

ISSN 1999-5458

**Электротехнические  
и информационные  
комплексы и системы**

**№ 4, т. 10, 2014**



**Electrical and data  
processing facilities  
and systems**

**№ 4, v. 10, 2014**



Подписной индекс:  
91824 в каталоге «Пресса России»

***Доломатов Михаил Юрьевич  
К 60-летию со дня рождения***



Доломатов М.Ю. известный физикохимик и физик, доктор химических наук, кандидат технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Республики Башкортостан.

Доломатовым М.Ю. разработана физико-химическая теория многокомпонентных систем с хаосом химического состава и новое научное направление электронная феноменологическая спектроскопия. Кроме того, им разработаны математические модели сложных природных и технических систем с использованием принципов статистической термодинамики, в частности, математическая модель распределения органического вещества в межзвездной среде, на основе которой предсказано существование биологических и сложных органических молекул в космосе. В течение последних лет Доломатов М.Ю. совместно со специалистами в области медицины и нефтехимии разрабатывает новые спектроскопические методы диагностики и контроля состояния человеческого здоровья и методы контроля свойств сложных веществ.

В последние годы Михаил Юрьевич успешно работает над проблемой создания новых полупроводниковых материалов для молекулярной электроники на природной основе.

Михаил Юрьевич является автором свыше 800 научных работ, многие из которых опубликованы в ведущих научных журналах и известны в России и за рубежом. Он автор 15 монографий и свыше 50 патентов на изобретения. Он руководил 13 успешно защищенными кандидатскими диссертациями. Многие его изобретения внедрены в производство. За выдающиеся научные достижения Доломатову М.Ю. было присвоено звание «Человек года – 2011» по версии Американского биографического института (American Biographical Institute США) и звание «Человек года – 2012» по версии Международного биографического центра (International Biographical Centre) Cambridge, Великобритания. В 2009 году Михаилу Юрьевичу присуждена премия конгресса по нанотехнологиям Nanotech Europe в г. Берлине. Кроме того он удостоен звания Изобретателя СССР (1991), Заслуженного деятеля науки РБ (2014), Почетной грамоты Республики Башкортостан (1996), Почетных грамот Городского совета г. Уфы (2001, 2009), Почетной грамоты профсоюзов оборонной промышленности (2009), Медали КПРФ к 300-летию со дня рождения М.В. Ломоносова (2012). В настоящее время Доломатов М.Ю. заведует научно-исследовательской лабораторией «Физика электронных процессов и наноматериалов» (УГУЭС), является профессором кафедр: физики (УГУЭС), физической электроники и нанофизики (БашГУ). Кроме того, он профессор кафедры технологии нефти и газа (УГНТУ) и экономической информатики (УГАТУ). Михаил Юрьевич ведет большую общественную работу, является членом диссертационного совета «Химия и технология топлива и высокоэнергетических веществ» при УГНТУ, руководителем межвузовского регионального семинара «Актуальные проблемы исследования сложных систем», сопредседателем регионального отделения «Лиги защиты культуры», членом Американского химического общества, членом БО Научного Совета РАН по методологии искусственного интеллекта, членом редколлегии журнала «Электротехнические и информационные комплексы и системы».

*Руководство Уфимского государственного университета экономики и сервиса, сотрудники кафедры физики и редакционная коллегия журнала поздравляют Михаила Юрьевича с Юбилеем! Счастья, долголетия и новых научных достижений!*

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭКОНОМИКИ И СЕРВИСА

УГУЭС

№ 4, т. 10, 2014

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

## Учредитель

Министерство образования и науки РФ

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

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

## Редакционная коллегия:

Главный редактор:

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

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



Зам. главного редактора:

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

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



## Члены редакционной коллегии:

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

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



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

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



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

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



В.Г. Крымский – д-р техн. наук, проф.

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



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

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



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

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



Р.Р. Сафин – д-р техн. наук, проф.

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



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



(Белоруссия, г. Минск)

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

«Уфимский государственный

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



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

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



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

дизайна и технологии» (Россия, г. Москва)



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

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



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

Черниговского государственного технологического университета (Украина, г. Чернигов)



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

«Уфимский государственный нефтяной

технический университет» (Россия, г. Уфа)



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

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



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

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



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

Технического университета (Болгария, г. Варна)



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

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

(Украина, г. Киев)



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



Ответственный секретарь: А.А. Мухамадиев

Технический редактор: С.С. Некрасова

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

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

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

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

© Уфимский государственный университет экономики и сервиса, 2014

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

Тел.: +7 (347) 228-91-38.

Подписано в печать 19.12.2014 г. Формат 60×80 1/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 8,125. Тираж 1000 экз. Заказ № 95.

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. 10, 2014

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

## Founder:

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

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

## Editorial board:

Editor-in-chief:

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



Deputy editor-in-chief:

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



## Members of an editorial board:

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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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

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

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

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

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

© Ufa State University of Economics and Service, 2014

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

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

Signed for printing 19.12.2014. Format 60×80 1/8. Offset printing. 8,125 printed pages. Circulation is 1000 copies. Order №. 95.

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>Феоктистов Н.А., Зайцев А.Г., Бабинцева К.А.</i> Разработка систем стабилизации параметров электрической энергии от ветроэлектрического генератора бытового назначения.....	5
<i>Титов Д.Е., Щуров А.Н.</i> Анализ статистических данных о результатах работы систем мониторинга гололедообразования .....	12
<i>Яковлев С.М., Каримов И.И.</i> Энергосберегающая светодиодная система облучения растений.....	18
<i>Марченко А.А.</i> Испытание асинхронного двигателя под номинальным током в режиме противовключения и понижения частоты напряжения.....	25
<i>Татевосян А.А., Осинина Е.В.</i> Исследование динамических характеристик линейного магнитоэлектрического привода для испытания вязкоупругих свойств эластомеров.....	32
<i>Возмилов А.Г., Фаин В.Б., Андреев Л.Н., Дмитриев А.А., Юркин В.В.</i> Анализ систем очистки воздуха в животноводческих и птицеводческих комплексах .....	45
<i>Кабашов В.Ю.</i> Влияние параметров полета на аварийные отключения сельских ВЛ 6-10 кВ при воздействии ветра .....	52

## Информационные комплексы и системы

<i>Новичкова А.В., Бобренева Ю.О., Губайдуллин И.М., Коледина К.Ф.</i> Информационный комплекс построения кинетической модели реакции гидроалюминированияолефеновтриизобутилалюминием .....	58
<i>Артюшенко В.М., Кучеров Б.А.</i> Алгоритмы адаптации линий спутниковой связи по мощности передающих устройств земных станций при работе в составе узловой сети .....	64
<i>Ефанов В.Н., Китабов А.Н., Нугаев Р.Р.</i> Проектирование базы данных результатов диагностики погружного оборудования на основе информационной модели по стандарту IDEF1X.....	73
<i>Гордеев Э.Н.</i> Об устойчивости моделирования некоторых процессов.....	83
<i>Сухинец Ж.А., Сухинец А.В.</i> Функциональный преобразователь частота-код для частотных датчиков .....	88

## Метрология и информационно-измерительные устройства

<i>Доломатов М.Ю.</i> Методологические проблемы моделирования и интерпретации данных физических исследований на примерах некорректных задач спектроскопии .....	94
<i>Ураксеев М.А., Закурдаева Т.А.</i> Современные волоконно–оптические датчики напряжения и напряженности электрического поля на электрооптическом эффекте 95% .....	101
<i>Федосов А.В., Серегородцева С. Ю., Францов Р.А.</i> Устройство для исследования условий труда при проведении специальной оценки условий труда на предприятиях.....	107
<i>Мухамадиев А.А.</i> Классификация акустооптических измерительных преобразователей для систем экологического и техносферного мониторинга .....	113
<b>Об авторах</b> .....	118
<b>Список статей, изданных в 2014 году</b> .....	123

# CONTENT

## Electrical facilities and systems

<i>Feoktistov N.A., Zaitsev A.G., Babintseva K.A.</i> Development of systems of stabilizing of parameters of electrical energy from the vetroelektrichesky generator of the household purpose.....	5
<i>Titov D.E., Shchurov A.N.</i> Analysis of statistical data on results of work of systems of glaze ice monitoring .....	12
<i>Yakovlev S.M., Karimov I.I.</i> Energy-saving lighting system for plants .....	18
<i>Marchenko A.A.</i> Test of the asynchronous engine under rated current in the antiinclusion and fall of frequency of tension mode .....	25
<i>Tatevosyan A.A., Osinina E.V.</i> Study dynamic characteristics linear magnetolectric drive for research viscoelastic properties elastomers .....	32
<i>Vozmilov A.G., Fain V.B., Andreev L.N., Dmitriev A.A., Yurkin V.V.</i> Analysis of air purification systems in livestock and poultry farms .....	45
<i>Kabashov V.Yu.</i> Influence of parameter of span on the emergency shut-off rural overhead lines 6-10 kv at impact of wind .....	52

## Data processing facilities and systems

<i>Novichkova A.V., Bobreneva Y.O., Gubaidullin I.M., Koledina K.F.</i> Information system of kinetic modeling olefin hydroalumination reactions with triisobutylaluminum .....	58
<i>Artuschenko V.M., Kucherov B.A.</i> Adaptation algorithms of satellite communication links by transmitter power on ground stations when working as part of a meshed network .....	64
<i>Efanov V.N., Kitabov A.N., Nugaev R.R.</i> Database design of diagnostic results of submersible equipment based on the information model by IDEF1X.....	73
<i>Gordeev E.N.</i> On the stability of the simulation of some processes.....	83
<i>Sukhinets Zh.A., Sukhinets A.V.</i> Functional conversion frequency- code for frequency sensors .....	88

## Metrology and information-measuring devices

<i>Dolomatov M.Yu.</i> Methodological problem of simulation and interpretation data physical researches on examples ill – posed problem of spektroskopy .....	94
<i>Urakseev M.A., Zakyraeva T.A.</i> Advanced fiber-optic voltage sensor and electric field at the electro-optical effect. ....	101
<i>Fedosov A.V., Seregorodceva S.Yu., Francov R.A.</i> The device for research of working conditions when carrying out the special assessment of working conditions at the enterprises .....	107
<i>Mukhamadiev A.A.</i> Classification of acousto-optical transducers for systems of environmental monitoring and technospheric .....	113

<b>About the authors</b> .....	120
--------------------------------	-----

<b>List of articles published in 2014</b> .....	126
---	-----

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS



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

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



**Зайцев А.Г.**  
**Zaitsev A.G.**

*аспирант ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет дизайна и технологии», Россия, г. Москва*



**Бабинцева К.А.**  
**Babintseva K.A.**

*магистрант ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет дизайна и технологии», Россия, г. Москва*

УДК 621.318

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА БЫТОВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В статье предлагаются варианты систем стабилизации напряжения и частоты при работе от ветроэлектрических генераторов малой и средней мощности бытового назначения. Приведены блок-схемы систем стабилизации для разных мощностей, на основе которых разработаны электрические схемы систем:

- системы стабилизации напряжения тиристорным выпрямителем, а частоты – инвертором тока с задающим генератором;

- системы стабилизации частоты инвертором напряжения, а напряжения – транзисторным стабилизатором, включенным на выходе инверторов напряжения.

