход которого подается опорное напряжение  $U_{19}$ , пропорциональное напряжению  $U_{17}$ .

На рис. 4 показан график зависимости  $U_{\text{вых}}$  ССН при повышении напряжения нагрузки тяговой подстанции и при понижении напряжения. Управление ОУ U2A, U3A происходит таким же образом, за исключением того, что сигналы задающих генераторов сдвинуты по фазе на 100 мкс, период сигнала равен 200 мкс:

$$P = 1 \text{ с} / 5000 \text{ Гц} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ мс} = 200 \text{ мкс}.$$

Итак, сигнал с инвертора в виде прямоугольных импульсов с частотой 5 кГц поступает на вход автотрансформатора, который предназначен для повы-

шения амплитуды напряжения. Коэффициент трансформации составляет 0,6, т. е. зависимость входного и выходного напряжений автотрансформатора выглядит следующим образом:  $U_{\text{вых}} = 1,6 \cdot U_{\text{вх}}$  [3].

Далее, по схеме напряжение с выхода автотрансформатора подается на выпрямитель по мостовой схеме на диодах D5–D8 (BYT12P-600) [4].

На рис. 5 показана нагрузочная характеристика ССН, зависимость напряжения на выходе системы от потребляемого тока с ССН и без ССН. График зависимости с ССН составлен по результатам моделирования, а без ССН характеристика составлена по результатам наблюдений приборов на тяговой подстанции № 36 МУЭТ г. Уфы.

На рис. 6 показана регулировочная характери-



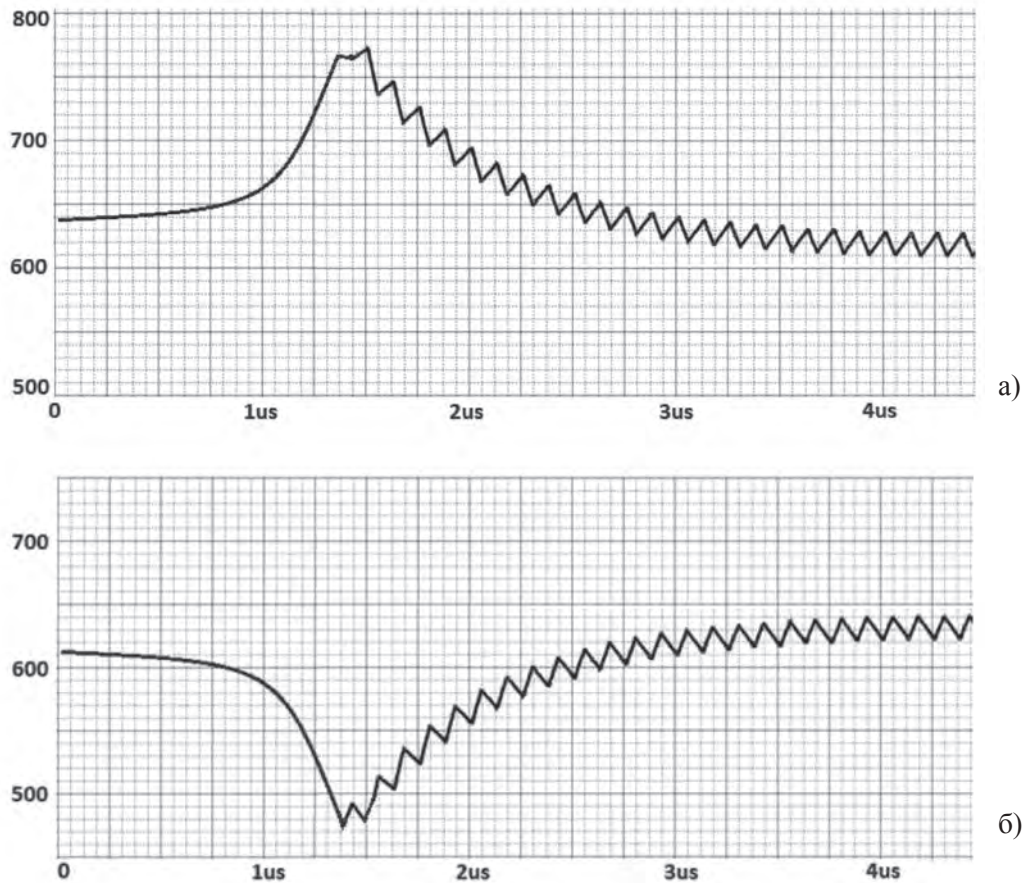


Рис. 4. График зависимости  $U_{\text{вых}}$  ССН при:  
 а) повышении напряжения  $U_{\text{нагр. ТП}}$ ; б) понижении напряжения  $U_{\text{нагр. ТП}}$

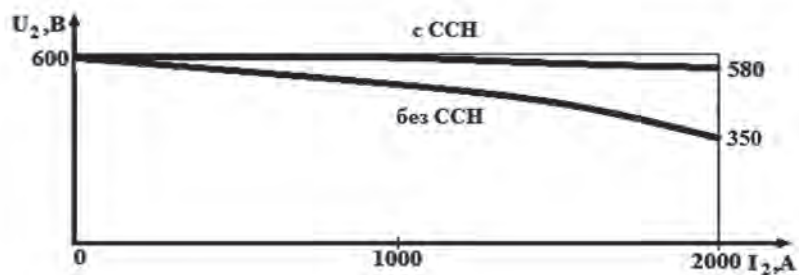


Рис. 5. Нагрузочная характеристика



Рис. 6. Регулировочная характеристика

стика ССН, зависимость выходного напряжения от колебания напряжения на входе.

Из рисунка видно, что при работе ССН в режиме холостого хода выходное напряжение немного выше по сравнению с работой системы при номинальной нагрузке [5].

*Вывод.* Результаты исследования модели системы стабилизации в среде OrCAD 9.2 показали:

1. При колебании входного напряжения от 350 до 700 В выходное напряжение колеблется от 580 до 600 В.
2. Время динамических процессов в ССН не превышает 4 мс.

#### Список литературы

1. *Болотовский Ю.И.* OrCAD. Моделирование «Поваренная книга» [Текст] / Ю.И. Болотовский, Г.И. Таназлы – М.: Солон-пресс, 2005. – 200 с.
2. *Модели в PSpice* [Электронный ресурс]. – URL: [http://pspicelib.narod.ru/07\\_imp\\_models/imp\\_models.htm](http://pspicelib.narod.ru/07_imp_models/imp_models.htm) (дата обращения: 01.03.2012).
3. *Самоучитель по OrCAD* [Электронный ресурс]. – URL: <http://lib.qrz.ru/book/export/html/6918> (дата обращения: 01.02.2011).
4. *Datasheetcatalog.com* [Электронный ресурс].

– URL: <http://www.datasheetcatalog.com> (дата обращения: 15.02.2013).

5. *Шапиро С.В.* Система стабилизации напряжения тяговых подстанций городского электро-транспорта [Текст] / С.В. Шапиро, С.Р. Муфтиев // Электротехника. – 2010 – № 3. – С. 40–46.

#### References

1. *Bolotovskij Ju.I.* OrCAD. Modelirovanie «Povarennaja kniga» [Tekst] / Ju.I. Bolotovskij, G.I. Tanazly. – M.: Solon-press, 2005. – 200 s.
2. *Modeli v PSpice* [Jelektronnyj resurs]. – URL: [http://pspicelib.narod.ru/07\\_imp\\_models/imp\\_models.htm](http://pspicelib.narod.ru/07_imp_models/imp_models.htm) (data obrashhenija: 01.03.2012).
3. *Samouchitel' po OrCAD* [Jelektronnyj resurs]. – URL: <http://lib.qrz.ru/book/export/html/6918> (data obrashhenija: 01.02.2011).
4. *Datasheetcatalog.com* [Jelektronnyj resurs]. – URL: <http://www.datasheetcatalog.com> (data obrashhenija: 15.02.2013).
5. *Shapiro S.V.* Sistema stabilizacii naprjazhenija tjagovyh podstancij gorodskogo jelektrotransporta [Tekst] / S.V. Shapiro, S.R. Muftiev // Jelektrotehnika. – 2010. – № 3. – S. 40–46.

# НАНОЭЛЕКТРОНИКА И КВАНТОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ NANOELECTRONICS AND QUANTUM DATA SYSTEMS



**Денисова О.А.**  
**Denisova O.A.**

*кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры «Физика»  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный уни-  
верситет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа*



**Скалдин О.А.**  
**Scaldin O.A.**

*доктор физико-математических наук,  
профессор ФГБУН «Институт физики молекул  
и кристаллов» УНЦ РАН, Россия, г. Уфа*

УДК 535, 534

## ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

Исследованы процессы распространения поперечной вязкой волны в холестерических жидких кристаллах (ХЖК) (МБА + холестерилхлорид ~2%) и твист-структурах нематических жидких кристаллов (НЖК) под действием гармонического сдвига. Задачей исследования было выявление особенностей флексоэлектрического эффекта в жидких кристаллах, а также влияние на него взаимодействия волны периодического сдвига со спиральной структурой ХЖК. Флексоэлектрический эффект является разновидностью пьезоэлектрического эффекта для анизотропных жидкостей.

Экспериментально изучался флексоэлектрический эффект, индуцированный поперечной волной в ХЖК. Измерения проводились с помощью ячейки, собранной по симметричной схеме, которая представляла сборку из трех пластин. Верхняя и нижняя пластины были разделены прокладками заданной толщины, а центральная свободно плавала в ХЖК. В работе использовались два метода возбуждения колебаний в ЖК-ячейке. В первом случае возбуждаемый при колебании пластины сигнал частотой 22 кГц снимался либо с резистора, напыленного на опорную пластину, либо между подвижной пластиной и опорной подложкой. Во втором случае сдвиговая волна, возбужденная электродинамическим вибратором, через волновод приводила в движение рабочую пластину, это позволяло изучать отклик ЖК-ячейки на внешнее воздействие в диапазоне звуковых частот от 20 Гц до 20 кГц.

Зависимость величины флексоэлектрического эффекта и угол отклонения директора от скорости смещения пластины показывает линейную зависимость, что объясняется теорией Эриксона – Лесли. Экспериментально изучены частотные зависимости флексоэлектрической поляризации в холестерических жидких кристаллах и твист-структурах нематиков, возбужденной периодическим сдвигом. Полученная зависимость имеет резонансный вид. Аналитически показано, что подобное поведение – это следствие взаимодействия упруго-вязкой волны, распространяющейся в слое нематика, закрученного на 90°, с твист-структурой, то есть, проще говоря, за счет рассеяния или специфической дифракции.

*Ключевые слова:* нематические жидкие кристаллы, твист-структуры, планарная ориентация, акустическая волна, пьезоэлектрический эффект, флексоэлектрический эффект.

## PIEZOELECTRIC EFFECT IN LIQUID CRYSTALS

Investigation of the processes of propagation of transverse viscous waves in a cholesteric liquid crystals (MBBA + holesterilhlorid about 2%) and twist structures of nematic liquid crystals under the action of the harmonic shift. The task of the research was to identify the peculiarities of flexoelectric effect in liquid crystals, as well as the influence of the interaction of waves periodic shift from the spiral structure CHLC. Flexoelectric effect is a type of piezoelectric effect for anisotropic fluids.

Experimentally studied flexoelectric effect induced transverse wave in CHLC. The measurements were conducted using cell collected under the symmetric scheme, which represented the Assembly of their three plates. Upper and lower plates were separated by strips of specified thickness, and the central freely floated in CHLC. We used two methods of excitation of oscillations in the LC-cell. In the first case agitated with the oscillations of a plate of the signal with the frequency of 22 kHz acted either with resistor, sprayed on the base plate, or between the movable plate and the supporting substrate. In the second case, the shear wave generated by electrical vibrator, through the waveguide resulted in the movement of the working plate and allowed to study the response of the LC-cell to external pressures in the range of sound frequencies from 20 Hz to 20 kHz.

Dependence of the flexoelectric effect and the angle of deviation of the director of the speed of displacement of the plate shows a linear relationship, which is explained by the theory Eriksen - Leslie. Experimentally studied the frequency dependencies of the flexoelectric polarization in cholesteric liquid crystals and twist-structures of nematics, excited by a periodic shift. The obtained dependence has a resonance type. Analytically it is shown that this behavior is a result of interaction of elastic-viscous wave propagating in a layer of the twisted nematic volume  $90^\circ$ , with a twist-structure, that is, simply put, due to dispersion or specific diffraction.

*Key words:* nematic liquid crystals, twist-structures, planar orientation, acoustic wave, piezoelectric effect, flexoelectric effect.

При колебательном движении пластины в жидкости, ограниченной твердой поверхностью, возникает поперечная волна с глубиной проникновения  $\delta$ . Эта глубина падает с ростом частоты и растет с увеличением вязкости [1]. В жидком кристалле (ЖК) при низкочастотных колебаниях возникают еще и колебания, связанные с изменением ориентации молекул. Однако глубина проникания такой волны  $\sim 10^{-3}\omega^{-1/2}$  значительно меньше глубины проникания вязкой поперечной волны, имеющей величину порядка  $10^{-1}\omega^{-1/2}$  ( $\omega$  – частота колебаний ограничивающей пластины). Особенности холестерических жидких кристаллов и твист-структур состоят в том, что они подобны твердым телам из-за наличия спиральной структуры. Основную роль играет упругая деформация оси структуры, а не процессы, связанные с вязкостью. Глубина проникания волны до частот  $10^6$  Гц составляет порядка размеров толщины образца. В этом случае НЖК является аналогом жидкости, т. е. при деформации не сохраняет форму. Деформация является вязкоупругой, и проникновение поперечной волны составляет микроны.

Актуальность изучения вопроса распространения поперечных волн в жидких кристаллах связана с перспективами практического применения твист-ячеек в технике, например, для создания дисплеев нового поколения. Применение жидких кристаллов означает экономическую эффективность, простоту, удобство, небольшие габариты устройств и малые

потребляемые мощности. Кроме того, например, управляемые оптические транспаранты могут быть использованы не только как элементы проекционного устройства, но и выполнять значительное число функций, связанных с преобразованием, хранением и обработкой оптических сигналов.

В связи с этим в настоящей работе исследованы ориентационные процессы, связанные с распространением поперечной вязкоупругой волны в твист-структурах нематических жидких кристаллов и холестерических жидких кристаллах с большим шагом спирали. Другой важной задачей было выяснение особенностей проявления флексоэлектрического эффекта, индуцированного поперечной волной в этих молекулярных системах, и влияние на него взаимодействия сдвиговой волны со спиральной структурой ЖК.

Рассмотрим сначала теорию изучаемого вопроса. Распространение поперечной волны, возбуждаемой подвижной пластиной в холестерическом жидком кристалле с осью спирали, параллельной оси  $OZ$  и перпендикулярной вектору скорости, в среде будет описываться уравнениями Навье – Стокса для скоростей центров инерции молекул

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_j}, \quad (1)$$

где  $v_i$  – скорости центров инерции молекул,

$$\sigma'_{ij} = \alpha_1 n_k n_p A_{kp} n_i n_j + \alpha_2 n_i N_j + \alpha_3 n_j N_i + \alpha_4 A_{ij} + \alpha_5 n_i n_k A_{kj} + \alpha_6 n_j n_k A_{ki},$$

где  $\alpha_1, \dots, \alpha_6$  – коэффициенты вязкости,  $n_k$  – компоненты директора,  $A_{kj} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_k}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_k} \right)$ ,  $\vec{N} = \frac{d\vec{n}}{dt} + [\vec{n} \times \text{rot} \vec{v}]$ ,  $p$  – давление, моментные уравне-

ния, описывающие движение директора:

$$h_\mu = \gamma_2 n_\alpha A_{\alpha\mu} + \gamma_1 N_\mu, \quad (2)$$

где  $h_\mu = -\partial F / \partial n_\mu$  – молекулярное поле,  $F$  – свободная энергия, равная [1]:

$$F = -\frac{1}{2} \int \left\{ K_{11} (\text{div} \vec{n})^2 + K_{22} (\vec{n} \text{rot} \vec{n} + \vec{q}_o)^2 + K_{33} [\vec{n} \times \text{rot} \vec{n}]^2 \right\} dV, \quad (3)$$

здесь  $K_{11}, K_{22}, K_{33}$  – модули упругости ЖК.