Установку с ВЭС с выпрямительным мостом целесообразно применять в тепличном хозяйстве в условиях Сибири и Севера, для отопления помещений, удаления влаги из грунта путем создания испарительных устройств из пористых материалов и нагревательных элементов. Систему стабилизации выходного напряжения следует применять для питания бытовой техники и других потребителей переменного тока, в частности, радиоэлектронной аппаратуры. Однако применение системы стабилизации для питания бытовой радиоэлектронной аппаратуры требует фильтрации высших гармоник переменных напряжений.

*Ключевые слова:* система стабилизации напряжения, система стабилизации частоты, тиристорный выпрямитель, инвертор, ветроэлектрический генератор.

## DEVELOPMENT OF SYSTEMS OF STABILIZING OF PARAMETERS OF ELECTRICAL ENERGY FROM THE VETROELEKTRICHESKY GENERATOR OF THE HOUSEHOLD PURPOSE

In article options of systems of voltage stabilization and frequency are offered by operation from the Electrical and data processing facilities and systems. № 4, v. 10, 2014

vetroelektricheskikh of generators of low and average power of a household purpose. Flowcharts of systems of stabilizing for different capacities on the basis of which electric circuits of systems are developed are provided:

- systems of voltage stabilization by the thyristor rectifier, and frequencies the current inverter with the master oscillator;
- systems of frequency fixing by tension inverter, and tension – the transistor stabilizer which has been switched on on an output of inverters of tension.

Installation with windfarm with rectifier bridge is advisable to apply in greenhouses in Siberia and the North, central heating, removing moisture from the soil, through the creation of evaporation from porous materials and heating elements. Stabilization system output voltage to be applied to power household appliances and other consumer alternating current, in particular, electronic devices. However, the use of the stabilization system to power home electronics require harmonic filtering AC voltages.

*Key words:* system of voltage stabilization, system of frequency fixing, thyristor rectifier, inverter, wind power generator.

Одним из перспективных направлений по созданию нетрадиционных источников электроэнергии является ветроэнергетика [1, 2, 3]. Целесообразность создания и применения экологически чистых источников энергии, таких как ветроэнергетические станции (ВЭС), является важной практической задачей [1, 2], особенно для небольших населенных пунктов Севера, Сибири, фермерских и дачных хозяйств нечерноземной зоны.

Генератор ВЭС может быть бесконтактный синхронный, асинхронный либо магнитоэлектрический с торцевым зазором [4, 5]. Наиболее эффективным вариантом для малых мощностей является последний вариант. Повышение эффективности использования активных материалов магнитной си-

стемы достигается тем, что ротор и статор имеют общий вал, причем ротор состоит из двух стальных колец с закрепленными на них постоянными магнитами, между которыми помещен статор с обмотками, охватывающими его магнитопровод, а ветроколесо прикреплено к торцу ротора. Магнитная система симметрична, и поэтому осевые силы на подшипник практически отсутствуют. Конструкция генератора с равномерным воздушным зазором между магнитопроводом статора и магнитами позволяет обеспечить вращение ротора даже при слабом ветре. Для генератора мощностью 1кВа ВЭС-1 результаты испытаний при работе на выпрямленный мост с различной нагрузкой приведены в таблице.

### Результаты испытаний при работе на выпрямленный мост

n	об/мин	100			200			315			400		
U	В	13,5			28			44			50		
I <sub>d</sub>	А	12	16	25	24	31	50	34	50	70	40	65	100
R	Ом	0,58	0,29	0,15	0,58	0,29	0,15	0,58	0,29	0,15	0,58	0,29	0,15
U <sub>d</sub>	В	7	5	3,8	16	12	8	25	18	10	30	22	12
P	Вт	84	80	95	384	372	400	850	900	700	1200	1430	1200

где U, I – действующие значения напряжения и тока фазы; R – сопротивление нагрузки; U<sub>d</sub>, I<sub>d</sub> – среднее значение напряжения и тока на выходе выпрямителя.

Практическое применение таких генераторов ограничено примерами использования в качестве получения тепла, освещения, зарядки аккумуляторов, перекачки воды. Для питания бытовых машин и аппаратов, бытовой радиоэлектронной аппаратуры, вычислительной и компьютерной техники и других потребителей требуется обеспечение стабилизации параметров электрической энергии, в первую очередь напряжения и частоты [4, 6].

Известны несколько вариантов систем стабили-

зации напряжения и частоты при работе от ВЭС [4, 7]. При этом необходимо отметить, что в зависимости от мощности нагрузки системы могут отличаться принципами (способами) и элементной базой.

Рассмотрим два варианта систем стабилизации напряжения и частоты при работе от автономного нетрадиционного источника энергии с переменными параметрами электрической энергии на примере ВЭС.

Для ВЭС средней мощности наиболее целесообразно применение системы (рис. 1а), обеспечивающей стабилизацию напряжения с помощью управляемого выпрямителя (УВ) с обратной связью частоты с помощью инвертора (И) с задающим гене-

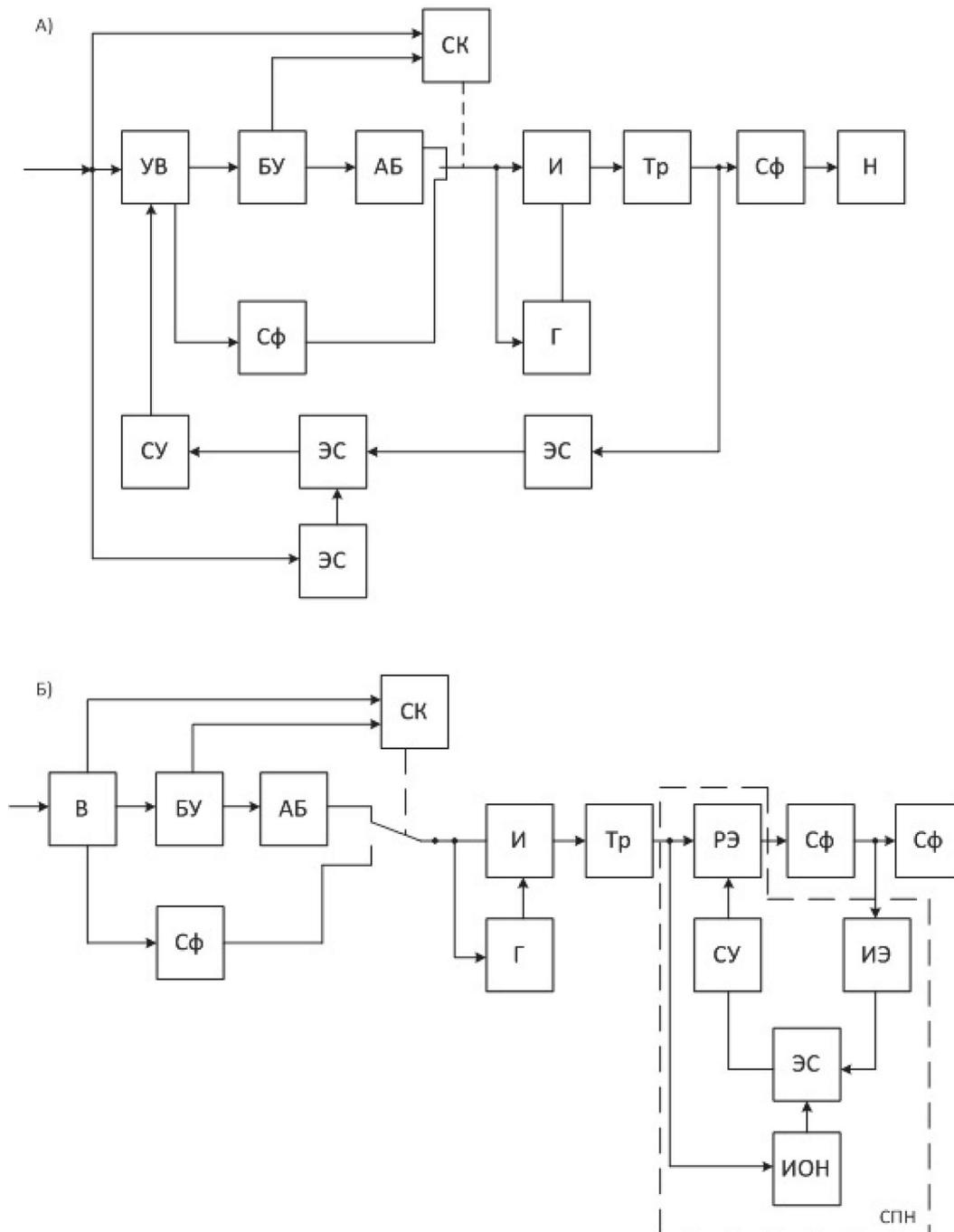


Рис. 1. Функциональные схемы систем стабилизации напряжения и частоты при питании РЭА от ветроэлектрических станций бытового назначения

ратором (Г). В цепи обратной связи осуществляется сравнение выходного напряжения системы, снимаемого с измерительного элемента (ИЭ), и эталонного напряжения источника опорного напряжения (ИОН). Сигнал рассогласования с выхода элемента сравнения (ЭС) подается на систему управления (СУ) выпрямителя, который воздействует на регулирующие элементы – тиристоры и обеспечивает стабилизацию выходного напряжения.