Выбирая возмущения директора  $\delta n_x, \delta n_y, \delta n_z$  малыми, имеем:  $n_x \approx n_x^0 + \delta n_x, n_y \approx n_y^0 + \delta n_y, n_z \approx n_z^0 + \delta n_z, n_x^0 = \cos q_0 z, n_y^0 = \sin q_0 z, n_x = \cos \theta, n_y = \sin \theta, n_z = \theta, \theta = q_0 t + C, v_x = v_0 \exp(i\omega t)$ .

Будем рассматривать случай малых амплитуд колебаний и считать ориентацию директора «замороженной», т. е.  $\delta n_x = \delta n_y = \delta n_z \approx 0$ . В этом слу-

чае волна будет чисто вязкой, но с отличными от нуля компонентами скорости  $v_x, v_y$ , возбуждаемых одномерным сдвигом, например, оси ОХ. С учетом этого из (1) и (2), исключая давление перекрестным дифференцированием, для уравнений движения центров инерции молекул и уравнение движения  $z$  – компоненты директора, описывающее колебание оси спирали, получаем:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} &= \eta_1 \frac{\partial}{\partial z} (\sin 2q_0 z \frac{\partial v_y}{\partial z}) + \eta_2 \frac{\partial}{\partial z} (\cos 2q_0 z \frac{\partial v_z}{\partial z}) + \eta_3 \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2}, \\ \rho \frac{\partial v_y}{\partial t} &= \eta_4 \frac{\partial}{\partial z} (\sin 2q_0 z \frac{\partial v_x}{\partial z}) + \eta_2 \frac{\partial}{\partial z} (\cos 2q_0 z \frac{\partial v_y}{\partial z}) + \eta_3 \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2}, \\ \gamma_2 n_y^0 A_{yz} + \gamma_2 n_x^0 A_{xz} + \gamma_1 \frac{\partial(\delta n_z)}{\partial t} &\approx 0 \end{aligned} \quad (4)$$

В окрестности значений волнового вектора поперечной волны, сравнимых с шагом спирали  $k \sim 2q_0$ , решение (4) запишется в виде:

$$\begin{aligned} v_x &= (C_{11} + C_{12} \exp[i2q_0 z] + C_{13} \exp[ik' z] + \\ &+ C_{14} \exp[-i(k'-2q_0)z]) \exp[-(\beta z - i\omega t)], \\ v_y &= (C_{21} + C_{22} \exp[i2q_0 z] + C_{23} \exp[ik' z] + \\ &+ C_{24} \exp[-i(k'-2q_0)z]) \exp[-(\beta z - i\omega t)], \end{aligned} \quad (5)$$

где  $k = k' + i\beta$ ,  $k'$  – волновой вектор,  $\beta$  – коэффициент затухания волны.

Нетривиальное решение системы уравнений будет при равенстве нулю детерминанта  $\det|a_{ij}| = 0, j=1, \dots, 4, a_{11}=a_{22}=a_{33}=a_{44}=\eta_2 k'(k'-2q_0), a_{12}=a_{21}=a_{34}=a_{43}=\eta_3 k' + i\rho\omega, a_{13}=a_{24}=a_{31}=i\eta_1 k'(k'-2q_0), a_{14}=a_{23}=a_{32}=a_{41}=0$ .

Откуда при  $k' \sim 2q_0$ , имеют место соотношения:

$$k' = r^{\frac{1}{2}} \sin \varphi / 2, \quad \beta = \frac{\eta_3 q_0}{\eta_2 + \eta_3} - r^{\frac{1}{2}} \cos \varphi / 2, \quad (6)$$

$$r^2 = \frac{16\eta_2^4 q_0^4}{(\eta_2 + \eta_3)^4} + \frac{\rho^2 \omega^2}{(\eta_2 + \eta_3)^2}, \quad \text{tg} \varphi = \frac{\rho \omega}{\eta_2 q_0}.$$

При постоянной скорости сдвига верхней пластины  $v_o = \text{const}, \beta = q_0 \eta_2 / (\eta_2 + \eta_3), a k' = 0$ , что совпадает с известными результатами [1]. Так как на границах при  $z = 0 v = 0$ , а при  $z = \sigma v = v_o \exp(i\omega t)$ , то значения скоростей с учетом (6) имеют вид:

$$\begin{aligned} v_x &\sim v_o \left[ \frac{\sin k' z}{\sin k' \sigma} + \frac{\sin(k'-2q_0)z}{\sin(k'-2q_0)\sigma} \right] \exp[-(\beta z - i\omega t)], \\ v_y &\sim v_o \left[ \frac{\cos k' z}{\cos k' \sigma} - \frac{\cos(k'-2q_0)z}{\cos(k'-2q_0)\sigma} \right] \exp[-(\beta z - i\omega t)]. \end{aligned} \quad (7)$$

Из выражения (7), в частности, следует, что возникающая волна является эллиптической, а в окрестности значений волновых векторов  $k' \sim 2q_0$  имеет место резонансное увеличение скоростей, т. е. фактически имеет место резонанс оси спирали. Условия резонансов можно записать следующим образом:  $k' - 2q_0 \approx n\pi / \sigma, n = 0, 1, 2, \dots$  При выполнении этого соотношения происходит также смена фазы регистрируемого сигнала относительно фазы подвижной пластины на  $2\pi$ .

Пусть имеется ситуация, когда одна из опорных пластин, между которыми помещен НЖК с начальной гомеотропной ориентацией директора  $\vec{n}$ , совершает периодические колебания с частотой  $\omega$  и некоторой максимальной амплитудой  $x_o$ . Выбирая систему координат так, что  $\vec{n} || OZ$ , а скорость колебаний  $\vec{v} || OX$  и  $\vec{n} \perp OX$ , тогда уравнения движения директора и центров инерции молекул запишутся в виде [2]:

$$\begin{aligned} K_{13} \frac{\partial^2 n}{\partial z^2} - \eta_4 \frac{\partial n}{\partial t} + \eta_1 \frac{\partial v}{\partial z} &= 0, \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} - \eta_3 \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \eta_1 \frac{\partial^2 n}{\partial z \partial t} &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $K_{13}$  – модуль упругости НЖК,  $\eta_4, \eta_1, \eta_3$  – модули вязкости.

Решение системы (8) ищется при следующих граничных условиях:  $v(z=0) = v_o, v(z=d) = v_o, n(z=0) = 0, n(z=d) = 0, \delta$  – расстояние, на котором поворот директора максимален. Одно из стационарных решений этих уравнений дано в [2], но оно может быть получено проще. Для этого полагаем  $\{n, v\} \sim \exp(\lambda z) \exp(i\omega t)$ .

Тогда характеристическое уравнение имеет вид:

$$\frac{\eta_3}{\eta_1 \omega} \lambda^4 + i \left( \frac{\eta_1^2 - \rho K_{13} - \eta_3 \eta_4}{K_{13} \eta_1} \right) \lambda^2 - \frac{\rho \omega^2 \eta_4}{\eta_1 K_{13}} = 0, \quad (9)$$

откуда при  $\frac{\rho \omega}{\eta_3 \lambda^2} \gg 1$

$$n \cong \rho v_o (\eta_1 \lambda)^{-1} \exp \left[ -\frac{\sqrt{2}}{2} \lambda (z - \delta) \right] \cos \left[ \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \lambda (z - \delta) \right] \cos \omega t. \quad (10)$$

Здесь начало системы координат расположено на расстоянии  $\delta \neq 0, \lambda$  – реальная часть корней характеристических уравнений. Если  $|\lambda_1| \cong |\lambda_3|, |\lambda_2| \cong |\lambda_4| \cong 0$ , то

$$\lambda \sim \left[ \frac{\omega(-\eta_1^2 + \rho K_{13} + \eta_3 \eta_4)}{K_{13} \eta_3} \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$\text{и } \lambda \sim \left[ \frac{\omega^2 \rho \eta_4}{K_{13} \eta_3} \right]^{1/4} \text{ при } \frac{-\eta_1^2 + \rho K_{13} + \eta_3 \eta_4}{K_{13} \eta_3} \ll \left[ \frac{\rho \eta_4}{K_{13} \eta_3} \right]^{1/2}. \quad (12)$$

Приближение изотропной жидкости, часто используемое в работах, получается в исключительно редких случаях  $\eta_1^2 \approx \eta_3 \eta_4$ . С учетом этого  $\lambda \sim \left[ \frac{\omega \rho}{\eta} \right]^{1/2}$ . Оценка реальных величин дает расстояние максимального отклонения директора (оно сравнимо с расстоянием затухания волны)

$$\delta \sim \pi^{-1} \left[ -\frac{K_{13} \eta_3}{\omega(\eta_1^2 - \eta_3 \eta_4)} \right]^{1/2}. \quad (13)$$

Проведем оценки флексоэффекта по теории Мейера с учетом (10) [2]. Величина поляризации  $P$  равна ( $P \parallel OX$ ):

$$P_d \sim e_{33} \frac{\partial n}{\partial z} \sim e_{33} \pi \delta^{-1}. \quad (14)$$

При наличии поверхностной поляризации:

$$P \sim \int_0^\infty P(z) n(z) dz. \quad (15)$$

Знак  $\infty$  выбран в связи с тем, что колебания директора вдали от вибрирующей пластины быстро затухают. Если выбирать у поверхности  $P_x \sim P_o \exp(-kz)$  [1], будем иметь  $P_o \sim v_o \exp(-k\delta)$ , т. е., если приводить измерения зависимости от скорости к углу наклона кривой, становится возможным вычисление  $P_o$ . В частности, из выражения (13) следует объяснение отсутствия пьезосигнала при низких частотах.

В этом случае  $\delta < d$  и суммарная поляризация равна нулю. С другой стороны, при низких частотах имеет место сильная компенсация флексополяризации сторонними зарядами, например, примесями.

Для экспериментальной оценки величин сигналов флексоэлектрического отклика в окрестности  $q_0$  можно использовать связь градиентов скоростей и величины пьезоэлектрической поляризации  $P_i$ , определяемых пьезокоэффициентами  $C_{ijk}$  по теории Проста [3]:

$$P_i = C_{ijk} \frac{dv_j}{dx_k}.$$

Необходимо отметить, что флексоэлектрический эффект является разновидностью пьезоэлектрического эффекта для анизотропных жидкостей, каковыми и являются жидкие кристаллы.

Симметрии ХЖК и твист-структур НЖК допускают только два отличных от нуля пьезоэлектрических коэффициента  $C_{xyz}$  и  $C_{yxz}$ . Для величин поляризации, возникающих вдоль осей  $OX$  и  $OY$ , имеем:

$$P_x = C_{xyz} \frac{dv_y}{dz}; \quad P_y = C_{yxz} \frac{dv_x}{dz}. \quad (16)$$

Эти соотношения позволяют сделать оценки коэффициентов  $C_{xyz}, C_{yxz}$  путем измерения  $P_x$  и  $P_y$  в зависимости, например, от величины волновых векторов ХЖК – спирали или частоты колебаний пластины.

Экспериментальные измерения флексоэлектрического эффекта, индуцированного поперечной волной в ХЖК, проводились на ячейке, собранной по симметричной схеме, которая представляла собой сборку их трех пластин. Причем верхняя и нижняя пластины были разделены прокладками заданной толщины, а центральная свободно плавала в ХЖК (рис. 1).

Такой выбор конструкции ячейки исключал трудности в юстировке и фиксации толщины образцов, т. к. центровка пластины осуществлялась за счет поверхностного давления на краях появляющегося за счет сил поверхностного натяжения ЖК. ХЖК находился между первой и второй, а также между второй и третьей пластинами [4, 5]. На неподвижные пластины ячейки наносились резисторы из окиси олова, сопротивление  $R_o$  которых составляло 1 кОм. При колебании центральной пластины возникающая флексоэлектрическая поляризация индуцировала ток в резисторах. Разность потенциалов на резисторе в такой ситуации равна  $\frac{dP_{x,y}}{dt} R_o$ . Для разделения  $x$ - и  $y$ -компонент поляризации и регистрации сигнала на верхней пластине электроды располагались вдоль оси  $x$ , а на нижней – вдоль оси  $y$ .

В работе использовались два метода возбужде-

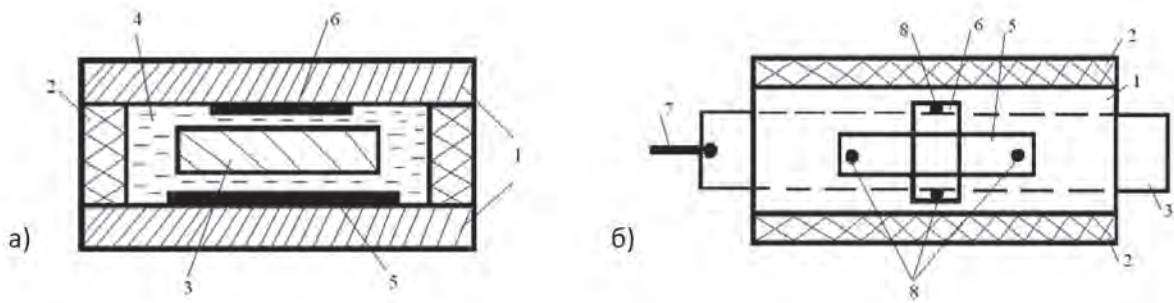


Рис. 1. Вид ячейки (а – сбоку, б – сверху) для исследования твист-структур НЖК и ХЖК: 1 – опорная пластина, 2 – разделительные прокладки, 3 – подвижная пластина, 4 – жидкий кристалл, 5, 6 – резисторы, 7 – волновод, 8 – электроды

ния колебаний в ЖК-ячейке. В первом случае возбуждаемый при колебании пластины сигнал частотой 22 кГц снимался либо с резистора (рис. 2а), напыленного на опорную пластину, либо между подвижной пластиной и опорной подложкой  $U_2$ , далее усиливался согласующим усилителем и селективным усилителем  $U_1$  или только селективным усилителем  $U_2$ , с последнего он поступал на аналого-цифровой преобразователь компьютера.

Во втором случае сдвиговая волна, возбужденная электродинамическим вибратором, через волновод приводила в движение рабочую пластину (рис. 2б), что позволяло изучать отклик ЖК-ячейки на внешнее воздействие в широком диапазоне звуковых частот 20÷20000 Гц. Данный метод воздействия на ЖК-слой применялся в задаче, рассматриваемой в работе [6].

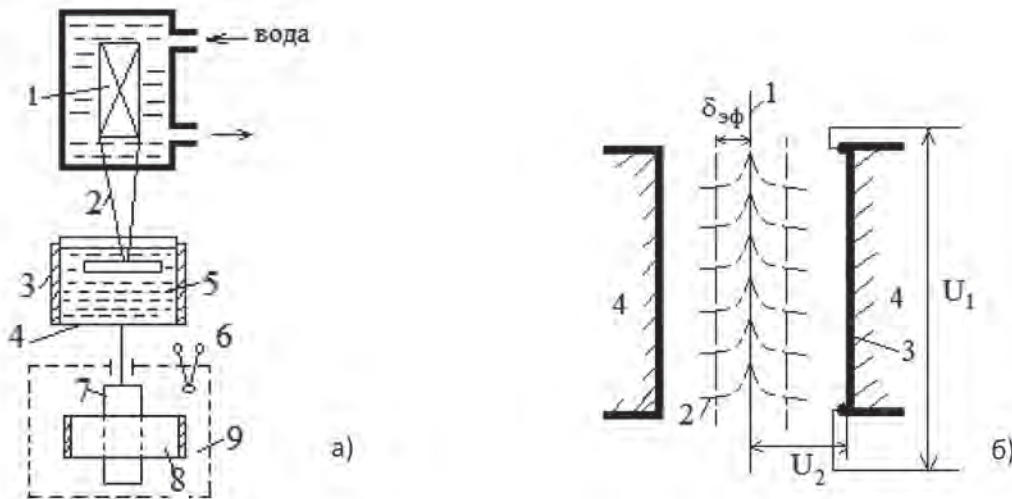


Рис. 2: а) схема возбуждения пьезоэлектрического эффекта; б) методы измерения величины пьезоэлектрического отклика и распределение директора в объеме: 1 – свободно плавающая центральная пластина, 2 – магнитострикционный вибратор, 3 – концентратор, 4 – мембрана, 5 – шток, 6 – хромель-алюмелевая термопара, 7 – рабочая пластина

Вся ячейка помещалась в термостат, температура которого измерялась хромель-алюмелевой термопарой. Сигнал с термопары поступал на аналогово-цифровой преобразователь и обрабатывался на компьютере. На рис. 2 показаны методы измерения величины пьезоэлектрического отклика и распределение директора в объеме [4, 5].

Кроме исследования разности потенциалов, индуцируемой сдвигом, проводились измерения ее фазы относительно сигнала, регистрируемого с датчика скорости движения пластины. Для измерения разности фаз изучаемый сигнал с ЖК-ячейки уси-

ливался селективным усилителем и через пробник поступал на вход измерителя разности фаз Ф2-13. Опорный сигнал поступал с датчика скорости, усиливался селективным усилителем и через пробник поступал на второй вход измерителя разности фаз. Сигнал, пропорциональный разности фаз, поступал на вход аналого-цифрового преобразователя и обрабатывался с помощью компьютера.

Скорость перемещения подвижной пластины  $l$  определялась двумя методами: путем фиксации изменения амплитуд пьезодатчиком и емкостным датчиком с точностью 0,1 мм. В этом случае из-

менение амплитуды определялось из меняющейся с частотой сдвига составляющей его емкостного сопротивления. Проводилось измерение полезного сигнала двумя методами: либо измерялось напряжение  $U_2$  между подвижной пластиной и одним из электродов, либо снимался сигнал с пленочного сопротивления, наносимого на одну из подвижных пластин  $U_1$ . Применение обоих методов дает возможность оценить вклады в разность потенциалов, индуцированную сдвигом, флексоэффекта и поверхностной поляризации. Причем вклад поверхностной поляризации будет существенным лишь при слабых граничных условиях. На рис. 3 представлены результаты исследований пьезоэлектрического отклика на сдвиг в МББА и двухкольчатом эфире.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований флексоэлектрического эффекта методом сдвиговых колебаний. В данной работе исследовались гомеотропно ориентированные слои НЖК, полученные спонтанно. Необходимо отметить, что эти экспериментальные результаты не коррелируют с измерениями флексокоэффициентов, найденных из исследований электрооптического эффекта НЖК. Последние дают картину,

противоположную приведенной на рис. 3. В случае НЖК двухкольчатых эфиров  $\epsilon_{33} \sim 10^{-7} - 10^{-8}$  ед. СГСЕ, а в МББА  $\epsilon_{33} \sim 10^{-4} - 10^{-5}$  ед. СГСЕ. С другой стороны, при выбранном методе измерения вклада за счет флексоэффекта нет, т. к. деформация быстро затухает:  $P_x \sim 2 \exp(-\lambda z / \sqrt{2}) \rightarrow 0$ . Однако реально регистрируемый сигнал  $U_1 \sim 2U_2 \epsilon_{\perp} / \epsilon_{\parallel}$ . Все это указывает на то, что при измерениях пьезоэлектрического эффекта, возбуждаемого сдвиговыми колебаниями, возможно, имеется вклад в полезный сигнал поверхностной поляризации. При этом удельное сопротивление НЖК доводилось до значения  $\sim 300$  Ом·м. Подобный результат подтверждает флексоэлектрическую природу индуцированного сдвигом пьезоэффекта, частота возбуждения которого была значительно выше обратного времени максвелловской релаксации примесных зарядов, что не могло привести к компенсации, индуцированной сдвигом поляризации. Однако для двухкольчатых эфиров имеется влияние ионных добавок на величину регистрируемого сигнала, и с ростом концентрации примесных ионов пьезоэффект уменьшается. Это также указывает на частичный вклад в регистрируемый сигнал поверхностной поляризации.

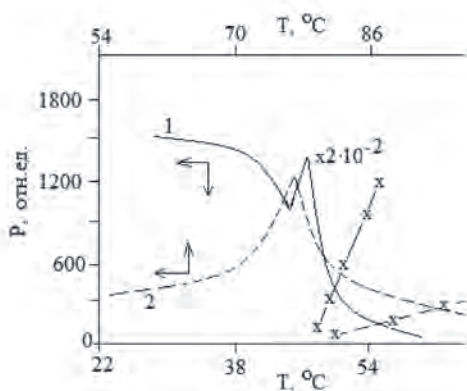


Рис. 3. Температурные зависимости величины индуцированной пьезоэлектрической поляризации: 1 – МББА; 2 – двухкольчатый эфир

Были проведены измерения пьезоэлектрического отклика от толщины образцов, однако, какой-либо его зависимости обнаружено не было (до 5 мкм). Этот результат свидетельствует о быстром затухании сдвиговой волны в глубину кристалла, что вытекает из оценок эффективной глубины затухания сдвиговой волны в НЖК, проводимой по теории Эриксона – Лесли [2]. На рис. 4 приведена зависимость величины флексоэлектрического эффекта от скорости смещения пластины [4]. Из этой зависимости вытекает, что при  $v \sim 10^{-2}$  м/с индуцируемый сигнал линейно зависит от скорости. При этом угол отклонения ди-

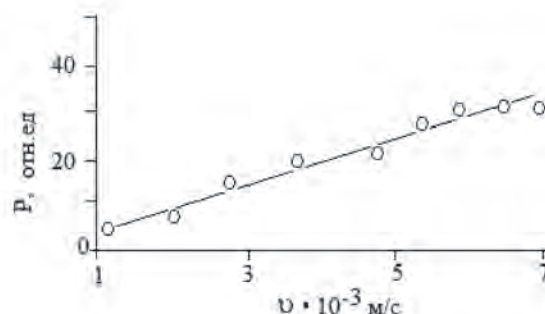


Рис. 4. Зависимость величины индуцированной флексоэлектрической поляризации от скорости колебания пластины

ректора, определенный из фотоупругого эффекта, линейно зависит от скорости сдвига (рис. 5). Последнее находит объяснение в рамках теории Эриксона – Лесли [2].

Для исследования эффектов резонансного изменения скорости поперечной вязкой волны был выбран наиболее известный жидкий кристалл n – метоксибензильден-бутиланилин (МББА), в который сделана добавка оптически активного вещества, холестерилхлорида  $\sim 2\%$ , так что величина волнового вектора ХЖК была  $3 \cdot 10^{-6}$  м<sup>-1</sup>.



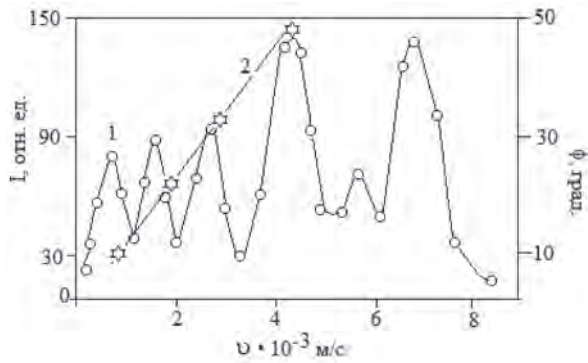


Рис. 5. Зависимости: 1 – интенсивности света при фотоупругом эффекте; 2 – угла отклонения директора от скорости колебания пластины

Рассмотрим величину флексоэлектрического сигнала и его изменение при постоянной скорости сдвига центральной пластины. Для получения различных волновых векторов  $k'$  поперечной вязкой волны при этом достаточно менять частоту сдвига. Поэтому рассмотрим более подробно частотную зависимость индуцированного сдвигом ЭДС на частоте первой гармоники, измеряемой на пленочном сопротивлении – электроде неподвижной верхней подложки. Полученная зависимость имеет типичный резонансный характер (рис. 6), определяется, по-видимому, спиральностью ЖК-структуры [7–10]. Эта ситуация возможна, когда длина волны, распространяющейся в НЖК, сравнима с шагом спирали. С уменьшением шага спирали резонансы зарегистрировать не удалось.

С целью дальнейшего уточнения соотношения (7) изучались твист-структуры НЖК, полученные в ячейках с планарной ориентацией молекул на поверхности. Для получения твист-структур опорные пластины поворачивались относительно друг друга на  $90^\circ$ . Однако здесь основной проблемой стало получение планарных слоев холестерического жидкого кристалла. Для решения этого вопроса применялся метод растяжения слоя с одновременной закруткой пластин. При полном повороте пластин на  $360^\circ$  возникала ориентация молекул холестерика с шагом спирали, кратным толщине исследуемого кристалла, с планарной ориентацией молекул на границах.

Согласно соотношениям (7) при большом шаге спирали, т. е. когда  $q_0^2 \ll \frac{\rho\omega}{\eta}$ , резонансы должны возникать при более высокой частоте. Результаты экспериментов полностью подтвердили этот факт: наличие закрученности в НЖК приводит к резонансным явлениям при распространении поперечных волн с длинами  $\lambda$ , сравнимыми с размерами образца ( $h \sim 10\text{--}15 \mu\text{м}$ ), и получаемых при более

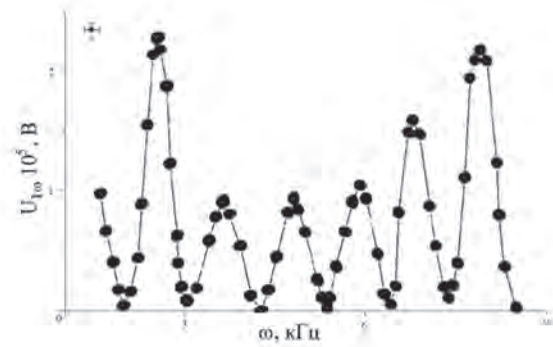


Рис. 6. Частотная зависимость первой гармоники  $U_{1\omega}$  в холестерическом жидком кристалле

высоких частотах колебаний. Явление резонанса весьма чувствительно к плоскопараллельности кюветы ячейки, в которую помещен НЖК.

Как уже отмечалось, в нашем случае возможно изменение сдвига фаз  $\Delta\varphi$  между сигналом, возбуждающим колебание, и регистрируемым сигналом  $U_{1\omega}$ . Установлено, что при изменении частоты колебаний подвижной пластины изменяется и разность фаз  $\Delta\varphi$ . Такое изменение следует из (7), т. к. разность

фаз  $v_x$ - и  $v_y$ -компонент:  $\Delta\varphi \sim \frac{v_x}{v_y} \sim \text{ctg}(k' - 2q_0)\sigma$ . То

есть в случае жидкокристаллических структур с пространственной дисперсией наблюдается резонансный характер изменения скорости  $\Delta v$  от частоты, причем вблизи резонансов имеет место скачок фазы на  $2\pi$  (рис. 7) [7–10].

С увеличением частоты величина пьезосигнала и разность фаз уменьшаются ( $v = \text{const}$ ), что, видимо, связано с уменьшением глубины проникновения и угла отклонения. В МББА для частот  $\sim 330 \text{ кГц}$  наблюдается особенность, определяемая релаксационными процессами при тепловом колебании молекул (рис. 8).

Итак, при распространении поперечной вязкой волны в нематохолестерическом жидком кристалле с большим шагом спирали под действием периодического сдвига звукового диапазона индуцируется волна с малым волновым вектором  $(k - 2q)$ , что приводит к резонансному изменению скорости ориентационных волн при изменении частоты их генерации. Согласно теории Проста [3] флексополяризация в холестерических системах определяется градиентом скорости потока, что отражается в резонансном поведении регистрируемого сигнала – переменного напряжения от индуцируемой флексодеформации. Последнее подтверждается экспериментальными данными при изучении, в том числе, и закрученных твист-слоев нематиков.

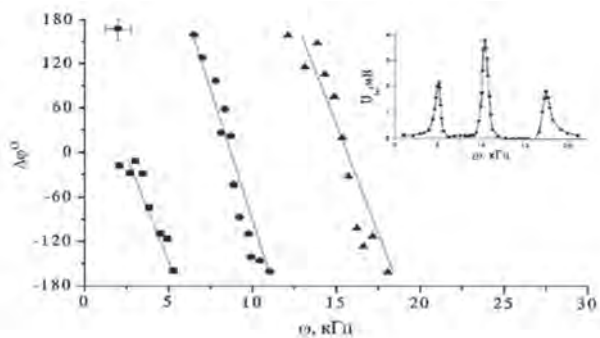


Рис. 7. Частотные зависимости флексоэлектрического сигнала  $U_{\omega}$  и сдвига фаз  $\Delta\varphi$  в закрученном нематике (МББА,  $t_N = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

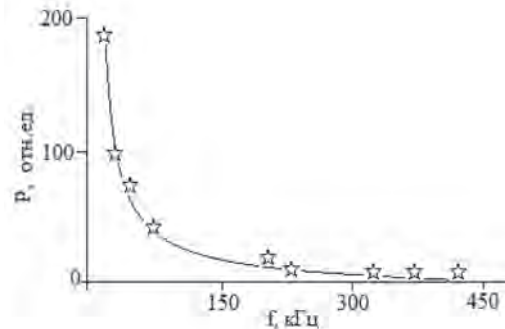


Рис. 8. Частотная зависимость величины индуцированной пьезоэлектрической поляризации

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 12-02-97039, 13-02-01117).

Список литературы

1. Пикин С.А. Структурные превращения в жидких кристаллах [Текст] / С.А. Пикин. – М.: Наука, 1981. – 336 с.
2. Кондратенко В.К. Фотоупругий эффект в нематических жидких кристаллах [Текст] / В.К. Кондратенко, М.М. Фарзтдинов, А.Н. Чувывров // Физика твердого тела, 1975. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 795–799.
3. Prost J. Shear electricity in cholesterics [Text] // Le Journal de Physique. – 1978. – Т. 39, № 6. – P. 639 – 644.
4. Скалдин О.А. Возбуждение пьезоэлектрического эффекта в НЖК с однородной ориентацией молекул и твист-структурах методом сдвиговых колебаний [Текст] / О.А. Скалдин, А.Н. Чувывров // Вопросы физики жидкого состояния / АН СССР, Башфилиал, Отдел физики и математики. – Уфа. – 1986. – С. 26–45.
5. Денисова О.А. Резонансное изменение скорости поперечных акустических волн в твист-структурах жидких кристаллов [Текст] / О.А. Денисова, А.Н. Чувывров // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2011. – Вып. 3 (37). – С. 25–29.
6. Денисова О.А. Один из методов экспериментальных исследований жидких кристаллов [Текст] / О.А. Денисова // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 2. – С. 107–113.
7. Baimakova O.A. The orientational instability of nematic layers under oscillatory shear [Text] / O.A. Baimakova, O.A. Scaldin, A.N. Chuvyrov // Molecule Crystals, Liquid Crystals – 1995. – V. 265. – P. 299–314.

8. Денисова О.А. Неравновесные структурные превращения жидких кристаллов в электрических полях и акустических потоках: научное издание [Текст] / О.А. Денисова. – Уфа: Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 2012. – 188 с.

9. Чувывров А.Н. Физика жидких кристаллов: поверхность: научное издание [Текст] / А.Н. Чувывров, О.А. Денисова, Ф.М. Гирфанова. – Уфа: Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 2009. – 324 с.