Устройство коммуникации (УК) определяет режим работы системы: при минимальной скоро-

сти ветра источником энергии является аккумуляторная батарея (АБ).

При большой скорости ветра или отключении блоком управления (БУ) перезаряженной батареи АБ инвертор (И) подключается к выпрямителю УВ. На выходе инвертора, как правило, включается фильтр (Ф) для получения более синусоидального напряжения.

Для ВЭС малой мощности (менее 2кВт) наиболее целесообразно применение системы, осуществляющей стабилизацию напряжения электронным

или феррорезонансным стабилизатором переменного напряжения (СПН) с обратной связью на тех же элементах, что и в предыдущем варианте (рис. 1б). В этом варианте можно использовать неуправляемый выпрямитель (В) управления в соответствии с приведенными блок-схемами. В схеме для ВЭС средней мощности (рис. 2) для стабилизации выходного напряжения применен выпрямительный мост по несимметричной схеме с катодной груп-

пой управляемых вентилей-тиристоров  $V_{S1} - V_{S3}$  и упрощенной системой управления ими. Аккумулятор АБ служит для обеспечения бесперебойной работы и сглаживания пульсаций. Чувствительным элементом с целью стабилизации напряжения является измерительный мост (R5–R9, VD8–VD10), в диагональ которого включен усилительный элемент VT3, VT4.

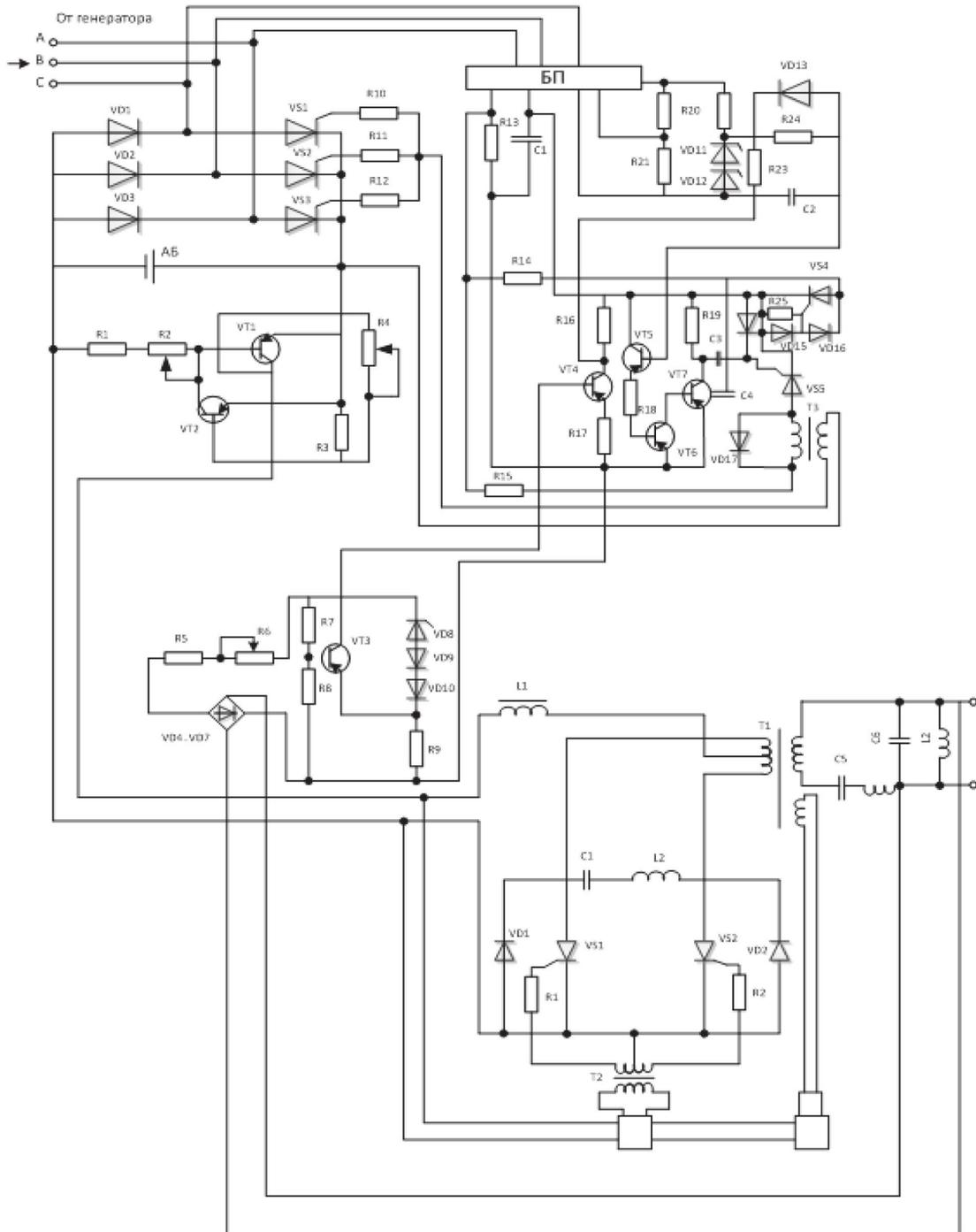


Рис. 2. Электрическая схема стабилизации ВЭС средней мощности.

Генератор пилообразного напряжения формируется элементами VD11, VD12, VD13, C2, блоком питания, R20–R24

На резисторе R24 происходит формирование трапециoidalного напряжения, заряжая им конденсатор C2 через R23 и разряжая его через диод VD13. Пилообразное напряжение на C2 сравнивается с выходным напряжением транзистора VT4. Разность этих напряжений усиливается двухкаскадным усилителем на транзисторных элементах VT6, VT7. Выходной каскад собран на элементах VS4, VS5, VD14, VD15, VD16, VD17, C3, трансформаторе T3. При открытии VT17 на R19 формируется импульс с крутым фронтом. Процесс перезаряда C3 определяет момент открытия и закрытия VS4.

В качестве инвертора может быть использован инвертор тока, управляемый задающим генератором (ЗГ) и стабилизатором заданной частоты (СЗЧ).

Для получения синусоидального напряжения необходимой величины можно использовать сило-

вой трансформатор T1 и фильтр C5, L1, C6, L2.

Для отключения АБ при перезарядке и большой скорости ветра, а также включения разряженной батареи к выпрямителю служит устройство коммутации (рис. 3).

При малой скорости ветра и низком значении выпрямленного напряжения питание инвертора осуществляется от АБ через коммутирующий диод VD8. В это время диод VD7 закрыт приложенным обратным напряжением. Выпрямительный блок с ВЭС отключен от системы. При наличии ветра и достижении выпрямленного напряжения определенной величины открывается VD7 и закрывается VD8 обратным напряжением. Питание системы осуществляется от ВЭС. Если напряжение АБ меньше допустимого (разряжена), стабилитрон VD10, тиристор VS2 закрывается, что приведет к открытию тиристора VS1. Аккумуляторная батарея АБ подключается к системе и начинает заряжаться от выпрямителя.

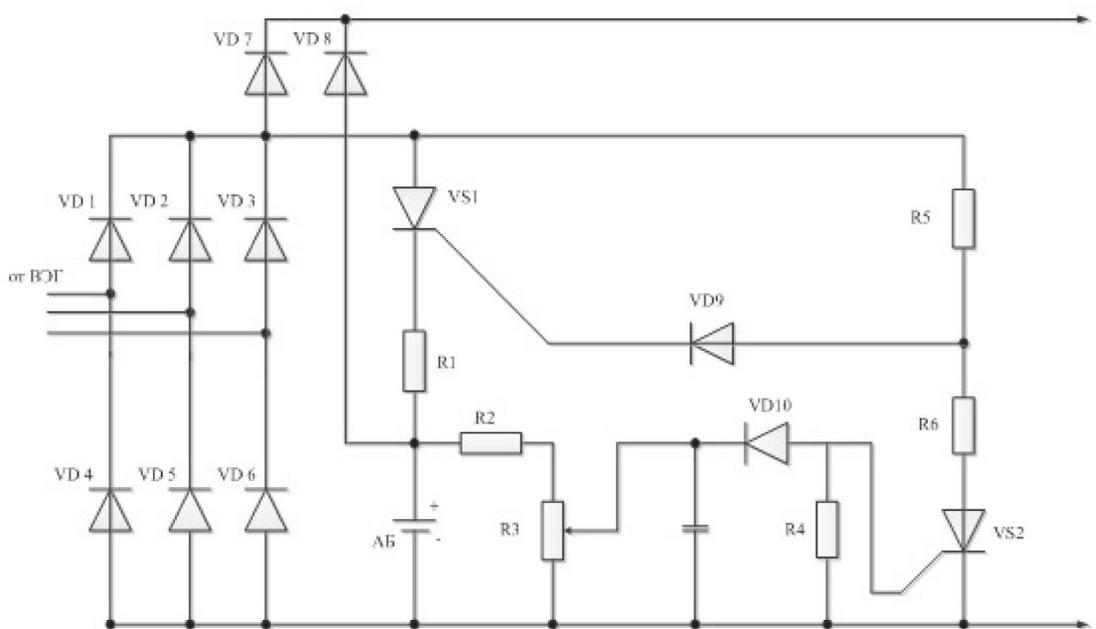


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема блока управления и выпрямителя

Когда АБ зарядится полностью, напряжение на R3 достигнет порогового значения стабилитрона VD10. Тиристор VS2 открывается, вызвав закрытие VS1. Заряд АБ прекращается. Резистор R1 ограничивает значение зарядного тока.