10. Денисова О.А. Структурные переходы в жидких кристаллах. Влияние осциллирующих потоков и электрических полей [Текст] / О.А. Денисова, А.Н. Чувывров // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. KG, Saarbrücken, Germany, 2012. – 266 с.

References

1. Pikin S.A. Strukturnye prevrashhenija v zhidkih kristallah [Tekst] / S.A. Pikin. – M.: Nauka, 1981. – 336 s.
2. Kondratenko V.K. Fotouprugij jeffekt v nematicheskikh zhidkih kristallah [Tekst] / V.K. Kondratenko, M.M. Farztdinov, A.N. Chuvyrov // Fizika tverdogo tela, 1975. – T. 17. – Vyp. 3. – S. 795–799.
3. Prost J. Shear electricity in cholesterics [Text] // Le Journal de Physique. – 1978. – T. 39, № 6. – P. 639 – 644.
4. Skaldin O.A. Vozbuzhdenie p'ezojelektricheskogo jeffekta v NZhK s odnorodnoj orientaciej molekul i tvist-strukturah metodom sdvigovyh kolebanij [Tekst] / O.A. Skaldin, A.N. Chuvyrov // Voprosy fiziki zhidkogo sostojanija / AN SSSR, Bashfilial, Otdel fiziki i matematiki, Ufa. – 1986. – S. 26–45.
5. Denisova O.A. Rezonansnoe izmenenie skorosti poperechnyh akusticheskikh voln v tvist – strukturah zhidkih kristallov [Tekst] / O.A. Denisova,

A.N. Chuvyrov // Zhidkie kristally i ih prakticheskoe ispol'zovanie. – 2011. – Vyp. 3 (37). – S. 25–29.

6. Denisova O.A. Odin iz metodov jeksperimental'nyh issledovanij zhidkih kristallov [Tekst] / O.A. Denisova // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – T. 9. – № 2. – S. 107– 113.

7. Baimakova O.A. The orientational instability of nematic layers under oscillatory shear [Tekst] / O.A. Baimakova, O.A. Scaldin, A.N. Chuvyrov // Molecule Crystals, Liquid Crystals – 1995. – V. 265. – P. 299–314.

8. Denisova O.A. Neravnovesnye strukturnye prevrashhenija zhidkih kristallov v jelektricheskikh

poljah i akusticheskikh potokah: Nauchnoe izdanie [Tekst] / O.A. Denisova. – Ufa: Ufimskaja gosudarstvennaja akademija jekonomiki i servisa, 2012. – 188 s.

9. Chuvyrov A.N. Fizika zhidkih kristallov: poverhnost': nauchnoe izdanie [Tekst] / A.N. Chuvyrov, O.A. Denisova, F.M. Girfanova. – Ufa: Ufimskaja gosudarstvennaja akademija jekonomiki i servisa, 2009. – 324 s.

10. Denisova O.A. Strukturnye perehody v zhidkih kristallah. Vlijanie oscillirujushhih potokov i jelektricheskikh polej [Tekst] / O.A. Denisova, A.N. Chuvyrov // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. KG, Saarbrucken, Germany, 2012. – 266 c.



**Доломатов М.Ю.**  
**Dolomatov M.Yu.**

кандидат технических наук, доктор химических наук, профессор кафедры «Физика» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», руководитель лаборатории «Электроника и нанотехнологии», Россия, г. Уфа



**Латыпов К.Ф.**  
**Latypov K.F.**

аспирант кафедры «Физика» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа

УДК 535.333, 539.19

## НАРУШЕНИЕ КВАНТОВОГО ПРИНЦИПА ОРТОГОНАЛЬНОСТИ В АТОМНЫХ СИСТЕМАХ

Знание потенциалов ионизации имеет большое значение в физике плазмы, физической электронике, спектроскопии и химии, т. к. эти физические величины характеризуют процессы транспорта и перехода электронов в различные энергетические состояния. Установлена квазилинейная корреляционная статистическая взаимосвязь между экспериментальными первыми, вторыми и третьими потенциалами ионизации в группах элементов периодической системы Д.И. Менделеева. В качестве объектов для исследования рассмотрены первые, вторые и третьи потенциалы ионизации элементов периодической системы I–VIII групп: I группы от Li до Cs; II группы от Be до Ra; III группы от B до Tl; IV группы от C до Pb; V группы от N до Bi; VI группы от O до Po; VII группы от F до At; VIII группы от He до Xe, а также D-элементы IV, V периодов от Sc до Ac и F-элементы ряда лантаноидов от Pr до Yb, всего 86 атомов. Соответствующие зависимости первых и вторых потенциалов ионизации, а также первых и третьих объясняются квантовым корреляционным взаимодействием электронов, находящихся в разных энергетических состояниях. В качестве основного критерия оценки применены методы параметрической математической статистики: метод однофакторного регрессионного и корреляционного анализа с оценкой коэффициентов корреляции. В работе предполагается, что статистический коэффициент корреляции одновременно является мерой

корреляции электронов, находящихся на различных атомных орбиталях. Результаты подтверждены расчетами и статистической обработкой данных, экспериментальные данные корректны, т. к. воспроизведены в различных лабораториях. Показано, что квантовое корреляционное взаимодействие электронов приводит к нарушению квантового принципа ортогональности, поэтому существующие методы расчета атомов и молекул, основанные на этом принципе, нуждаются в дополнительной корректировке с учетом обнаруженных особенностей.

*Ключевые слова:* потенциалы ионизации атомов, кулоновское и обменное взаимодействие, атомные орбитали, химические элементы, уравнение Шредингера, принцип ортогональности.

## VIOLATION OF ORTHOGONAL QUANTUM PRINCIPLES IN ATOMIC SYSTEMS

Knowledge of ionization potentials is important in plasma physics, physical electronics, spectroscopy and chemistry, because these values characterize the physical processes of transport and transfer of electrons into different energy states. A quasi-linear statistical correlation is found between the experimental first, second and third ionization potentials in groups of elements in the periodic table. In this work we explored the first, second and third ionization potentials of the elements of the periodic system of I–VIII groups: I group – since Li to Cs; II group – Be to Ra; III group – B to Tl; IV group – C to Pb; V group – N to Bi; VI group – O to Po; VII group – F to At; VIII group – He to Xe, and also D-elements of IV, V periods since Sc to Ac and F-elements of the lanthanide series since Pr to Yb, totally 86 atoms. The respective correlation of first and second ionization potentials, as well as first and third can be explained by quantum correlational interaction of electrons in different energy states. In this research we applied parametric methods of mathematical statistics: the method of univariate regression and correlational analysis with the estimation of correlational coefficients. The statistical correlational coefficient is also a measure of correlation of electrons at different atomic orbitals. The results are confirmed by calculations and statistical data proceeding. The experimental data are confirmed due to checking and reproducing in different laboratories. It is assumed that the quantum correlation interaction of electrons leads to a violation of the quantum orthogonal principle, that's why the current methods of atoms and molecules calculation based on this principle should be reviewed and adjusted concerning the newly found characteristics.

*Key words:* ionization potentials of atoms, Coulomb and exchange interaction, atomic orbitals, chemical elements, Schrodinger equation, the principle of orthogonality.

Потенциал ионизации (ПИ) атомов и молекул представляет собой отношение работы (энергии ионизации)  $A_i$  к заряду электрона  $e$ . Знание ПИ имеет большое значение в физике плазмы, физической электронике, спектроскопии и химии, т. к. эти физические величины характеризуют процессы транспорта и перехода электронов в различные энергетические состояния [1, 2]. В приведенных ранее исследованиях [3–6] авторами было установлено, что между энергиями высших и низших электронных состояний в молекулах -азот и -кислородсодержащих органических соединений, полученных спектроскопическим методом и рассчитанных методом Хартри – Фока, существует статистическая корреляционная взаимосвязь. Эта взаимосвязь выражается зависимостью первого потенциала ионизации, определенного экспериментально от энергий глубинных молекулярных орбиталей, полученных квантовыми расчетами. Установленные закономерности имеют вид линейного матричного уравнения, связывающего вектор-столбец глубинных молекулярных орбиталей и матрицу первых ПИ [3] различных по природе химических соединений:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{i1} \\ \varepsilon_{i2} \\ \dots \\ \varepsilon_{im} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -p_{11} \\ 1 & -p_{12} \\ \dots & \dots \\ 1 & -p_{1m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_{1i} \\ \alpha_{2i} \\ \dots \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_{i1} \\ \omega_{i2} \\ \dots \\ \omega_{im} \end{pmatrix} \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{ij}$  – элемент матрицы-столбца, соответствующий энергии  $i$ -й МО  $j$ -го соединения;  $\alpha_{1i}$  – энергия  $i$ -й МО при  $p_{1j}=0$ ;  $\alpha_{2i}$  – коэффициент, характеризующий изменение энергии  $i$ -й МО при увеличении энергии соответствующего уровня на 1эВ;  $p_{1j}$  – первый ПИ  $i$ -го соединения;  $\omega_{ij}$  – параметр возмущения, учитывающий отклонение  $\varepsilon_{ij}$  от среднего значения,  $i=2\dots n$ ,  $j=1\dots m$ .

Первые ПИ были определены методом спектроскопии в УФ и видимой области спектра по специально разработанной методике [7], а глубинные ПИ были рассчитаны методом Хартри – Фока в приближении 6-31G\*\*[8].

Недостатком работ является расчет энергии глубинных орбиталей в виде хартри-фовских волновых функций, построенных как линейная комбинация атомных гауссовских волновых функций, которые задаются приближенно, исходя из

полноты атомного базиса. Метод Хартри – Фока допускает, что движение каждого электрона происходит независимо друг от друга в усредненном электромагнитном поле, создаваемом остальными электронами и ядрами. Приближение Хартри – Фока рассматривает электроны как независимые частицы, но электроны с одинаковыми спинами отталкиваются в соответствии с принципом Паули и движутся независимо друг от друга. Этот эффект называется эффектом электронной корреляции, который необходимо учитывать в расчетах и экспериментах.

Целью работы является статистическое исследование электронной корреляции в атомных системах с применением экспериментальных значений электронных состояний, характеризующихся первыми, вторыми и третьими ПИ.

*Объекты и результаты расчетов*

В качестве объектов исследования рассмотрены первые, вторые и третьи ПИ элементов периодической системы I–VIII групп: I группы от Li до Cs; II группы от Be до Ra; III группы от B до Tl; IV группы от C до Pb; V группы от N до Bi; VI группы от O до Po; VII группы от F до At; VIII группы от He до Xe, а также D-элементы IV, V периодов от Sc до As и F-элементы ряда лантаноидов от Pr до Yb, всего 86 атомов. Выбор первых трех ПИ атомов обусловлен достоверной справочной информацией, полученной методом фотоэлектронной рентгеновской спектроскопии [9].

С применением метода наименьших квадратов, в приближении однофакторного регрессионного и корреляционного анализа, исследованы корреляционные связи между первыми, вторыми и третьими ПИ следующего вида:

$$P_{2i} = \alpha_{i1} + \alpha_{i2} P_{1i} \tag{2}$$

$$P_{3i} = \beta_{i1} + \beta_{i2} P_{1i} \tag{3}$$

где  $P_{1i}, P_{2i}, P_{3i}$  – первый, второй и третий ПИ i-го атома, эВ;  $\alpha_{i1}, \beta_{i1}$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от природы атомной системы, эВ;  $\alpha_{i2}, \beta_{i2}$  – безразмерные коэффициенты.

Выбор однофакторного регрессионного и корреляционного анализа обусловлен предположением о гауссовом характере флуктуаций электронных движений, из которого следует возможность применения методов параметрической математической статистики.

Выбор регрессионных зависимостей (2, 3) согласуется с первым приближением теории возмущений, которая предполагает квазилинейную связь энергетических состояний квантовой системы [10]. В качестве статистических критериев использовался коэффициент линейной корреляции и стандартные отклонения расчетных и экспериментальных значений. Важно отметить, что среди редкоземельных элементов группы лантаноидов в расчетах учитывали только элементы с электронной оболочкой  $4f^{n+1}6s^2$ . Элементы с оболочкой  $4f^n$ , которым принадлежат La, Lu, Gd, Ce, не рассматривали.

Результаты статистической обработки данных приведены в табл. и на рис. 1–3.

Таблица

**Результаты статистической обработки зависимостей между ПИ элементов таблицы Менделеева**

Группы элементов	элементы	ПИ1, эВ опыт	ПИ2, эВ опыт	ПИ2, эВ расчет по зависимости (2)	абс. погрешность, эВ	ср. квадрат. отклонение, эВ	коэф. корреляции	ПИ3, эВ опыт	ПИ3, эВ расчет по зависимости (3)	абс. погрешность, эВ	ср. квадрат. отклонение, эВ	коэф. корреляции
I группа	Li	5,392	75,641	65,735	9,906	3,86	0,93	122,454	106,496	15,958	8,22	0,92
	Na	5,139	47,304	58,095	10,791			71,620	91,822	20,202		
	K	4,341	31,820	33,998	2,178			45,806	45,538	0,268		
	Rb	4,177	27,500	29,046	1,546			40,000	36,026	3,974		
	Cs	3,894	25,100	20,500	4,600							

Группы элементов	элементы	ПИ1, эВ опыт	ПИ2, эВ опыт	ПИ2, эВ расчет по зависимости (2)	абс. погрешность, эВ	ср. квадр. отклонение, эВ	коэф. корреляции	ПИ3, эВ опыт	ПИ3, эВ расчет по зависимости (3)	абс. погрешность, эВ	ср. квадр. отклонение, эВ	коэф. корреляции
II группа	Be	9,323	18,221	18,290	0,069	0,03	1,00	153,897	145,7935	8,224395	19,49	0,98
	Mg	7,646	15,036	14,927	0,109			80,144	95,51708	58,37992		
	Ca	6,113	11,871	11,853	0,018			50,913	49,55774	30,58626		
	Sr	5,694	11,030	11,013	0,017			42,890	36,99612	13,91688		
	Ba	5,211	10,004	10,044	0,040							
	Ra	5,279	10,147	10,180	0,033							
III группа	B	8,299	25,156	17,506	7,650	1,94	0,93	37,931	23,69476	19,48614	10,19	0,81
	Al	5,986	18,829	13,144	5,685			28,448	23,8426	18,34036		
	Ga	5,998	20,514	13,167	7,347			30,710	30,40869	7,522314		
	In	5,786	18,870	12,767	6,103			28,030	25,37976	3,068239		
	Tl	6,108	20,429	13,374	7,055			29,830	25,40585	5,304148		
IV группа	C	11,260	24,383	23,089	1,294			47,888	24,94492	3,085079		
	Si	8,152	16,842	17,228	0,386			33,493	25,64501	4,184986		
	Ge	7,900	15,934	16,753	0,819			34,224	36,84649	11,04151		
	Sn	7,344	14,632	15,705	1,073			30,503	30,08908	3,403922		
	Pb	7,417	15,032	15,843	0,811			31,937	29,54118	4,68282		
V группа	N	14,534	29,601	29,262	0,339			47,449	28,33232	2,170675		
	P	10,487	19,730	21,631	1,901			30,203	28,49104	3,445959		
	As	9,815	18,620	20,364	1,744			28,351	43,96482	3,484177		
	Sb	8,640	16,500	18,149	1,649			25,300	35,16584	4,962835		
	Bi	12,249	16,740	24,953	8,213			25,560	33,70477	5,353773		
VI группа	O	13,681	35,118	27,653	7,465			54,936	31,15009	5,850088		
	S	10,360	23,35	21,392	1,958			34,709	38,99678	13,43678		
	Se	9,752	21,19	20,245	0,945			30,82	42,11023	12,82577		
	Te	9,01	18,6	18,846	0,246			27,96	34,88971	0,180712		
	Po	8,43	19,4	17,753	1,647							
VII группа	F	17,423	34,988	34,709	0,278			62,708	31,95454	3,994542		
	Cl	12,968	23,805	26,309	2,504	39,61	30,69351	30,69351				
	Br	11,84	21,80	24,182	2,382	36	50,2463	12,4617				
	I	17,423	34,986	34,709	0,277	33	40,56003	0,950026				
	At	9,2	20,1	19,204	0,896							
VIII группа	He	24,586	54,416	48,215	6,201		50,24609	17,24609				
	Ne	21,587	41,08	42,560	1,480	63,45	32,36764	32,36764				
	Ar	15,760	27,63	31,573	3,943	40,74	65,81988	65,81988				
	Kr	14,000	24,37	28,254	3,884	36,95	59,29946	4,150545				
	Xe	12,13	21,25	24,729	3,479	32,123	46,63039	5,890392				
D-элементы	Sc	6,562	12,800	14,230	1,430	24,757	42,80337	5,853365				
	Ti	6,820	13,580	14,717	1,137	27,492	38,73805	6,615046				
	V	6,740	14,210	14,566	0,356	29,311	26,6321	1,8751				
	Cr	6,765	16,489	14,613	1,876	30,960	27,19304	0,298956				
	Mn	7,435	15,640	15,876	0,236	33,668	27,01911	2,291892				