Для ВЭС малой мощности можно применить неуправляемый выпрямитель, инвертор на силовых транзисторах с генератором задающих импульсов, трансформатор и стабилизатор переменного напря-

жения на силовых транзисторах.

Электрическая схема системы стабилизации (рис. 4) содержит трехфазный выпрямительный мост VD1 – VD6, коммутатор питания, аккумулятор АБ, инвертор VT1 – VT2 с задающим генератором DD1, трансформатор T1, фильтр L1, C3, L2, C4 и транзистор VT4, включенный в диагональ моста VD12 – VD15, с системой управления для обеспечения стабилизации напряжения. Уровень



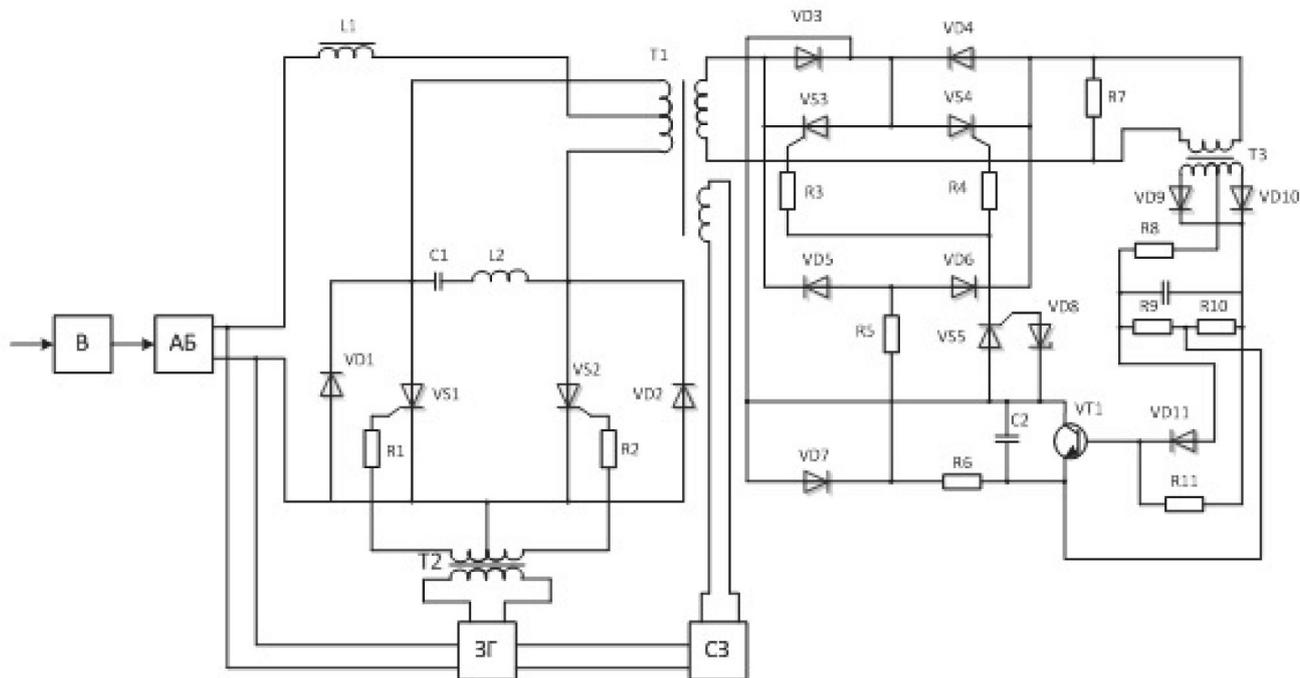


Рис. 5. Схема стабилизатора напряжения и частоты при питании от ВЭС

энергии [Текст] / В.Г. Кушнир // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9 – № 1. – С. 30–32.

3. Сибикин Ю.Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии [Текст] / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. – М.: КноРус, 2010. – С. 232.

4. Феоктистов Н.А. Научные основы и перспективы создания систем стабилизации для питания бытовой аппаратуры от ветрогенераторов [Текст] / Н.А. Феоктистов, С.В. Денисов // Теоретические и практические проблемы сервиса. – 2003. – № 3 (8). – С. 22–28.

5. Феоктистов Н.А. Тиристорные устройства управления и защиты бытовых аппаратов и электротехнологических установок: монография [Текст] / Н.А. Феоктистов. – М.: ГАСБУ, 1996. – 222 с.

6. Феоктистов Н.А. Инновационные технологии по созданию автономных систем электропитания и стабилизации параметров электрической энергии от нетрадиционных источников электроэнергии [Текст] / Н.А. Феоктистов, Д.Л. Михайлюк, В.Д. Ходжаев // Межвуз. сб. научн. трудов «Инновационные технологии», вып. 2. – М.: ИГУПИТ, РосНОУ, 2009. – С. 20–30.

7. Феоктистов Н.А. Перспектива создания систем стабилизации при питании радиоэлектронной аппаратуры и бытовой техники от нетрадиционных автономных методов [Текст] // Межвуз. сб. научн.

трудов «Инновационные технологии», вып. 1. – М.: ИГУПИТ, РосНОУ, 2007. – С. 6–11.

#### References

1. Kirillin V.A. Jenergetika. Glavnye problemy: v voprosah i otvetah [Текст] / V.A. Kirillin. – М.: Znanie, 1990. – 128 s.

2. Kushnir V.G. Veter kak al'ternativnyj vid jenergii [Текст] / V.G. Kushnir // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – Т. 9 – № 1. – С. 30–32.

3. Sibikin Ju.D. Netradicionnye i vozobnovljaemye istochniki jenergii [Текст] / Ju.D. Sibikin, M.Ju. Sibikin. – М.: KnoРус, 2010. – С. 232.

4. Feoktistov N.A. Nauchnye osnovy i perspektivy sozdanija sistem stabilizacii dlja pitanija bytovoj apparatury ot vetrogeneratorov [Текст] / N.A. Feoktistov, S.V. Denisov // Teoreticheskie i prakticheskie problemy servisa. – 2003. – № 3 (8). – С. 22–28.

5. Feoktistov N.A. Tiristornye ustrojstva upravlenija i zashhity bytovyh apparatov i jelektrotehnologicheskikh ustanovok: monografija [Текст] / N.A. Feoktistov. – М.: GASBU, 1996. – 222 s.

6. Feoktistov N.A. Innovacionnye tehnologii po sozdaniju avtonomnyh sistem jelektropitanija i stabilizacii parametrov jelektricheskoi jenergii ot netradicionnyh istochnikov jelektrojenergii [Текст] / N.A. Feoktistov, D.L. Mihajljuk, V.D. Hodzhaev

// Mezhvuz. sb. nauchn. trudov «Innovacionnye tehnologii», vyp. 2. – М.: IGUPIT, RosNOU, 2009. – S. 20–30.

7. Feoktistov N.A. Perspektiva sozdaniya sistem stabilizacii pri pitanii radioelektronnoj apparatury i

bytovoj tehniki ot netradicionnyh avtonomnyh metodov [Tekst] // Mezhvuz. sb. nauchn. trudov «Innovacionnye tehnologii», vyp. 1. – М.: IGUPIT, RosNOU, 2007. – S. 6–11.



**Титов Д.Е.**  
**Titov D.E.**

*ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.», старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинский технологический институт ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет», Россия, г. Волгоград*



**Щуров А.Н.**  
**Shchurov A.N**

*ассистент кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы» ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», Россия, г. Новочеркасск*

УДК 73.29.61

## **АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ О РЕЗУЛЬТАТАХ РАБОТЫ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ**

В статье проводится анализ данных о результатах работы гравитационной системы мониторинга гололедообразования СТГН. Анализ проводится для двух параллельных линий ВЛ-110 кВ ПО КЭС «Волгоградэнерго» (V район по гололеду), на одной из которых установлен пост СТГН.

Если бы установка поста системы СТГН не имела системного эффекта, то соотношение отказов линий до и после установки поста должно было бы сохраниться. Реальное соотношение отказов изменилось. Сделан вывод, что установка одного поста СТГН на 50 км линии 110 кВ в V районе по гололеду позволяет снизить поток отказов в 3,6 раза. Аналогично по соотношению потерь электроэнергии при плавках выявлено, что установка СТГН в тех же условиях повышает затраты на плавку более чем в 7 раз ( $\approx 7,4$  раза).

По статистическим данным, только 65% плавков на линии с СТГН – успешны. Полностью исключить неуспешные плавки не представляется возможным, в первую очередь, из-за позднего обнаружения отложений и сложности определения интенсивности нарастания отложений. Для повышения надежности линии необходимо знать момент начала образования отложений, знать интенсивность нарастания и максимально возможную массу отложений, уметь прогнозировать динамику процесса.

Все это становится возможным при условии, что отслеживаются не гололедная муфта на проводе и ее вес, а условия, приводящие к ее возникновению. В рамках данной концепции работает система мони-

торинга интенсивности гололедообразования «МИГ», натурные испытания которой проводятся в сетях ОАО «Волгоградэнерго». Система «МИГ» позволяет определить момент начала образования, вид, максимально возможную массу отложений и интенсивность ее нарастания в реальном времени. Кроме того, система позволяет контролировать температуру провода при подогреве и плавке гололеда, перегрузках линии в летнее время, прогнозирует изменение интенсивности гололедообразования.

*Ключевые слова:* интенсивность образования гололеда, гололедно-изморозевые отложения, конденсация и десублимация пара.

## ANALYSIS OF STATISTICAL DATA ON RESULTS OF WORK OF SYSTEMS OF GLAZE ICE MONITORING

In article the analysis of data on results of work of gravitational system of glaze ice monitoring of STGN is made. The analysis is made for two parallel air lines 110 kV, on one of which STGN post is established.

In article the analysis of data on results of work of gravitational system of monitoring of icing of STGN is made. The analysis is made for two parallel VL-110 lines of kV of PO KES of «Volgogradenergo» (the V area on ice), on one of which STGN post is established.

Installation of a post of system of STGN changes a ratio of refusals of lines. Installation of one post of STGN allows to reduce number of refusals by 3,6 times. The analysis of data on electric power losses is made at swimming trunks. It is revealed that the STGN installation raises costs of melting by 7 times ( $\approx 7,4$  times).

According to statistical data only 65% of swimming trunks for STGN of the line are successful. Completely it is impossible to exclude unsuccessful swimming trunks because of late detection of ice and complexity of determination of intensity of icing. For increase of reliability of the line it is necessary to know the moment of the beginning of formation of deposits, to know intensity of increase and the greatest possible mass of deposits, to be able to predict dynamics of process.

It becomes possible if the ice weight, and the conditions leading to its emergence are traced not. Within this concept the system of monitoring of intensity of icing «МИГ». Natural tests «МИГ» are carried out in networks of JSC «Volgogradenergo». The «МИГ» system allows to define the moment of the beginning of education, a look, the greatest possible mass of glaze ice and intensity of its increase in real time. Besides, the system allows to control wire temperature at heating and melting of ice, line overloads in summertime, predicts change of intensity of icing.

*Key words:* icing intensity, glaze-ice and rime deposition, steam condensation and desublimation.

Современные системы мониторинга гололедообразования на проводах воздушных линий электропередачи начали внедрять относительно недавно (2006–2007 гг.). Для оценки системного эффекта от их внедрения необходимо проанализировать снижение параметра потока отказов, вызванных гололедом, снижение затрат на эксплуатацию линии в гололедный период по накопленным статистическим данным. В статье проводится анализ данных о результатах работы системы мониторинга гололедообразования СТГН (разработка НТЦ «Микро», г. Энгельс) как одной из наиболее успешных. СТГН работает по гравитационному способу – производит замер веса отложений на проводе.

Анализ проводится для линий ВЛ-110 кВ № 423 и ВЛ-110 кВ № 424 ПО КЭС «Волгоградэнерго» (ВЛ № 423: длина – 22,6 км, провод АС–185, ж/б опоры, степень износа 64%; ВЛ № 424: длина 50 км, провод АС-185, ж/б опоры, степень износа – 64%). Обе ли-

нии находятся в Камышинском районе Волгоградской области, протянуты с подстанции «Литейная» на юг (№ 423 – ПС «ГНС-2»; № 424 – ПС «Антиповская»). ВЛ-110 кВ № 423 резервируется ВЛ-110 кВ № 461, а ВЛ-110 кВ № 424 – ВЛ-110 кВ № 462. На обеих линиях предусмотрена плавка отложений переменным током и есть возможность проведения плавки постоянным током. В начале 2008 года на линии № 424 был установлен пост СТГН. Установка произведена после необычайно гололедного декабря 2007 года. Обе линии находятся в V нормативном районе гололедно-ветровых нагрузок (рис. 1).

Местность, по которой проходят линии, подвергается частым гололедным отложениям с интенсивностью роста по диаметру до 1 мм/час (по накопленным данным в ходе работы СТГН [1]). Среднее число дней в году с гололедом, изморозью и сложными отложениями – 32 [2].

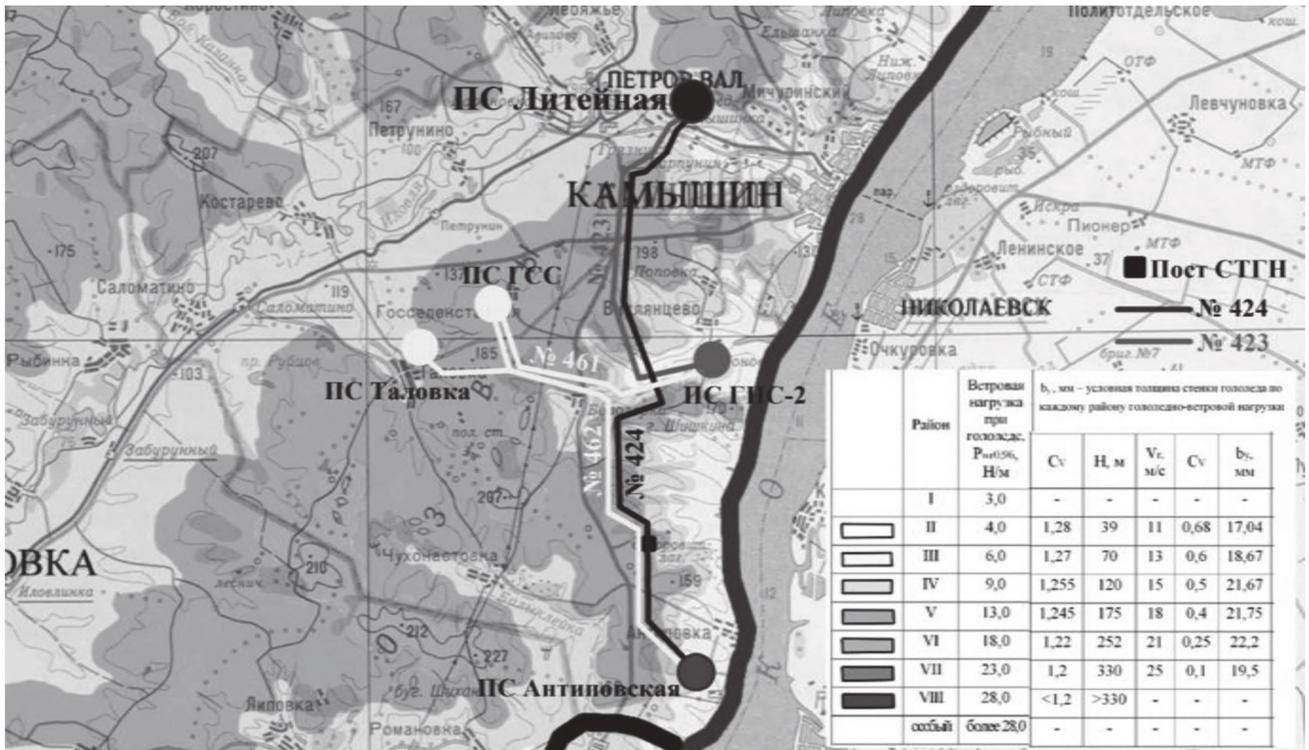


Рис. 1. План расположения ВЛ-110 кВ № 423 и ВЛ-110 кВ № 424 ПО КЭС «Волгоградэнерго»

По динамике изменения упущенной прибыли от реализации электроэнергии по причине гололеда (табл. 1) нельзя сказать о ее снижении после внедрения СТГН. Потребители ПС «Антиповская»

являются более ответственными, чем ПС «ГНС-2», на ПС «Антиповская» предусмотрен АВР, поэтому электроснабжение потребителей имеет высокую надежность.

Таблица 1

**Упущенная прибыль от реализации электроэнергии по причине гололеда**

Год	Линия № 423				Линия № 424			
	кВт·ч		тыс. руб.		кВт·ч		тыс. руб.	
	всего	по причине гололеда	всего	по причине гололеда	всего	по причине гололеда	всего	по причине гололеда
2007	0	0	0	0	655	655	1978	1978
2008	9	0	27	0	0	0	0	0
2009	3644	3644	11005	11005	0	0	0	0
2010	362	0	1093	0	0	0	0	0
2011	6182	834	18670	2519	0	0	0	0
2012	0	0	0	0	0	0	0	0
2013	710	710	2144	2144	0	0	0	0

Линия № 423 на 93% своей длины проложена параллельно линии № 424, поэтому можно принять, что на обе линии оказывается одинаковое атмосферное воздействие. Так как обе линии имеют одинаковую степень износа (64%), то можно допустить, что вероятности отказа линий на участке параллельной прокладки одинаковы.

В табл. 2 представлен поток отказа линий (в

том числе по причине гололеда) и количество плавок (в том числе успешных).

Резкое снижение отказов после 2007 года нельзя объяснить применением СТГН, так как 21 отказ в сумме на обеих линиях в 2007 году обусловлен случайным фактором – погодными условиями (гололедный декабрь 2007 года).

Таблица 2

**Количество отключений линий (в том числе по причине гололеда) и количество проводимых плавок (в том числе успешных)**

Год	Поток отказа линии				Количество проводимых плавок			
	№ 423		№ 424		№ 423		№ 424	
	всего	по причине гололеда	всего	по причине гололеда	всего	успешных	всего	успешных
2007	9	8	14	13	2	1	4	4
2008	1	0	0	0	1	1	3	3
2009	3	3	2	1	2	1	6	3
2010	1	0	2	0	0	0	5	3
2011	3	1	1	1	1	1	2	1
2012	1	0	1	0	0	0	1	0
2013	7	5	3	2	1	1	7	6

В 2007 году линии № 423 и 424 находились в одинаковых условиях эксплуатации. Соотношение отказов линий по причине гололеда 8 : 13 (0,61), а соотношение длин 21 км : 50 км (0,42), различие обусловлено тем, что на участке параллельной прокладки находится наиболее подверженное метеорологическим воздействиям место по результатам многолетних наблюдений (район 13-го км трассы Камышин – Волгоград).

Примем допущение, что соотношение отказов 0,61 является среднестатистическим, тогда это соотношение должно было сохраниться по итогам 2008–2013 гг. На рисунках 2 и 3 представлены гистограммы распределения отказов по причине гололеда, проводимых плавок и успешных плавок на линиях № 423 и 424 соответственно.