Группы элементов	элементы	ПИ1, эВ опыт	ПИ2, эВ опыт	ПИ2, эВ расчет по зависимости (2)	абс. погрешность, эВ	ср. квадр. отклонение, эВ	коэф. корреляции	ПИ3, эВ опыт	ПИ3, эВ расчет по зависимости (3)	абс. погрешность, эВ	ср. квадр. отклонение, эВ	коэф. корреляции
	Fe	7,893	16,183	16,740	0,557			30,652	27,07346	3,886537		
	Co	7,866	17,057	16,689	0,368			33,500	28,53018	5,137823		
	Ni	7,635	18,153	16,254	1,899			35,190	29,52596	1,126039		
	Cu	7,726	20,292	16,425	3,867			36,841	29,46726	4,032743		
	Zn	9,394	17,964	19,570	1,606			39,723	28,96502	6,224983		
	Y	6,217	12,240	13,580	1,340			20,520	29,16287	7,678131		
	Zr	6,837	13,130	14,749	1,619			22,990	32,78943	6,933565		
	Nb	6,882	14,320	14,834	0,514			25,040	25,882	5,362001		
	Mo	7,100	16,155	15,245	0,910			27,130	27,23001	4,240005		
	Tc	7,278	15,263	15,580	0,317			29,540	27,32784	2,287844		
	Ru	7,366	16,763	15,746	1,017			28,470	27,80182	0,67182		
	Rb	7,460	18,077	15,924	2,153			31,060	28,18883	1,351172		
	Pd	8,336	19,428	17,575	1,853			32,930	28,38016	0,089843		
	Ag	7,576	21,487	16,142	5,345			34,830	28,58453	2,475468		
	Cd	8,994	16,909	18,816	1,907			37,480	30,48913	2,440869		
	La	5,577	11,060	12,373	1,313			19,177	28,83674	5,993261		
	Hf	7,500	14,900	15,999	1,099			23,300	31,91975	5,560245		
	Hg	10,438	18,756	21,539	2,783			34,200	24,49051	5,313513		
	Ta	7,890	16,200	16,734	0,534							
	W	7,980	17,700	16,904	0,796							
Re	7,880	16,600	16,716	0,116								
Os	8,500	17,000	17,885	0,885								
Ir	9,100	17,000	19,016	2,016								
Pt	8,900	18,536	18,639	0,103								
Au	9,225	20,500	19,252	1,248								
Ac	5,120	12,060	11,512	0,548								
лантаноиды	Pr	5,42	10,55	12,077	1,527			21,623	32,422	32,422		
	Tb	5,85	11,52	12,888	1,368			21,91	23,4969	23,4969		
	Dy	5,93	11,67	13,039	1,369			22,8	24,14916	2,526164		
	Ho	6,02	11,80	13,209	1,409			22,84	25,08407	3,17407		
	Er	6,10	11,93	13,359	1,429			22,74	25,25801	2,458006		
	Tm	6,184	12,05	13,518	1,468			23,68	25,45368	2,613684		
	Nd	5,49	10,72	12,209	1,489			22,1	25,62762	2,88762		
	Pm	5,55	10,90	12,322	1,422			22,3	25,81025	2,130253		
	Sm	5,60	11,07	12,417	1,347			23,4	24,30136	2,201358		
	Tb	5,85	11,52	12,888	1,368			21,91	24,43181	2,13181		
	Dy	5,93	11,67	13,039	1,369			22,8	24,54052	1,14052		
	Ho	6,02	11,80	13,209	1,409			22,84	25,08407	3,17407		
	Er	6,10	11,93	13,359	1,429			22,74	25,25801	2,458006		
	Tm	6,184	12,05	13,518	1,468			23,68	25,45368	2,613684		
Eu	5,664	11,25	12,537	1,287			24,92	25,62762	2,88762			
Yb	6,25	12,18	13,642	1,462			25,05	25,81025	2,130253			

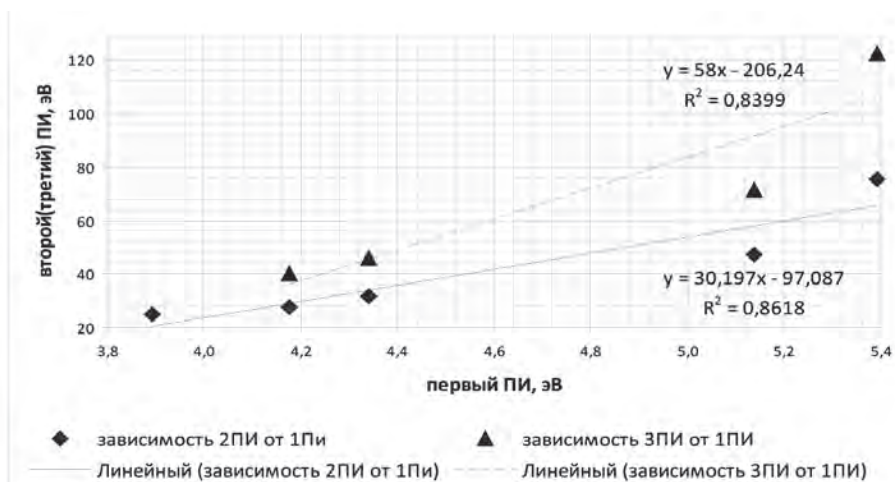


Рис. 1. Зависимость второго и третьего ПИ от первого ПИ для элементов I группы

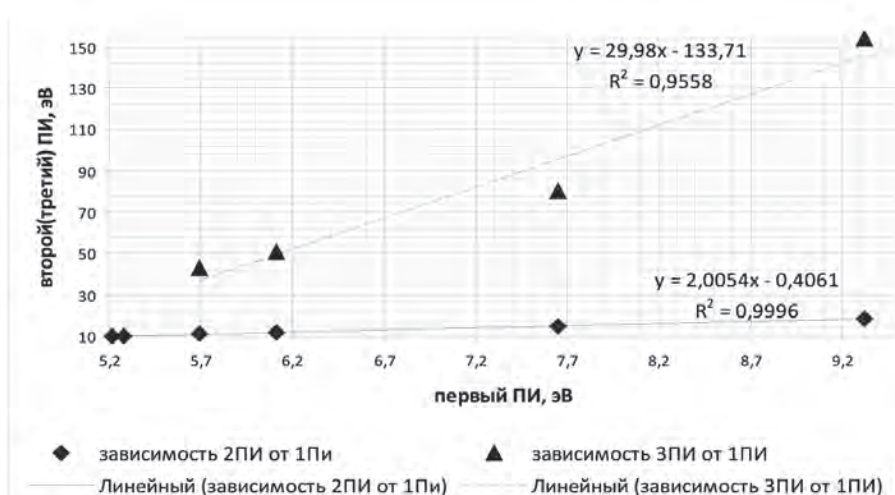


Рис. 2. Зависимость второго и третьего ПИ от первого ПИ для элементов II группы

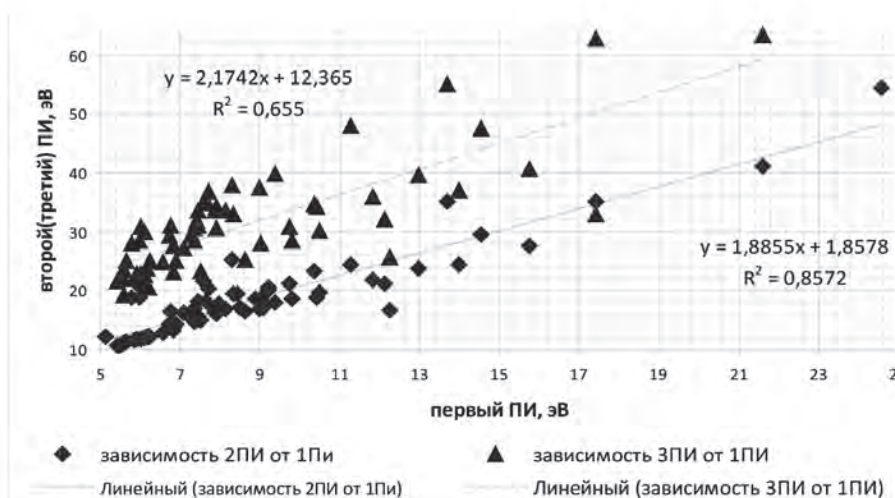


Рис. 3. Зависимость второго и третьего ПИ от первого ПИ в группах III–VIII, лантаноидов и D-элементов



Расчеты согласно зависимостям (2–3) имеют следующие статистические характеристики: коэффициент линейной корреляции  $R$  между первым и вторым ПИ для атомов элементов I–VIII групп,  $D$ -элементов и лантаноидов  $R \in [0,91...1,00]$ ; средние квадратичные отклонения  $\delta \in \pm [0,03...3,86]$  эВ. Соответствующие характеристики корреляции между первыми и третьими ПИ для атомов элементов I–VIII групп,  $D$ -элементов и лантаноидов:  $R \in [0,81...0,98]$ , средние относительные отклонения в интервале  $\delta \in \pm [8,22...19,49]$  эВ.

#### Обсуждение результатов

Как следует из таблицы и рисунков 1–3, существует корреляционная квазилинейная связь первого, второго и третьего потенциалов ионизации атомов химических элементов, которая выполняется в пределах трех электронных оболочек, характеризующихся различными значениями квантовых чисел. Взаимная линейная корреляция между тремя ПИ имеет место и подтверждается значительным коэффициентом корреляции, находящимися в интервале от 0,81 до 1. Более резкая нелинейность для зависимости третьего ПИ от первого ПИ объясняется, по-видимому, особенностями эксперимента и электронной структуры атомов.

С позиции квантовой теории можно предположить следующее объяснение обнаруженных закономерностей. Как известно, электроны в атомах движутся в усредненном центральном электростатическом поле, создаваемом многоэлектронной системой. Кроме электростатического взаимодействия с ядром и другими электронами, электроны испытывают эффекты квантовой корреляции, которые возникают из-за отталкивания частиц с одинаковыми спинами.

Как известно, движение электрона в общем случае подчиняется нестационарному уравнению Шредингера для многоэлектронного гамильтониана:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = H\Psi, \quad (4)$$

где  $\Psi$  – волновая функция, описывающая движение электрона в поле атомного ядра;  $H$  – соответствующий оператор Гамильтона, который можно представить в следующем виде:

$$H = -\sum_{i=1}^n \frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla_i^2 + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \frac{e^2}{r_{ij}} - \sum_i \frac{Ze^2}{R_i} + H', \quad (5)$$

где  $z$  – заряд ядра, эВ;  $r_{ij}$  – расстояние между электронами, м;  $R_i$  – расстояние между ядрами и электронами, м;  $H'$  – спиновая составляющая гамильтониана, эВ, которая учитывает спин-спиновое и спин-орбитальное взаимодействие и, как известно, мала по сравнению с остальными слагаемыми (5) [10].

Первый член в (5) представляет собой кинетическую энергию движения электронов, второй соответствует кулоновскому отталкиванию электронов, а третий – кулоновскому притяжению электронов к атомному ядру. В условиях эксперимента по определению ПИ внешнее магнитное поле во внимание не принимается. Аналитическими методами задача (4) не может быть решена точно и решается, как известно, в приближении Хартри – Фока и функционала плотности Коена – Шэма. Феноменологическое рассмотрение этой проблемы возможно с использованием интегральной формы обыкновенного дифференциального уравнения Шредингера, которая сводится к задаче Коши при заданной начальной одноэлектронной волновой функции, описывающей взаимодействие электронов. Эта функция нестационарная и имеет вид:

$$\Psi = \Psi_0(\vec{r}_1, t_1). \quad (6)$$

Как известно, в интегральной фейнмановской форме уравнение (4) имеет вид интегрального уравнения Фредгольма первого рода [10]:

$$\Psi(\vec{r}_2, t_2) = \int K(\vec{r}_2, t_2; \vec{r}_1, t_1) \Psi(\vec{r}_1, t_1) d\vec{r}_1. \quad (7)$$

Решением уравнения (7) при начальных условиях (6) является функция Грина:

$$K(\vec{r}_2, t_2; \vec{r}_1, t_1) = \delta(\vec{r}_2 - \vec{r}_1). \quad (8)$$

По Фейнману, эта функция Грина представляет собой амплитуду перехода волновой функции из состояния  $\Psi(\vec{r}_1, t_1)$  в состояние  $\Psi(\vec{r}_2, t_2)$ .

Из решения следует принцип ортогональности волновых функций:

$$\sum \Psi_n(\vec{r}_1) \Psi_n(\vec{r}_2) = \delta(\vec{r}_2, \vec{r}_1). \quad (9)$$

Приведенные выше экспериментальные результаты по взаимному влиянию первого, второго и третьего ПИ свидетельствуют о том, что электроны, находящиеся на разных атомных орбиталях, влияют друг на друга и их движение скоррелировано и взаимозависимо, поэтому правила (8–9) нарушаются. Кроме того, нарушение принципа ортогональности означает, что задача решения интегрального уравнения (7) некорректна по Адамару – Тихонову [11] и имеет бесконечное множество решений, которые открывают дальнейшие пути для полуэмпирических и неэмпирических расчетов атомных и молекулярных систем.

#### Выводы

На основе статистической обработки экспериментальных данных и теоретических исследований установлены квазилинейные зависимости, связывающие между собой первые, вторые и третьи потенциалы ионизации большинства химических элементов периодической системы Д.И. Менделеева.

Обнаруженные статистические закономерности объясняются эффектами квантового корреляционного и кулоновского взаимодействия электронов, соответствующих различным энергетическим состояниям атомов.

Из взаимной зависимости потенциалов ионизации атомов следует, что корреляционное взаимодействие приводит к нарушению квантового принципа ортогональности. Поэтому существующие методы расчета атомов и молекул нуждаются в дополнительной корректировке с учетом обнаруженных особенностей. Важно отметить, что методы математической статистики можно применять для исследования квантовых корреляций, что позволяет расширить исследовательские возможности квантовых методик.

#### Список литературы

1. Травень В.Ф. Электронная структура и свойства органических молекул [Текст] / В.Ф. Травень. – М.: Химия, 1989. – 384 с.
2. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия [Текст] / М.А. Ельяшевич. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 896 с.
3. Долomatov М.Ю., Латыпов К.Ф. Влияние низших энергетических уровней на первые адиабатические потенциалы ионизации молекул азотосодержащих соединений [Текст] / М.Ю. Долomatov, К.Ф. Латыпов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 69–76.
4. Dolomatov M.Yu., Latypov K.F. Influence of lower energy levels on the first ionization potentials of molecules on the example of oxygen-containing compounds [Text] / M.Yu. Dolomatov, K.F. Latypov // Applied physics research. – 2012. – V. 4. – No. 3. – P. 152–158.
5. Dolomatov M.Yu., Latypov K.F. Influence of lower energy levels on the first ionization potentials of molecules on the example of oxygen-containing compounds [Text] / M.Yu. Dolomatov, K.F. Latypov // ElecMol'12 conference. Grenoble, France, 2012.
6. Dolomatov M.Yu. Specific quantum interaction in the molecules and nanoparticles of organic semiconductors. Trends in nanotechnologies [Electronic resource] / M.Yu. Dolomatov, N.Kh. Paymurzina, K.F. Latypov, G.R. Mukaeva // Seville, Spain, 2013. – URL: <http://www.tntconf.org/2013/Abstracts>.
7. Dolomatov M.Yu., Mukaeva G.R., Shulyakovskaya D.O. Electron Phenomenological Spectroscopy and Its Application in Investigating Complex Substances in Chemistry, Nanotechnology and Medicine [Text] / M.Yu. Dolomatov, G.R. Mukaeva, D.O. Shulyakovskaya

//Journal of Materials Science and Engineering. – 2013. – В 3 (3). – P. 183–199.

8. Frank Jensen Introduction to Computational Chemistry [Text] / Jensen Frank. – Denmark: John Wiley&Sons, Ltd, 2007. – P. 119–125.

9. Кондратьева В.Н. Энергия разрыва химических связей, потенциал ионизации и сродство к электрону [Текст] / В.Н. Кондратьева. – М.: Наука, 1974. – С. 294–330.

10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика (нерелятивистская теория) [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – М.: Физматлит, 2004. – 800 с.

11. Воскобойников Ю.Е., Мицель А.А. Современные проблемы прикладной математики. Часть 1. Лекционный курс, учебное пособие [Текст] / Ю.Е. Воскобойников, А.А. Мицель. – Томск: ТУСУР, 2010. – 136 с.

#### References

1. Traven' V.F. Jelektronnaja struktura i svojstva organicheskikh molekul [Tekst] / V.F. Traven'. – M.: Himija, 1989. – 384 s.
2. El'jashevich M.A. Atomnaja i molekuljarnaja spektroskopija [Tekst] / M.A. El'jashevich. – M.: Jeditorial URSS, 2001. – 896 s.
3. Dolomatov M.Ju., Latypov K.F. Vlijanie nizshih jenergeticheskikh urovnej na pervye adiabaticheskie potentsialy ionizacii molekul azotosoderzhashhih soedinenij [Tekst] / M.Ju. Dolomatov, K.F. Latypov // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Fiziko-matematicheskie nauki. – 2011. – № 3 (19). – S. 69–76.
4. Dolomatov M.Yu., Latypov K.F. Influence of lower energy levels on the first ionization potentials of molecules on the example of oxygen-containing compounds [Text] / M.Yu. Dolomatov, K.F. Latypov // Applied physics research. – 2012. – V. 4. – No. 3. – P. 152–158.
5. Dolomatov M.Yu., Latypov K.F. Influence of lower energy levels on the first ionization potentials of molecules on the example of oxygen-containing compounds [Text] / M.Yu. Dolomatov, K.F. Latypov // ElecMol'12 conference. Grenoble, France, 2012.
6. Dolomatov M.Yu. Specific quantum interaction in the molecules and nanoparticles of organic semiconductors. Trends in nanotechnologies [Electronic resource] / M.Yu. Dolomatov, N.Kh. Paymurzina, K.F. Latypov, G.R. Mukaeva // Seville, Spain, 2013. – URL: <http://www.tntconf.org/2013/Abstracts>.
7. Dolomatov M.Yu., Mukaeva G.R., Shulyakovskaya D.O. Electron Phenomenological Spectroscopy and Its Application in Investigating Complex Substances in Chemistry, Nanotechnology and Medicine [Text] /

M.Yu. Dolomatov, G.R. Mukaeva, D.O. Shulyakovskaya // Journal of Materials Science and Engineering. – 2013. – B 3 (3). – P. 183–199.

8. Frank Jensen Introduction to Computational Chemistry [Text] / Jensen Frank. – Denmark: John Wiley&Sons, Ltd, 2007. – P. 119–125.

9. Kondrat'eva V.N. Jenergija razryva himicheskikh svjazej, potencial ionizacii i srodstvo k jelektronu [Tekst]

/ V.N. Kondrat'eva. – M.: Nauka, 1974. – S. 294–330.

10. Landau L.D., Lifshic E.M. Kvantovaja mehanika (nereljativistskaja teorija) [Tekst] / L.D. Landau, E.M. Lifshic. – M.: Fizmatlit, 2004. – 800 s.

11. Voskoboynikov Ju.E., Micel' A.A. Sovremennye problemy prikladnoj matematiki. Chast' 1. Lekcionnyj kurs, uchebnoe posobie [Tekst] / Ju.E. Voskoboynikov, A.A. Micel'. – Tomsk: TUSUR, 2010. – 136 s.

## ОБ АВТОРАХ

*Захарова Наталья Васильевна*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Детали машин», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет», e-mail: nvzdm@mail.ru, Россия, г. Омск.

*Татевосян Александр Сергеевич*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет», e-mail: ast\_51@mail.ru, Россия, г. Омск.

*Шабанов Виталий Алексеевич*, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Шарипова Светлана Филарисовна*, аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: SharipovaSveta@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Ахметгареев Альберт Азатович*, магистрант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: motor\_vehicle@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Феоктистов Николай Алексеевич*, д-р техн. наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет дизайна и технологий», e-mail: nikolay.a.feoktistov@gmail.com, Россия, г. Москва.

*Феоктистов Андрей Николаевич*, канд. техн. наук, доцент, Негосударственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Институт государственного управления, права и инновационных технологий», e-mail: andrey.feoktistov@gmail.com, Россия, г. Москва.

*Аипов Рустам Сагитович*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрические машины и электрооборудование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: nugraush@rambler.ru, Россия, г. Уфа.

*Нугуманов Раушан Римович*, аспирант кафедры «Электрические машины и электрооборудование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: nugraush@rambler.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 бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», e-mail: zikiy50@mail.ru, Россия, г. Таганрог.

*Зламан Павел Николаевич*, ведущий инженер-конструктор проекта «Научно-конструкторское бюро моделирующих и управляющих систем», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», e-mail: otdel24d@nkbmius.ru, Россия, г. Таганрог.

*Власенко Даниил Васильевич*, ассистент кафедры «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», Технологический институт Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», e-mail: vlasenko960@yandex.ru, Россия, г. Таганрог.

*Рахманова Юлия Владиславовна*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: tananda21@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Рогинская Любовь Эммануиловна*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: tananda21@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Шapiro Семен Вольфович*, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Физика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: svshar@ufacom.ru, Россия, г. Уфа.

*Кушнин 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.

*Кошкин Игорь Владимирович*, канд. техн. наук, зав. кафедрой «Электроэнергетика и физика» Костанайского государственного университета им. А. Байтурсынова, e-mail: koshkin@mail.kz, Республика Казахстан, г. Костанай.

*Исмагилов Флор Рашитович*, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: s2\_88@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Хайруллин Ирек Ханифович*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: s2\_88@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Вавилов Вячеслав Евгеньевич*, ассистент кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: s2\_88@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Возмилов Александр Григорьевич*, доктор технических наук, профессор кафедры «Энергообеспечение сельского хозяйства», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», e-mail: vozmiag44@gambler.ru, Россия, г. Тюмень.

*Андреев Леонид Николаевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергообеспечение сельского хозяйства», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», e-mail: alextmn86@mail.ru, Россия, г. Тюмень.

*Дмитриев Алексей Анатольевич*, аспирант кафедры «Энергообеспечение сельского хозяйства», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», e-mail: alextmn86@mail.ru, Россия, г. Тюмень.

*Жеребцов Борис Викторович*, преподаватель кафедры «Энергообеспечение сельского хозяйства», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», e-mail: alextmn86@mail.ru, Россия, г. Тюмень.

*Муфтиев Салават Разитович*, аспирант кафедры «Физика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: muftiev@yandex.ru Россия, г. Уфа.

*Ефанов Владимир Николаевич*, 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: efanov@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Китабов Андрей Николаевич*, аспирант кафедры «Электроника и биомедицинские технологии», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: andrey.ugatu@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Колгаев Юрий Борисович*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: samaxod@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Артюшенко Владимир Михайлович*, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Информационные технологии и управляющие системы», Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московской области «Финансово-технологическая академия», e-mail: artuschenko@mail.ru, Россия, г. Королев.

*Самаров Ким Леонидович*, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой «Математика и

естественно-научные дисциплины», Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московской области «Финансово-технологическая академия», e-mail: kimsamarov@yandex.ru, Россия, г. Королев.

*Берг Олег Игоревич*, аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: oiberg@bk.ru, Россия, г.Уфа.

*Ураксеев Марат Абдуллович*, доктор технических 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.

*Баженов Игорь Алексеевич*, канд. техн. наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», e-mail: mta@kpost.ru, Россия, г. Екатеринбург.

*Васильев Александр Николаевич*, доктор технических наук, профессор кафедры «Высшая математика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», e-mail: a.n.vasilyev@gmail.com, Россия, г. Санкт-Петербург.

*Осипов Владимир Петрович*, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша» Российской академии наук, e-mail: osipov@keldysh.ru, Россия, г. Москва.

*Сивакова Татьяна Владимировна*, младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша» Российской академии наук, e-mail: sivakova15@mail.ru, Россия, г. Москва.

*Павлов Сергей Викторович*, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Геоинформационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: psvgis@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Давлетбакова Зульфия Лотфулловна*, аспирант кафедры «Геоинформационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: davletbakova@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Абдуллин Айдар Хайдарович*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: psvgis@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Журавлева Надежда Александровна*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Экономическая информатика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: zhuravliova80@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Доломатов Михаил Юрьевич*, канд. техн. наук, д-р хим. наук, профессор кафедры «Физика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», руководитель лаборатории «Электроника и нанотехнологии», e-mail: dolomatov@gmail.com, Россия, г. Уфа.

*Мартынов Виталий Владимирович*, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Экономическая информатика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: martynov@rb.ru, Россия, г. Уфа.

*Филосова Елена Ивановна*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Экономическая информатика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: filosova@ufamail.ru, Россия, г. Уфа.

*Ширяев Олег Валерьевич*, ассистент кафедры «Экономическая информатика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: oleg\_shiryayev@bk.ru, Россия, г. Уфа.

*Швецов Александр Игоревич*, ассистент кафедры «Экономическая информатика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: veter-dead@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Шулаева Екатерина Анатольевна*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Стерлитамакский филиал, e-mail: eshulaeva@mail.ru, Россия, г. Стерлитамак.

*Даминев Рустем Рифович*, д-р техн. наук, профессор, директор Стерлитамакского филиала Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: rrdaminev@rambler.ru, Россия, г. Стерлитамак.

*Исламутдинова Айгуль Акрамовна*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Общая химическая технология», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Стерлитамакский филиал, e-mail: rrdaminev@rambler.ru, Россия, г. Стерлитамак.

*Давыдов Андрей Иванович*, аспирант кафедры «Машины, аппараты, приборы и технологии сервиса», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: andrey87ufa@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Мухамадиев Айдар Асхатович*, канд. техн. наук, доцент 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.

*Денисова Ольга Аркадьевна*, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: denisovaolga@bk.ru, Россия, г. Уфа.

*Скалдин Олег Алексеевич*, доктор физ.-мат. наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики молекул и кристаллов» Уфимского научного центра Российской академии наук, e-mail: scala@anrb.ru, Россия, г. Уфа.

*Латыпов Камил Фаридович*, аспирант кафедры «Физика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: kamil-latipov@rambler.ru Россия, г. Уфа.

## ABOUT THE AUTHORS

*Zacharova Natal'a V.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Machine parts», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Omsk state technical university», e-mail: nvzdm@mail.ru, Russia, Omsk.

*Tatevosyan Alexander S.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Theoretical and general electrical engineering», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Omsk state technical university», e-mail: ast\_51@mail.ru, Russia, Omsk.

*Shabanov Vitaliy A.*, cand. sci. tech., associate professor, head 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: ShabanovVA1@yandex.ru, Russia, Ufa.

*Sharipova Svetlana F.*, post-graduate student 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: SharipovaSveta@yandex.ru, Russia, Ufa.

*Ahmetgareev Albert A.*, undergraduate 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: motor\_vehicle@mail.ru, Russia, Ufa.

*Feoktistov Nikolay A.*, dr. sci. tech., professor, Federal state budgetary educational institution of higher professional

education «Moscow state university of design and technology», e-mail: nikolay.a.feoktistov@gmail.com, Russia, Moscow.

*Feoktistov Andrey N.*, cand. sci. tech., associate professor, Non-state educational institution of higher professional education «Institute of government, right and innovative technologies», e-mail: andrey.feoktistov@gmail.com, Russia, Moscow.

*Aipov Rustam S.*, dr. sci. tech., professor chair of «Electrical machines and equipment», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Bashkir state agrarian university», e-mail: nugraush@rambler.ru, Russia, Ufa.

*Nugumanov Raushan R.*, post-graduate student chair of «Electrical machines and equipment», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Bashkir state agrarian university», e-mail: nugraush@rambler.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 budgetary 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 budgetary educational institution of higher professional education «Southern federal university», e-mail: otel24d@nkbmius.ru, Russia, Taganrog.

*Vlasenko Daniil V.*, assistant chair of «Information security of telecommunication systems» Institute of technology Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Southern Federal University», e-mail: vlasenko960@yandex.ru, Russia, Taganrog.

*Rakhmanova Julia V.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Electromechanics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: tananda21@yandex.ru, Russia, Ufa.

*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, Russia, Ufa.

*Shapiro Semen V.*, dr. sci. tech., professor, head chair of «Physics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state university of economics and service», e-mail: svshap@ufacom.ru, Russia, Ufa.

*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, Republic of Kazakhstan, Kostanay.

*Koshkin Igor V.*, cand. sci. tech., head chair of «Electric Power and Physics», Kostanay state university named after A.Baitursynov, e-mail: koshkin@mail.kz, Republic of Kazakhstan, Kostanay.

*Ismagilov Flur R.*, dr. sci. tech., professor, head chair of «Electromechanics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: s2\_88@mail.ru, Russia, Ufa.

*Khayrullin Irek Kh.*, dr. sci. tech., professor chair of «Electromechanics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: s2\_88@mail.ru, Russia, Ufa.

*Vavilov Vyacheslav E.*, assistant chair of «Electromechanics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: s2\_88@mail.ru, Russia, Ufa.

*Vozmilov Alexander G.*, dr. sci. tech., professor chair of «Power supply agriculture», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «State agrarian university of Northern Zauralye», e-mail: vozmiag44@rambler.ru, Russia, Tyumen.

*Andreev Leonid N.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Power supply agriculture», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «State agrarian university of Northern Zauralye», e-mail: alextmn86@mail.ru, Russia, Tyumen.

*Dmitriev Alexey A.*, post-graduate student chair of «Power supply agriculture», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «State agrarian university of Northern Zauralye», e-mail: alextmn86@mail.ru, Russia, Tyumen.



*Zherebtsov Boris V.*, lecturer chair of «Power supply agriculture», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «State agrarian university of Northern Zauralye», e-mail: alextmn86@mail.ru, Russia, Tyumen.

*Muftiev Salavat R.*, post-graduate student chair of «Physics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state university of economics and service», e-mail: muftiev@yandex.ru Russia, Ufa.

*Efanov Vladimir N.*, 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: efanov@mail.ru, Russia, Ufa.

*Kitabov Andrey N.*, post-graduate student chair of «Electronics and biomedical technologies», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: andrey.ugatu@mail.ru, Russia, Ufa.

*Kolegaev Yuri B.*, 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: samaxod@yandex.ru, Russia, Ufa.

*Artuschenko Vladimir M.*, dr. sci. tech., professor, head chair of «Information technology and control systems», State budgetary educational institution of higher professional education Moscow region «Financial and technological academy», e-mail: artuschenko@mail.ru, Russia, Korolev.