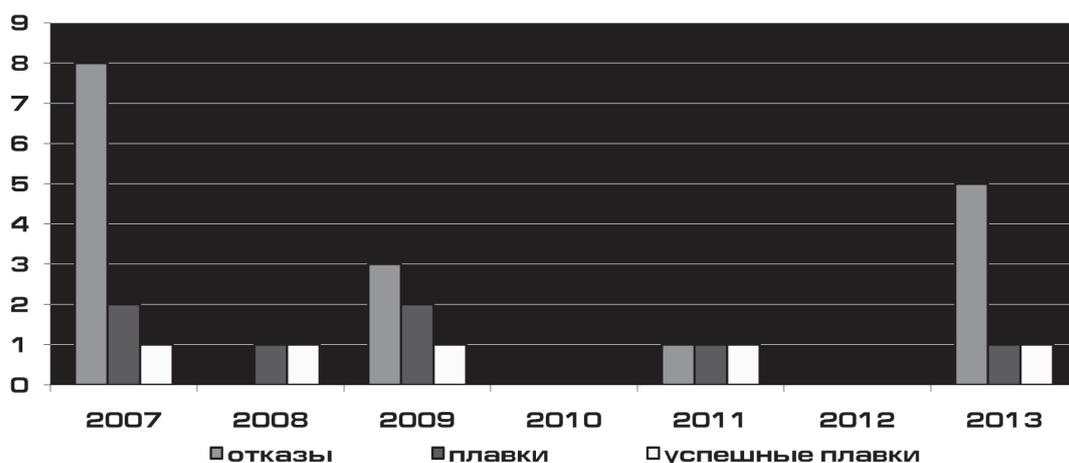


Рис. 2. Количество отказов по причине гололеда, проводимых плавок и успешных плавок на линии № 423

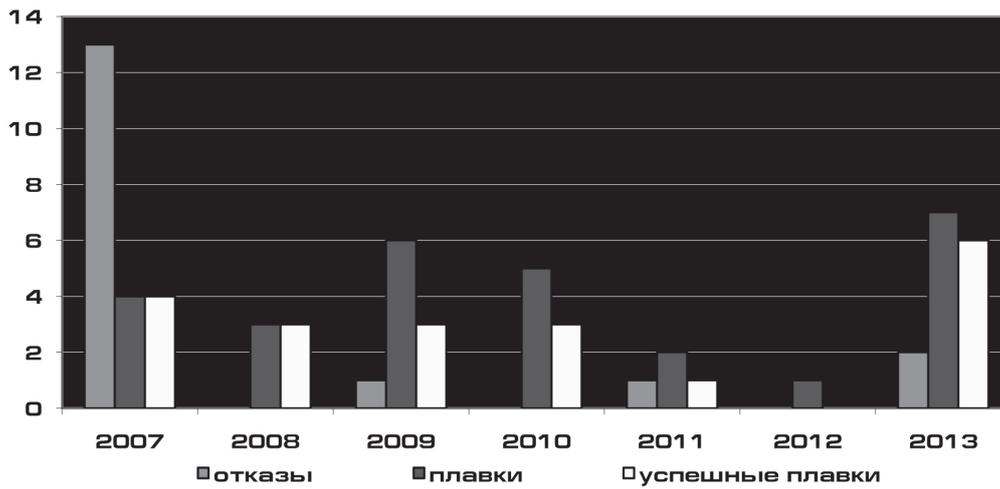


Рис. 3. Количество отказов по причине гололеда, проводимых плавок и успешных плавок на линии № 424

За 2008–2013 годы на линии № 423 зафиксировано 9 отказов по причине гололеда. Соответственно, при условии отсутствия СТГН на линии № 424 должно было бы наблюдаться около 14–15 отказов, а наблюдалось 4 отказа. Значит, в ориентировочных

расчетах можно принять, что установка одного поста СТГН на 50 км позволяет снизить поток отказов в 3,6 раза. Соотношение потерь электроэнергии при плавках в 2007 году (рис. 4–5) схоже с соотношением отказов линий ( $0,65 \approx 0,61$ ).

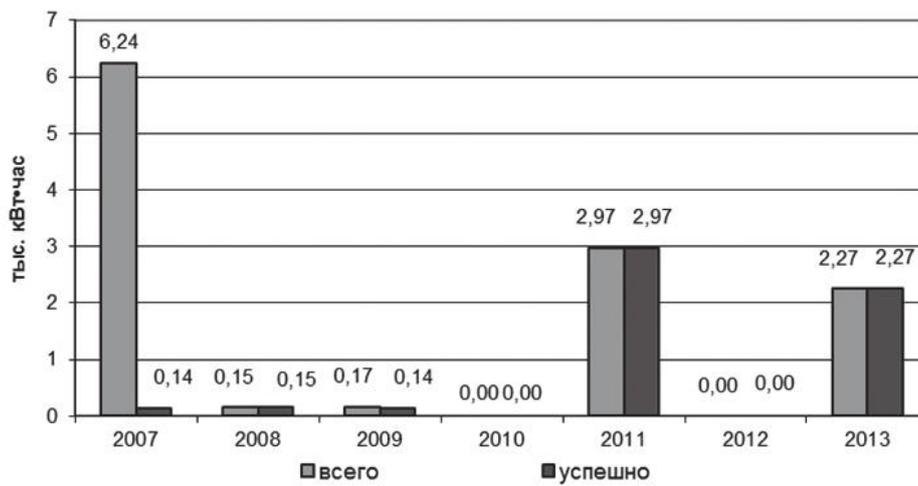


Рис. 4. Потери электроэнергии при плавках (в том числе успешных) на линии № 423

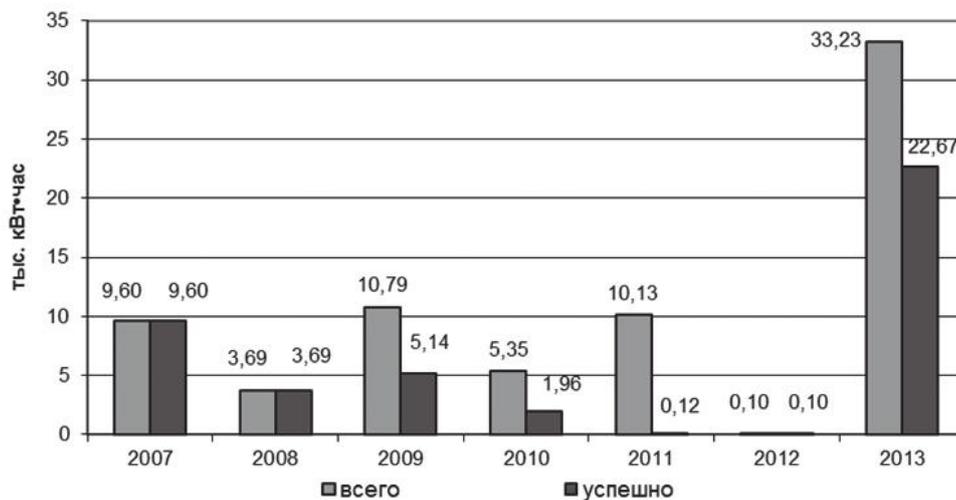


Рис. 5. Потери электроэнергии при плавках (в том числе успешных) на линии № 424

Примем аналогичное допущение, что соотношение потерь на плавку 0,65 является среднестатистическим, тогда это соотношение должно было сохраниться по итогам 2008–2013 гг.

За 2008–2013 годы на линии № 423 потери электроэнергии на плавку составили 5,552 тыс. кВт·ч. Соответственно, при условии отсутствия СТГН на линии № 424 должно было быть потрачено на плавку около 8,54 тыс. кВт·ч, а было потрачено 63,281 тыс. кВт·ч. Значит, в ориентировочных расчетах можно принять, что установка СТГН повышает затраты на плавку более чем в 7 раз ( $\approx 7,4$  раза).

Если до установки системы СТГН плавка отложений не производилась в ущерб надежности, то после установки обоснованность проведения плавки повышается, за счет чего снижается количество отказов по причине гололеда.

Далеко не каждая плавка отложений на линии, оборудованной СТГН, является успешной. За период с 2008 по 2013 г. на линии № 424 из 24 плавков только 16 оказались успешными. Полностью исключить неуспешные плавки не представляется возможным, в первую очередь, из-за позднего обнаружения отложений и сложности определения интенсивности нарастания отложений. В условиях ограниченного количества оперативных бригад при необходимости организации последовательных плавков нескольких линий дефицит времени и неспособность прогнозирования развития ситуации являются лимитирующими факторами для надежности линии [3].

Для повышения надежности линии необходимо знать момент начала образования отложений, интенсивность нарастания и максимально возможную массу отложений, уметь прогнозировать динамику процесса.

Все это становится возможным при условии, что отслеживаются не гололедная муфта на проводе и ее вес, а условия, приводящие к ее возникновению [4]. В рамках данной концепции работает система мониторинга интенсивности гололедообразования «МИГ». В данный момент проводятся ее натурные испытания в сетях ОАО «Волгоградэнерго». Система «МИГ» позволяет определить момент начала образования, вид, максимально возможную массу отложений и интенсивность ее нарастания в реальном времени [5]. Кроме того, система позволяет контролировать температуру провода при подогреве и плавке гололеда, перегрузках линии в летнее время, прогнозирует изменение интенсивности гололедообразования. Система «МИГ» универсальна: она может быть применена на любом проводе, находящемся в воздухе. Состоит «МИГ» из диспет-

черского пункта и постов измерения и передачи. На посту устанавливаются датчики направления и скорости ветра, температуры и влажности воздуха, температуры провода.

#### Список литературы

1. *Исследование интенсивности гололедообразования на проводах ВЛ с использованием опытных данных* / А.Н. Щуров, Д.Е. Титов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 25–29.
2. *Число дней с различными явлениями*, Саратов [Электронный ресурс] // Погода и климат: [сайт] [2014]. – Режим доступа: <http://pogodaiklimat.ru/climate/34171.htm>.
3. *Системы мониторинга гололедообразования и перспективы их совершенствования* [Текст] / Д.Е. Титов, Г.Г. Угаров // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – М., 2014. – № 7. – С. 52–59.
4. *Физические процессы образования гололедных отложений на проводах воздушных линий электропередачи* [Текст] / Д.Е. Титов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – М., 2014. – № 1. – С. 31–35.
5. *Термодинамический способ мониторинга гололедных отложений на проводах* [Текст] / Д.Е. Титов, Г.Г. Угаров // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – М., 2014. – № 4. – С. 37–44.