*Samarov Kim L.*, dr. tech. phys.-math., professor, head chair of «Mathematics and natural sciences», State budgetary educational institution of higher professional education Moscow region «Financial and technological academy», e-mail: kimsamarov@yandex.ru, Russia, Korolev.

*Berg Oleg 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: oiberg@bk.ru, Russia, Ufa.

*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.

*Bazhenov Igor A.*, cand. sci. tech., associate professor, Federal state autonomous educational institution of higher professional education «Ural federal university named after the first president of Russia B.N. Yeltsin», e-mail: mta@kpost.ru, Russia, Ekaterinburg.

*Vasilyev Alexander N.*, dr. sci. tech., professor chair of «Higher mathematics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «St. Petersburg state polytechnical university», e-mail: a.n.vasilyev@gmail.com, Russia, St. Petersburg.

*Osipov Vladimir P.*, cand. sci. tech., associate professor, Leading Researcher, Federal state budgetary institution of science «Institute of applied mathematics of the M.V. Keldysh» Russian academy of sciences, e-mail: osipov@keldysh.ru, Russia, Moscow.

*Sivakova Tatiana V.*, junior researcher, Federal state budgetary institution of science «Institute of applied mathematics of the M.V. Keldysh» Russian academy of sciences, e-mail: sivakova15@mail.ru, Russia, Moscow.

*Pavlov Sergei V.*, dr. sci. tech., professor, head chair of «Geographic information systems», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: psvgis@mail.ru, Russia, Ufa.

*Davletbakova Zulfiya L.*, post-graduate student chair of «Geographic information systems», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: davletbakova@mail.ru, Russia, Ufa.

*Abdullin Aydar Kh.*, cand. sci. tech., senior researcher, Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: psvgis@mail.ru, Russia, Ufa.

*Zhuravleva Nadezhda A.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Economic informatics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: zhuravlioiva80@mail.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 «Electronics and Nanotechnology», e-mail: dolomatov@gmail.com, Russia, Ufa.

*Martynov Vitaliy V.*, dr. sci. tech., professor head chair of «Economic informatics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: martynov@rb.ru, Russia, Ufa.

*Filosova Elena I.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Economic informatics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: filsova@ufamail.ru, Russia, Ufa.

*Shiryaev Oleg V.*, assistant chair of «Economic informatics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: oleg\_shiryaev@bk.ru, Russia, Ufa.

*Shvetsov Alexander I.*, assistant chair of «Economic informatics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: veter-dead@mail.ru, Russia, Ufa.

*Shulaeva Ekaterina A.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Automated processing and information systems», Sterlitamak branch Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: eshulaeva@mail.ru, Russia, Sterlitamak.

*Daminev Rustem R.*, dr. sci. tech., professor, director Sterlitamak branch Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: rrdaminev@rambler.ru, Russia, Sterlitamak.

*Islamutdinova Ajgul A.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «General chemical technology», Sterlitamak branch Federal state budgetary educational institution of Higher Professional Education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: rrdaminev@rambler.ru, Russia.

*Davidov Andrey I.*, post-graduate student chair of «Machinery, apparatus, equipment and service technologies», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state university of economics and service», e-mail: andrey87ufa@yandex.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, Russia, Ufa.

*Denisova Olga A.*, cand. sci. phys.-math., associate professor chair of «Physics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state university of economics and service», e-mail: denisovaolga@bk.ru, Russia, Ufa.

*Scaldin Oleg A.*, dr. tech. phys.-math., professor, Federal state budgetary institution of science «Institute of physics of molecules and crystals» Ufa scientific center Russian academy of sciences, e-mail: scala@anrb.ru, Russia, Ufa.

*Latypov Kamil F.*, post-graduate student chair of «Physics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state university of economics and service», e-mail: kamil-latipov@rambler.ru Russia, Ufa.

## СПИСОК СТАТЕЙ, ИЗДАНЫХ В 2013 ГОДУ

Абдрахимов Ю.Р., Федосов А.В., Алексеева И.Э. Проведение профессионального отбора персонала с помощью современных информационных систем, № 2, с. 47.

Абдрахманова Г.И., Багманов В.Х. Сверхширокополосная антенна на основе фрактальных структур, № 3, с. 52.

Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р. Математическая модель жерновой мельницы с двухсторонним линейным асинхронным двигателем в приводе, № 4, с. 27.

Артюшенко В.М., Кучеров Б.А. Повышение оперативности бесконфликтного управления группировкой космических аппаратов в условиях ресурсных ограничений, № 3, с. 59.

Артюшенко В.М., Самаров К.Л. Конструирование двухмерных коррелированных моделей аддитивных и мультипликативных негауссовских помех, № 4, с. 83.

Ахмеров Ш.Р. Автоматическая система подзарядки электрических беспилотных летательных аппаратов вертолетного типа, № 1, с. 5.

### Б

Бакалов О.В., Чередниченко П.И., Бакалов В.Г. Моделирование процессов получения полимерной пленки в плоскощелевой головке, № 3, с. 66.

Берг О.И., Ураксеев М.А., Баженов И.А. Расчет и исследование статической характеристики преобразователя перемещений с магнитными метками, № 4, с. 93.

Будников А.Н. Сравнительный анализ защищенности криптографических протоколов электронного голосования с массовым удаленным участием и DRE-систем, № 3, с. 73.

### В

Видов М.И. Использование перцепционной метрики и статистических моделей для оценки качества видеоизображений в условиях потери пакетов, № 1, с. 61.

Воловач В.И., Гурина Е.В., Акманцева И.С. Обнаружение и различение случайных сигналов на фоне гауссовского шума в радиотехнических устройствах обнаружения ближней дальности, № 1, с. 71.

Воловач В.И., Зайцев С.В., Мазуров А.В. Использование широкополосных сигналов для передачи разовых сообщений синхронизации по занятым телекоммуникационным каналам, № 1, с. 76.

Васильев А.Н., Осипов В.П., Сивакова Т.В. Сетевая компьютерная лаборатория (СКЛ) как распределенная научно-образовательная среда прикладного моделирования, № 4, с. 100.

Возмилов А.Г., Андреев Л.Н., Дмитриев А.А., Жеребцов Б.В. Разработка полной методики расчета эффективности очистки воздуха от пыли, микроорганизмов и вредных газов с помощью двухступенчатого мокрого электрофильтра, № 4, с. 60.

### Г

Гизатуллин Ф.А., Салихов Р.М., Чигвинцев В.А., Лобанов А.В. Комбинированный измеритель пробивных напряжений плазменных свечей зажигания газотурбинных двигателей, № 2, с. 5.

Грахов П.А., Федин А.В. Моделирование устройств угловых перемещений на основе магнитоотрицательных пластин с учетом упругих напряжений, № 1, с. 9.

### Д

Давыдов А.И., Мухамадиев А.А. Моделирование оптической системы акустооптического преобразователя, № 4, с. 135.

Давыдов А.И., Мухамадиев А.А., Ураксеев М.А. Построение волоконно-оптической распределенной информационно-измерительной системы с акустооптической коммутацией каналов, № 1, с. 80.

Денисова О.А. Один из методов экспериментальных исследований жидких кристаллов, № 2, с. 107.

Денисова О.А., Скалдин О.А. Пьезоэлектрический эффект в жидких кристаллах, № 4, с. 145.

Доломатов М.Ю., Латыпов К.Ф. Нарушение квантового принципа ортогональности в атомных системах, № 4, с. 153.

Доломатов М.Ю., Паймурзина Н.Х. Специфические квантовые эффекты электронной корреляции в органических полупроводниках, № 2, с. 114.

Доломатов М.Ю., Шуляковская Д.О., Паймурзина Н.Х., Шуткова С.А. Оценка электронной структуры углеродородных электропроводящих материалов методом ЭФС, № 2, с. 121.

Доломатов М.Ю., Шуткова С.А., Кавыев А.Г., Юсупов Э.А., Гордеев В.Н., Челноков Ю.В. Особенности электропроводности и свойств аморфных полупроводников на основе асфальтенов, № 3, с. 109.

## **Е**

Евстафьев А.И., Ураксеев М.А. Магнитооптический датчик электрического тока повышенной точности, № 1, с. 84.

Ефанов В.Н., Китабов А.Н. Синтез структуры системы диагностики технического состояния погружного электрооборудования на основе IDEF-технологии, № 4, с. 69.

## **Ж**

Журавлева Н.А., Долوماتов М.Ю. Информационная система оценки ресурсов молекул в межзвездной среде, № 3, с. 104.

Журавлева Н.А., Долوماتов М.Ю., Мартынов В.В., Филосова Е.И., Ширяев О.В., Швецов А.И. Информационная система оценки и прогнозирования уровня социальной напряженности, № 4, с. 121.

## **З**

Захарова Н.В., Татевосян А.С. Экспериментальное исследование и математическое моделирование поверхностного эффекта проводника с током в ферромагнитном пазу, № 4, с. 5.

Зикий А.Н., Зламан П.Н., Власенко Д.В. Фильтр на поверхностных акустических волнах, № 3, с. 5.

Зикий А.Н., Зламан П.Н., Власенко Д.В. Пятиоктавный синтезатор частот, № 4, с. 31.

## **И**

Ильясов И.Р., Мухамадиев А.А., Ураксеев М.А. Акустооптические измерительные преобразователи для информационно-измерительных систем анализа водной среды, № 2, с. 50.

Искужин Р.В., Нугаев И.Ф. Анализ и синтез алгоритмов управления нефтедобывающей скважины на базе электрического центробежного насоса, № 1, с. 18.

Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Влияние неравномерности воздушного зазора на ЭДС синхронного генератора переменного тока, № 4, с. 54.

Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Математическая модель переходных тепловых процессов в бесконтактной магнитоэлектрической машине, № 3, с. 8.

## **К**

Кабашов В.Ю. Исследование условий возможного схлестывания проводов сельских ВЛ 6–10 кВ, № 2, с. 9.

Киргизов Д.И., Иванов А.А., Шерстюков О.Н. Аппаратное и программное обеспечение беспроводной системы телеметрии для геолого-технологических исследований, № 2, с. 55.

Киргизов Д.И., Садыков А.Р. Информационная система для приема и регистрации информации, передаваемой по каротажным кабелям с приборов, контролирующих нефтяные скважины, № 2, с. 61.

Ковалева Э.А., Долوماتов М.Ю. Оценка энергии ионизации органических полупроводников на основе производных антрахинона, № 1, с. 101.

Козловский В.Н., Строганов В.И. Обеспечение качества и надежности электрооборудования автомобиля с комбинированной силовой установкой на этапах проектирования и производства, № 1, с. 21.

Колегаев Ю.Б. Использование отрезка длинной линии для определения положения границ раздела компонентов многофазных водонефтяных смесей, № 4, с. 76.

Корниенко И.В., Чередниченко П.И., Корниенко С.П. Оценка эффективности автоматизированной телекоммуникационной сети, № 1, с. 97.

Крымский В.Г., Жалбеков И.М., Имильбаев Р.Р., Юнусов А.Р. Автоматизация управления технологическими процессами в газораспределительных сетях: проблемы, тенденции и перспективы, № 2, с. 70.

Кузнецов И.В., Зотов К.Н. Повышение точности позиционирования мобильных станций на основе расчета статических параметров электромагнитного поля с использованием уравнений Максвелла, № 1, с. 89.

Кузьмин С.В. Средства сбора и обработки быстроменяющихся виброакустических параметров на борту ракетно-космической техники, № 1, с. 93.

Кушнир В.Г. Ветер как альтернативный вид энергии, № 1, с. 30.

Кушнир В.Г. Программа для моделирования притока воды в малобежитные водоисточники, № 2, с. 79.

Кушнир В.Г., Кошкин И.В. Эффективность использования энергии ветра в Костанайской области Северного региона Казахстана в целях генерирования электрической энергии, № 4, с. 49.

## **Л**

Латыпов К.Ф., Долوماتов М.Ю. Оценка сродства к электрону молекулярных кислородсодержащих органических полупроводников по интегральным характеристикам поглощения УФ и видимого излучения, № 1, с. 107.

## **М**

Мешков И.К., Зайнуллин А.Р., Грахова Е.П., Кутлюяров Р.В. Метод синтеза прогнозирующего фильтра на

основе многомерной линейной экстраполяции для повышения эффективности беспроводных телекоммуникационных систем, № 3, с. 76.

Мухамадиев А.А., Фаррахов Р.Г. Алгоритм работы акустооптического измерительного преобразователя температуры, № 2, с. 84.

Муфтиев С.Р. Особенности проектирования импульсного автотрансформатора системы стабилизации напряжения тяговых подстанций городского электротранспорта, № 4, с. 66.

## **Н**

Николаев П.А., Николаев А.Д., Горшков Б.М. Комплексная оценка соответствия требованиям ЭМС по уровню ЭМП модельных рядов автомобилей, оснащенных искровой батарейной системой зажигания, № 3, с. 14.

## **О**

Осипов В.П., Сивакова Т.В., Судаков В.А., Трахтенгерц Э.А., Загреев Б.В. Методологические основы поддержки принятия решений при планировании научно-прикладных исследований и экспериментов на международной космической станции (МКС), № 3, с. 80.

## **П**

Павлов С.В., Давлетбакова З.Л., Абдуллин А.Х. Информационная система поддержки принятия решений по управлению отходами на территории Республики Башкортостан на основе базы нечетких знаний, № 4, с. 113.

Павлов С.В., Ефремова О.А., Павлов А.С. Информационно-вычислительная система для обеспечения органов исполнительной власти региона пространственными данными, № 2, с. 88.

## **Р**

Рогинская Л.Э., Исмагилов Р.Р., Рахманова Ю.В. Согласование выходных параметров инвертора для индукционного нагрева с параметрами нагрузки с помощью ферромагнитного умножителя частоты, № 2, с. 12.

Рогинская Л.Э., Рахманова Ю.В., Шапиро С.В. Резонансный преобразователь частоты для питания разрядно-импульсных электротехнологических комплексов, № 4, с. 36.

Рогинская Л.Э., Ялалова З.И. Определение электромагнитной мощности фазопреобразующих трансформаторов преобразовательных установок, № 2, с. 18.

Розалиев В.Л., Орлова Ю.А., Шпирко А.А., Дорофеев Н.С. Автоматизация построения векторной модели тела человека, № 2, с. 102.

Рокка П., Чириков Р.Ю., Багманов В.Х. Калибровка параметров генетического алгоритма для задач проектирования фазированных антенных решеток, № 3, с. 89.

Романченко А.Ф., Мухамадиев А.А. Формирование информационных характеристик первичных преобразователей с фильтрацией помех за счет организации преобразования сигнала, № 3, с. 93.

## **С**

Стыскин А.В., Уразбахтина Н.Г. Принципы применения вентильных электродвигателей в установках погружных электроцентробежных насосов для нефтедобывающих скважин, № 3, с. 19.

Султанов А.Х., Черных В.В., Мешков И.К., Мешкова А.Г., Ишмияров А.А. Методика определения оптимального коэффициента скругления спектра в беспроводных цифровых системах связи для устранения межсимвольной интерференции, № 2, с. 96.

Сухинец Ж.А. Разработка алгоритмов исследования функциональных устройств с цепной структурой, № 1, с. 32.

## **Т**

Татевосян А.А. Синтез многоконтурной схемы замещения эластомеров, № 3, с. 24.

Тугашова Л.Г. Виртуальные анализаторы показателей качества процесса ректификации, № 3, с. 97.

## **У**

Ураксеев М.А., Левина Т.М. Оптоволоконные трансформаторы как элементы современных электротехнических комплексов и систем, № 2, с. 23.

## **Ф**

Феоктистов Н.А., Варламов И.В., Феоктистов А.Н. Система управления и автоматического регулирования режимов работы электролизно-водного генератора с применением микроЭВМ, № 3, с. 31.

Феоктистов Н.А., Феоктистов А.Н. Построение систем светодиодной индикации с аналоговым оптоэлектронным датчиком давления, № 4, с. 20.

## **Х**

Хайруллин И.Х., Гиниятуллин Д.М., Пашали Д.Ю. Исследование пространственного распределения магнитного поля в слоистой структуре для применения в теории дефектоскопии, № 2, с. 29.

Хакимьянов М.И., Шафиков И.Н. Анализ потребления электроэнергии при механизированной добыче нефти электроцентробежными насосами, № 3, с. 37.

### Ш

Шабанов В.А., Хахимов Э.Ф., Шарипова С.Ф. Алгоритм оценки эффективности частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов эксплуатируемых нефтепроводов по критерию снижения расхода электроэнергии, № 2, с. 34.

Шабанов В.А., Шарипова С.Ф. Критерии эффективности частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов на нефтеперекачивающих станциях, № 1, с. 38.

Шабанов В.А., Шарипова С.Ф. Требования к частоте вращения магистральных насосов при частотно-регулируемом электроприводе, № 3, с. 42.

Шабанов В.А., Шарипова С.Ф., Ахметгареев А.А. Влияние частоты вращения на КПД магистрального насоса, № 4, с. 13.

Шапиро С.В. Моделирование озонно-ультразвукового комплекса очистки оборотной воды, № 1, с. 44.

Шапиро С.В., Исмагилов Ф.Р., Терегулов Т.Р., Полихач Е.А., Кузнецов А.Ю. Каскадный бесконтактный четырехступенчатый генератор, № 3, с. 47.

Шапиро С.В., Муфтиев С.Р. Моделирование системы стабилизации напряжения тяговых подстанций городского электротранспорта в среде OrCAD 9.2, № 4, с. 140.

Шулаева Е.А., Даминов Р.Р., Исламудинова А.А. Особенности создания имитационно-моделирующих комплексов распространенных нефтехимических процессов на примере процесса синтеза винилацетата, № 4, с. 127.

Шуляковская Д.О., Долomatова М.М., Еремина С.А. Исследование электропроводящих наноструктур асфальтенов западно-сибирской нефти методом электронной феноменологической спектроскопии, № 1, с. 112.

### Я

Яруллин Р.Б. Асинхронный электропривод многорешетной виброзерноочистительной машины с регулируемыми параметрами, № 1, с. 52.

Яруллин Р.Б., Линенко А.В. К вопросу динамической характеристики асинхронного двигателя, № 2, с. 42.

## LIST OF ARTICLES PUBLISHED IN 2013

### A

Abdrahimov Yu.R., Fedosov A.V., Alekseeva I.E. Carrying out professional staff selection by means of modern information systems, № 2, p. 47.

Abdrakhmanova G.I., Bagmanov V.H. Ultra-wideband antenna on the basis of fractal structures, № 3, p. 52.

Aipov R.S., Nugumanov R.R. The mathematical model of millstone devices with linear induction motor in drive, № 4, p. 27.

Akhmerov S.R. Automatic system recharge of electric pilotless aircraft of helicopter type, № 1, p. 5.

Artuschenko V.M., Kucherov B.A. Increasing efficiency of conflict-free control for spacecraft constellation with resource restrictions, № 3, p. 59.

Artuschenko V.M., Samarov K.L. The construction of the correlated two-dimensional models for the additive and for the multiplicative non-gaussian interferences, № 4, p. 83.

### B

Bakalov O.V., Cherednichenko P.I., Bakalov V.G. Simulation process for producing polymer film in the flat-die, № 3, p. 66.

Berg O.I., Urakseev M.A., Bazhenov I.A. Teristics of displacement transducer with magnetic marks, № 4, p. 93.

Budnikov A.N. Comparative secure analysis of cryptographic electronic voting protocols with mass remote participation and DRE systems, № 3, p. 73.

### D

Davidov A.I., Mukhamadiev A.A., Urakseev M.A. Creation of the fiber optical distributed information measuring system with acousto-optic channel switching, № 1, p. 80.

Davidov A.I., Mukhamadiev A.A. Optical system modeling of acousto-optic switching transducer for Information-measuring and telecommunication systems, № 4, p. 135.

Denisova O.A. One of the methods of experimental research liquid crystals, № 2, p. 107.

Denisova O.A., Scaldin O.A. Piezoelectric effect in liquid crystals, № 4, p. 145.

Dolomatov M.Yu., Latypov K.F. Violation of orthogonal quantum principles in atomic systems, № 4, p. 153.

Dolomatov M.Yu., Paymurzina N.Kh. Specific quantum effects of electronic correlation in organic semiconductors, № 2, p. 114.

Dolomatov M.Yu., Shulyakovskaya D.O., Paymurzina N.Kh., Shutkova S.A. Electron structure estimation of the hydrocarbon electroconductive materials according to EPS method, № 2, p. 121.

Dolomatov M.Yu., Shutkova S.A., Kaviev A.G., Yusupov E.A., Gordeev V.N., Chelnokov Yu.V. Features of conductivity and properties of amorphous semiconductors on the base of asfaltenes, № 3, p. 109.

#### **E**

Efanov V.N., Kitabov A.N. Synthesis of the structure of finding the technical state electric immersion IDEF-based technology, № 4, p. 69.

Evstafev A.I., Urakseev M.A. Magneto-optical sensor of electric current with improved accuracy, № 1, p. 84.

#### **F**

Feoktistov N.A., Feoktistov A.N. Design and construction of the led display with analog optoelectronic sensor pressure, № 4, p. 20.

Feoktistov N.A., Varlamov I.V., Feoktistov A.N. The control system and automatic control modes of electrolytic water generator using a micro-computer, № 3, p. 31.

#### **G**

Gizatullin F.A., Salikhov R.M., Chigvintsev V.A., Lobanov A.V. Combined measuring breakdown voltage plasma plug gas turbine engines, № 2, p. 5.

Grakhov P.A., Fedin A.V. Angular movements devices modelling on the basis of magnetostriction plates taking into account elastic tensions, № 1, p. 9.

#### **H**

Hakimyanov M.I., Shafikov I.N. Analysis of energy consumption of artificial lift using electric submersible pumps, № 3, p. 37.

#### **I**

Ilyasov I.R., Mukhamadiev A.A., Urakseev M.A. Acousto-optic measuring converters for information-measuring systems of the analysis of the water environment, № 2, p. 50.

Iskuzhin R.V., Nugaev I.F. Analysis and synthesis of algorithms of management of the oil-extracting well on the basis of the electric centrifugal pump, № 1, p. 18.

Ismagilov F.R., Khayrullin I.Kh., Vavilov V.E. Effect of non-uniform air on EMF synchronous ac generator, № 4, p. 54.

Ismagilov F.R., Khayrullin I.Kh., Vavilov V.E. Model of transient thermal processes in non-contact magnetoelectric machine, № 3, p. 8.

#### **K**

Kabashov V.Yu. Research of conditions of possible electric cross wires of village air-lines 6–10 kV, № 2, p. 9.

Khairullin I.Kh., Giniyatullin D.M., Pashali D.Yu. Investigation of the magnetic field spatial distribution in layered structures for the defectoscopy theory, № 2, p. 29.

Kirgizov D.I., Ivanov A.A., Sherstyukov O.N. Hardware and software for wireless mud logging telemetry system, № 2, p. 55.

Kirgizov D.I., Sadikov A.R. Informational system for data recording that is transmitted from the borehole tools through the logging cable, monitoring the oil wells, № 2, p. 61.

Kolegaev Yu.B. The use of a segment of a long line to determine the position of the interfaces of the components of multiphase oil-water mixtures, № 4, p. 76.

Korniyenko I.V., Cherednichenko P.I., Korniyenko S.P. Assessment of efficiency of the automated telecommunication network, № 1, p. 97.

Kovaleva E.A., Dolomatov M.Yu. Evaluation of the ionization energy of organic semiconductors based on anthraquinone derivatives, № 1, p. 101.

Kozlovskiy V.N., Stroganov V.I. Ensuring the quality and reliability of electric car with a combined power plant during the design and production, № 1, p. 21.

Krymsky V.G., Zhalbekov I.M., Imilbaev R.R., Yunusov A.R. Automation of technological process control in gas distribution networks: challenges, trends and perspectives, № 2, p. 70.

Kushnir V.G. Program for modeling the flow of water to the sources with low-level of flow rate, № 2, p. 79.

Kushnir V.G. Wind as an alternative kind of energy, № 1, p. 30.

Kushnir V.G., Koshkin I.V. The efficiency of wind energy in the Kostanai region of north Kazakhstan region for the

generation of electrical energy, № 4, p. 49.

Kuzmin S.V. Means of collecting and processing of the fast-changing vibroacoustic characteristic onboard missile and space equipment, № 1, p. 93.

Kuznetsov I.V., Zotov K.N. Improving accuracy of positioning mobile station based on the calculation of static parameters electromagnetic field with Maxwell equations, № 1, p. 89.

#### **L**

Latipov K.F., Dolomatov M.Yu. Estimation of electron affinity of oxygen-containing molecular semiconductors on integral absorption characteristics in uv and visible radiation, № 1, p. 107.

#### **M**

Meshkov I.K., Zainullin A.R., Grahova E.P., Kutluyarov R.V. Method of the synthesis prediction filter based on the multidimensional linear extrapolation to improve the efficiency of wireless telecommunication systems, № 3, p. 76.

Muftiev S.R. Design features of the pulse transformer voltage stabilization of city electric transport traction substations, № 4, p. 66.

Mukhamadiev A.A., Farrakhov R.G. Algorithm of operation of the acousto-optic measuring converter of temperature, № 2, p. 84.

#### **N**

Nikolaev P.A., Nikolaev A.D., Gorskov B.M. Comprehensive assessment of the compliance level of EMC EMH model series vehicles equipped with spark battery ignition system, № 3, p. 14.

#### **O**

Osipov V.P., Sivakova T.V., Sudakov V.A., Trahtengerts E.A., Zagreev B.V. Methodological base of support decision-making in the planning of scientific and applied research and experiments on the international space station (ISS), № 3, p. 81.

#### **P**

Pavlov S.V., Davletbakova Z.L., Abdullin A.Kh. Information system of decision-making support on waste management within the territory of the Republic of Bashkortostan, № 4, p. 113.

Pavlov S.V., Efremova O.A., Pavlov A.S. Information-computer system for providing regional executive agencies with spatial data, № 2, p. 88.

#### **R**

Rocca P., Chirikov R.Yu., Bagmanov V.H. Calibration of the genetic algorithm parameters for phased antenna array design, № 3, p. 89.

Roginskaya L.E., Ismagilov R.R., Rakhmanova Yu.V. Coordination of output parameters of the inverter for induction heating with loading parameters by means of the ferromagnetic frequency multiplier, № 2, p. 12.

Roginskaya L.E., Rakhmanova Yu.V., Shapiro S.V. The resonant converter of frequency for discharging pulse electrotechnological complexes, № 4, p. 36.

Roginskaya L.E., Yalalova Z.I. The definition of electromagnetic power of the phase-reformative transformers of the transforming plants, № 2, p. 18.

Romanchenko A.F., Mukhamadiev A.A. Formation of information characteristics of primary converters with a filtration of hindrances at the expense of the organization of transformation of a signal, № 3, p. 93.

Rozaliev V.L., Orlova Y.A., Shpirko A.A., Dorofeev N.S. Automation of constructing human's body vector model, № 2, p. 102.

#### **S**

Shabanov V.A., Khakimov E.F., Sharipova S.F. Efficiency evaluation algorithm of frequency-controlled electric drive main pumps of oil pipelines operated by the criterion reducing of energy consumption, № 2, p. 34.

Shabanov V.A., Sharipova S.F. Criteria of efficiency of frequency-controlled electric drives of main pump for pumping stations, № 1, p. 38.

Shabanov V.A., Sharipova S.F. Requirements to the speed of the pumps with frequency-adjustable electric drive, № 3, p. 42.

Shabanov V.A., Sharipova S.F., Ahmetgareev A.A. Effect of speed on the efficiency of the main pump, № 4, p. 13.

Shapiro S.V. Modeling of an ozonic and ultrasonic complex of purification of reverse water, № 1, p. 44.

Shapiro S.V., Ismagilov F.R., Teregulov T.R., Polihach E.A., Kuznetsov A.Yu. Cascade uncontacted four-step generator, № 3, p. 47.

Shapiro S.V., Muftiev S.R. Modeling of the system of stabilization of voltage of traction substations of city electric transport in the system OrCAD 9.2, № 4, p. 140.



Shulaeva E.A., Daminev R.R., Islamutdinova A.A. Features of imitational modeling complex prevalent petrochemical processes on the example of vinyl acetate synthesis, № 4, p. 127.

Shulyakovskaya D.O., Dolomatova M.M., Eremina S.A. Investigation of electroconductive nanostructures of west-siberian oil asphaltenes by electron phenomenological spectroscopy method, № 1, p. 112.

Styskin A.V., Urazbakhtina N.G. The principles of use of synchronous motor with permanent magnets in installations of submersible electrocentrifugal pumps for oil production wells, № 3, p. 19.

Sukhinets Zh.A. Development of research algorithms of the functional devices with chain-structure, № 1, p. 32.

Sultanov A.Kh., Chernykh V.V., Meshkov I.K., Meshkova A.G., Ishmiyarov A.A. The optimal spectrum rounding index determination methods for wireless digital communication systems to eliminate the intersymbol interference, № 2, p. 96.

#### **T**

Tatevosyan A.A. Synthesis of multiple circuit replacement scheme of elastomers, № 3, p. 24.

Tugashova L.G. Virtual analyzers indicators of the quality of the rectification process, № 3, p. 97.

#### **U**

Urakseev M.A., Levina T.M. Fiber optic components transformers as modern electrical and complex systems, № 2, p. 23.

#### **V**

Vasilyev A.N., Osipov V.P., Sivakova T.V. Network computer lab (NCL) as the distributed scientifically-educational environment of the applied information modeling, № 4, p. 100.

Vidov M.I. Usage of perceptual metrics and statistical models for quality assessment of video in terms of packet loss, № 1, p. 61.

Volovach V.I., Gurina E.V., Akmantseva I.S. Detection and distinction of casual signals against gaussian noise in radio engineering devices of detection of near range, № 1, p. 71.

Volovach V.I., Zaitsev S.V., Mazurov A.V. Use the broadband of signals for transfer of single messages of synchronization on busy telecommunication channels, № 1, p. 76.

Vozmilov A.G., Andreev L.N., Dmitriev A.A., Zherebcov B.V. Working full methods of calculating efficiency of air filtrations against dust, microorganisms and harmful gases with the two-stage wet electrostatic filter, № 4, p. 60.

#### **Y**

Yarullin R.B. Asynchronous electric drive multitrellised the vibration machine for purification of grains with adjustable parameters, № 1, p. 52.

Yarullin R.B., Linenko A.V. To the question of the asynchronous motors dynamic characteristic, № 2, p. 42.

#### **Z**

Zacharova N.V., Tatevosyan A.S. Experimental investigation and mathematical modeling of surface effect in current conductor, located in ferromagnetic groove, № 4, p. 5.

Zhuravleva N.A., Dolomatov M.Yu. Information system of an molecules resources in the interstellar environment assessment, № 3, p. 104.

Zhuravleva N.A., Dolomatov M.Yu., Martynov V.V., Filosova E.I., O.B. Shiryayev O.V., Shvetsov A.I. Information system of an assessment and forecasting of social tension level, № 4, p. 121.

Zikiy A.N., Zlaman N., Vlasenko D.V. Five-octaves frequency synthesizer, № 4, p. 31.

Zikiy A.N., Zlaman P.N., Vlasenko D.V. Surface acoustic wave filter, № 3, p. 5.

## **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 (140-240 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, MicrosoftGraph, без использования сканирования; для диаграмм применять различную штриховку, размер шрифта 10 или 11 pt, математические формулы оформляются через редактор формул MicrosoftEquation, 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.**