#### References

1. *Issledovanie intensivnosti gololjodoobrazovanija na provodah VL s ispol'zovaniem opytnyh dannyh* / A.N. Shhurov, D.E. Titov // Izvestija vuzov. Severo-Kavkazskij region. Tehniceskie nauki. – 2014. – № 3. – S. 25 – 29.
2. *Chislo dnej s razlichnymi javlenijami*, Saratov [Jelektronnyj resurs] // Pogoda i klimat: [sajt] [2014]. – Rezhim dostupa: <http://pogodaiklimat.ru/climate/34171.htm>.
3. *Sistemy monitoringa gololedoobrazovanija i perspektivy ih sovershenstvovanija* [Tekst] / D.E. Titov, G.G. Ugarov // Jeлектроoborudovanie: jekspluatacija i remont. – M., 2014. – № 7. – S. 52–59.
4. *Fizicheskie processy obrazovanija gololednyh otlozhenij na provodah vozdushnyh linij jelektroperedachi* [Tekst] / D.E. Titov // JeLEKTRO. Jelektrotehnika, jelektrojenergetika, jelektrotehniceskaja promyshlennost'. – M., 2014. – № 1. – S. 31–35.
5. *Termodinamiceskij sposob monitoringa gololednyh otlozhenij na provodah* [Tekst] / D.E. Titov, G.G. Ugarov // Jeлектроoborudovanie: jekspluatacija i remont. – M., 2014. – № 4. – S. 37–44.



**Яковлев С.М.**  
**Yakovlev S.M.**

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и применение электрической энергии в сельском хозяйстве» ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный аграрный университет», Россия, г. Уфа*



**Каримов И.И.**  
**Karimov I.I.**

*аспирант кафедры «Электроснабжение и применение электрической энергии в сельском хозяйстве» ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный аграрный университет», Россия, г. Уфа*

УДК 628.941.8

## **ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ СВЕТОДИОДНАЯ СИСТЕМА ОБЛУЧЕНИЯ РАСТЕНИЙ**

При прочих равных условиях (температура и влажность воздуха, концентрация  $\text{CO}_2$ , полив, минеральное питание) наибольшее влияние на формирование урожая в теплице оказывает радиационный режим.

Применение в технологии светокультуры светодиодных фитосветильников и автоматизированных систем управления режимом облучения растений позволяет максимально реализовать интегрированные алгоритмы оптимизации энергоэффективности. Количественным показателем энергоэффективности технологического процесса принято считать удельную энергоемкость, характеризующую физический расход топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на единицу продукции. Однако для потребителя энергии не менее важным, чем количество топлива (энергии), является его денежная стоимость, поэтому в ряде случаев целесообразно рассматривать экономическую энергоемкость, т. е. показатель стоимости ТЭР на единицу продукции. Рассматривается подход к оптимизации электротехнологического процесса светокультуры с позиций экономической энергоемкости. Предлагается производить оптимизацию на основе совместного анализа фотопериода, тарифного плана электроэнергии, солнечной радиации. Обосновывается введение новых частных динамических показателей энергоемкости – интегральной и дифференциальной энергоемкостей, благодаря чему появляется возможность реализации прогнозирования и диагностики точек бифуркации на кривой роста, что позволяет дополнительно уменьшить энергопотребление, сократить сроки выращивания урожая и расширить функциональные возможности системы.

*Ключевые слова:* энергоемкость, тариф, система облучения, спектр, электроэнергия, растение, фотопериод, теплица.

## **ENERGY-SAVING LIGHTING SYSTEM FOR PLANTS**

*Ceteris paribus* (temperature, humidity,  $\text{CO}_2$  concentration, irrigation, mineral nutrition), the greatest influence on the formation of the crop in the greenhouse has a radiation regime. The use of irradiation plant technology LED lamps and automated control systems irradiation conditions plants maximizing the integrated optimization algorithms efficiency. Quantitative measure of the energy efficiency of the technological process is considered to be specific energy, characterized by physical consumption of fuel and energy resources (FER) per unit of output. However, for the consumer of energy is not less important than the amount of fuel (energy) is its monetary value, so in some cases it is advisable to consider the economic energy intensity. An approach to the optimization of irradiation plant process in terms of economic energy intensity. It is proposed to make optimizations based on a

joint analysis of photoperiod tax electricity, solar radiation. Justified the introduction of new private dynamic energy intensity - integral and differential energy-intensive, so it is possible to implement the prediction and diagnosis of bifurcation points on the curve of growth, which can further reduce power consumption, reduce the terms of crop production and expand the functionality of the system.

*Key words:* energy consumption, rate irradiation system, spectrum, electricity, plant, photoperiod, greenhouse.

При выращивании растений с использованием технологии светокультуры целью управления электротехнологическим процессом является обеспечение заданного уровня продуктивности и сроков вызревания растений при минимуме затрат на электроэнергию, использованную для облучения растений.

При прочих равных условиях (температура и влажность воздуха, концентрация  $\text{CO}_2$ , полив, минеральное питание) наибольшее влияние на формирование урожая в теплице оказывают факторы, определяющие радиационный режим теплицы: графики солнечной радиации, нормированные показатели облучения растений (удельная интенсивность, суммарная энергия облучения, фотопериод), тарифные планы стоимости электроэнергии. Обобщающим показателем энергоэффективности является показатель удельной энергоемкости продукции.

Рассмотрим основные особенности перечисленных факторов.

Знание параметров солнечной радиации приобретает особую актуальность при круглогодичном цикле выращивания плодоовощной продукции и зелени. Например, при выращивании томатов, имеющих продолжительность созревания порядка 95...115 дней, два севооборота – зимне-весенний и осенне-зимний – невозможны без светокультуры, т. е. без досветки растений. Для расчета и оптимиза-

ции радиационного режима теплицы целесообразно использовать официальные статистические данные [1], где приведены различные показатели солнечной радиации, в том числе средние за месяц часовые суммы суммарной радиации на горизонтальной площадке у поверхности Земли. Необходимо также учитывать влияние коэффициента пропускания прозрачного покрытия ограждающих конструкций теплицы и доли фотосинтетически активной радиации (ФАР) в общем излучении. С учетом перечисленных факторов удельная мощность естественной радиации  $F_{\text{вок}}(t)$ , обеспечивающая естественный радиационный режим после прохождения через ограждающие конструкции теплицы, может быть оценена следующим образом [2]:

$$F_{\text{вок}}(t) = C_{\phi} K_{\text{зе}} F_e(t), \quad (1)$$

где  $C_{\phi}$  – коэффициент, учитывающий долю ФАР в суммарной интегральной естественной радиации;  $K_{\text{зе}}$  – коэффициент запаса обеспеченности расчетного естественного радиационного режима (не менее 0,9);  $F_e(t)$  – интенсивность естественной наружной радиации в момент времени  $t$ .

С учетом (1) сглаженные графики часовых сумм суммарной солнечной радиации на горизонтальной площадке у поверхности грунта в теплице будут иметь вид, показанный на рисунке 1.

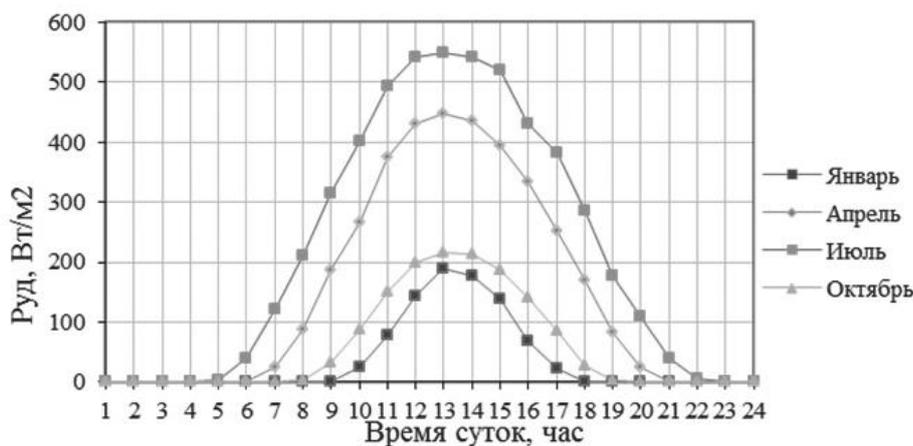


Рис. 1. Графики солнечной инсоляции в теплице

СНиП 2.10.04-85 выделяет три критерия достаточности количества энергии облучения (дозы) ФАР для выращивания рассады и взрослой культуры. Критерий считается оптимальным при выполнении следующих условий:

– для рассады:  $D_{\text{опт.рас}} = F_{\text{нотт.рас}} \cdot t_{\text{нотт.рас}} = 40 \cdot 14 = 560 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ ;

– для культуры:  $D_{\text{опт.кул}} = F_{\text{нотт.кул}} \cdot t_{\text{нотт.кул}} = 100 \cdot 16 = 1600 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ .

Критерий считается минимально физиологически достаточным при выполнении следующих условий:

– для рассады:  $D_{\text{дост.рас}} = F_{\text{ндост.рас}} \cdot t_{\text{ндост.рас}} = 40 \cdot 10 = 400 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ ;

– для культуры:  $D_{\text{дост.кул}} = F_{\text{ндост.кул}} \cdot t_{\text{ндост.кул}} = 70 \cdot 16 = 1120 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ .

Критерий считается минимально физиологически допустимым при выполнении следующих условий:

– для рассады:  $D_{\text{доп.рас}} = F_{\text{ндоп.рас}} \cdot t_{\text{ндоп.рас}} = 25 \cdot 10 = 250 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ ;

– для культуры:  $D_{\text{доп.кул}} = F_{\text{нотт.кул}} \cdot t_{\text{ндоп.кул}} + P_{\text{ндост.рас}} \cdot t_{\text{ндост.рас}} = 100 \cdot 5 + 40 \cdot 10 = 900 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ .

В выражениях для критериев приняты следующие обозначения:  $D_{\text{опт.рас}}, D_{\text{опт.кул}}, D_{\text{дост.рас}}, D_{\text{дост.кул}}, D_{\text{доп.рас}}, D_{\text{доп.кул}}$  – энергия облучения (доза) ФАР для рассады и взрослой культуры соответственно для оптимального, минимально физиологически достаточного, минимально физиологически допустимого критериев;  $F_{\text{нотт.рас}}, F_{\text{нотт.кул}}, F_{\text{ндост.рас}}, F_{\text{ндост.кул}}, F_{\text{ндоп.рас}}, F_{\text{ндоп.кул}}$  – нормированная удельная мощность ФАР для рассады и взрослой культуры соответственно для оптимального, минимально физиологически достаточного, минимально физиологически допустимого критериев;  $t_{\text{нотт.рас}}, t_{\text{нотт.кул}}, t_{\text{ндост.рас}}, t_{\text{ндост.кул}}, t_{\text{ндоп.рас}}, t_{\text{ндоп.кул}}$  – нормированное время фотопериода для рассады и взрослой культуры соответственно для оптимального, минимально физиологически достаточного, минимально физиологически допустимого критериев.

Искусственное облучение растений влечет за собой эксплуатационные расходы на электроэнергию, которые составляют от 50 до 75% от себестоимости продукции. В соответствии с «Основными положениями функционирования розничных рынков электрической энергии» с 1 января 2012 г. установлены новые принципы ценообразования на розничном рынке электрической энергии и мощности. Предельные уровни нерегулируемых цен рассчитываются по шести ценовым категориям, причем выбор ценовой категории осуществляется потребителем самостоятельно. Наличие различных вариантов оплаты стоимости электроэнергии, возможность адаптации графиков загрузки потребителя с учетом дифференциации тарифов по зонам суток дают большие возможности по оптимизации энергопотребления и повышению энергоэффективности электротехнологического процесса выращивания растений. Этому, прежде всего, способствует специфика производственного процесса растениеводства, заключающаяся в его круглосуточной непрерывности в течение всего периода выращивания растений и в возмож-

ности практически неограниченного варьирования интервалов досветки и пауз облучения фитоценоза.

Количественным показателем энергоэффективности технологического процесса принято считать удельную энергоемкость, характеризующую физический расход топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на единицу продукции. Однако для потребителя энергии не менее важным, чем количество топлива (энергии), является его денежная стоимость, поэтому в ряде случаев целесообразно рассматривать экономическую энергоемкость, п.с. показатель стоимости ТЭР на единицу продукции.

Предлагается при рассмотрении процесса оптимизации электропотребления в теплице дополнительно ввести два частных показателя энергоемкости: дифференциальную энергоемкость и интегральную энергоемкость.

Определим дифференциальную энергоемкость  $\varepsilon_d$  в момент времени  $t$  в виде:

$$\varepsilon_d = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{W(t + \Delta t) - W(t)}{P(t + \Delta t) - P(t)} = \frac{dW(t)}{dP(t)}, \quad (2)$$

где  $W(t)$ ,  $P(t)$  и  $W(t+\Delta)$ ,  $P(t+\Delta)$  – количество затраченной энергии и показатель производительности в моменты времени  $t$  и  $(t+\Delta t)$  соответственно.

Определим интегральную энергоемкость  $\varepsilon_i$  в момент времени  $t$  в виде:

$$\varepsilon_i(t) = \frac{W(t)}{P(t)}, \quad (3)$$

где  $W(t)$  – количество затраченной энергии на достижение показателя производительности  $P(t)$  к моменту времени  $t$ .

Следует отметить, что удельная энергоемкость продукции является отчетным показателем, рассчитываемым уже после завершения полного цикла технологического процесса, поэтому относится к статическим показателям и не может быть использована для оптимизации энергоэффективности непосредственно в ходе процесса. Показатели же  $\varepsilon_d$  и  $\varepsilon_i$  являются динамическими функциями времени и могут использоваться в ходе самого процесса.

Рассмотрим динамику поведения  $\varepsilon_d$  и  $\varepsilon_i$  как функций времени в ходе процесса роста растений. Примем допущение о том, что в течение всего технологического процесса выращивания растений суточное значение суммарной энергии облучения  $E_{\text{рад сум}}(j)$ ,  $j=1,2,\dots,m$  не изменяется и равно сумме энергий естественной и искусственной составляющих:

$$E_{\text{рад сум}}(j) = E_{\text{сол сум}}(j) + E_{\text{иск сум}}(j) = \text{const}, \quad (4)$$

где  $E_{\text{сол сум}}(j)$ ,  $E_{\text{иск сум}}(j)$  – естественная и искусственная составляющие энергии облучения на  $j$ -е сутки,  $j=1,2,\dots,m$ .

При этом значения естественной и искусственной составляющих энергии облучения являются функциями как номера суток  $j$  со дня посева, так и

номера часа внутри суток, что может быть выражено следующими формулами:

$$E_{\text{сол сут}}(j) = \sum_{i=1}^{24} E_{\text{сол час}i}(j) = \sum_{i=1}^{24} F_{\text{сол час}i}(j)\Delta t; j = 1, m, \quad (5)$$

$$E_{\text{иск сут}}(j) = \sum_{i=1}^{24} E_{\text{иск сут}i}(j) = \sum_{i=1}^{24} F_{\text{иск сут}i}(j)\Delta t; j = 1, m, \quad (6)$$

где  $E_{\text{солчас}}(j)$ ,  $F_{\text{солчас}}(j)$  – значения почасовых энергии и мощности естественного солнечного излучения;  $E_{\text{искчас}}(j)$ ,  $F_{\text{искчас}}(j)$  – значения почасовых энергии и мощности искусственного досвечивающего излучения;  $j$  – номер суток со дня посева.

Затраченная на формирование энергии досвечивающего облучения  $E_{\text{иск}}$  электрическая энергия  $W_{\text{иск}}$  может быть определена выражением:

$$W_{\text{иск}} = \frac{E_{\text{иск}}}{\eta}, \quad (7)$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия источника облучения.

Функция интегральной энергоёмкости  $\varepsilon_i(t)$  может быть вычислена следующим образом:

$$\varepsilon_i(t) = \frac{W_{\text{иск}}(t)}{P(t)} = \frac{\int_0^t P_{\text{иск}}(t)dt}{P(t)}, \quad (8)$$

где  $P_{\text{иск}}(t)$  – электрическая мощность источника искусственного облучения.

Для упрощения примем допущение, что  $P_{\text{иск}}(t) = P_{\text{иск}} = \text{const}$ , тогда функция интегральной энергоёмкости  $\varepsilon_i(t)$  будет иметь вид:

$$\varepsilon_i(t) = \frac{P_{\text{иск}}}{P(t)} \cdot t. \quad (9)$$

Рассуждая аналогичным образом, для функции

дифференциальной энергоёмкости получим:

$$\varepsilon_d(t) = \frac{\Delta W_{\text{иск}}(t)}{\Delta P(t)} = \frac{P_{\text{иск}}}{\Delta P(t)} \Delta t. \quad (10)$$

Для нахождения  $\varepsilon_d$  и  $\varepsilon_i$  как функций времени необходимо знать зависимость  $P(t)$ . Для описания процессов роста растений часто используют логистические кривые роста, например, уравнение роста Гомпертца [3]:

$$\frac{1}{w} \frac{dw}{dt} = \mu e^{-St}, \quad (11)$$

где  $w$  – сухая масса растения;  $\mu$  – удельная скорость роста;  $S$  – константа скорости.

На рисунке 2 показан график роста растений, аппроксимированный уравнением роста Гомпертца, графики зависимостей  $\varepsilon_d$  и  $\varepsilon_i$ , график расхода электроэнергии на искусственное облучение. Из графиков видно, что динамика роста растений сильно коррелирована с  $\varepsilon_d$  и  $\varepsilon_i$ . Это позволяет осуществить идентификацию фенологических фаз развития растений, что обычно решается чисто субъективно или с привлечением сложно формализуемых критериев. Например, для злаковых растений индикатором такого перехода принято считать фазу цветения.

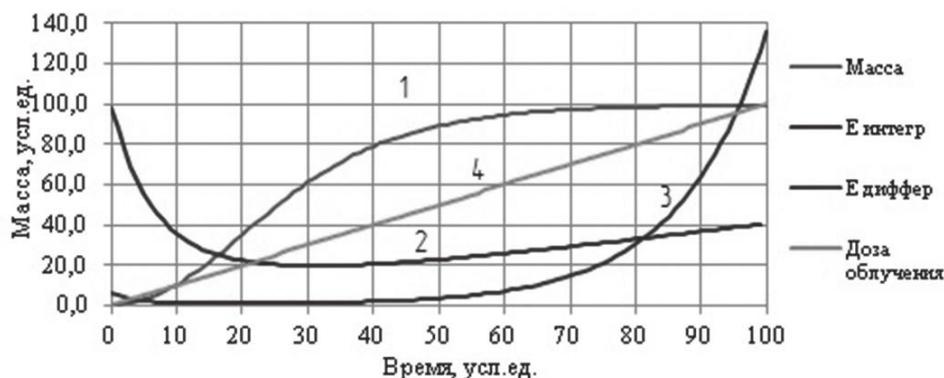


Рис. 2. График роста растений 1, графики зависимости интегральной 2 и дифференциальной 3 энергоёмкостей, график расхода электроэнергии 4

Показатели  $\varepsilon_d$  и  $\varepsilon_i$  позволяют получить достаточно простую модель фазовых переходов, в том числе с вегетативной на генеративную фазу развития. Из графиков видно, что функции  $\varepsilon_d$  и  $\varepsilon_i$  по ходу роста и развития растений имеют минимумы, причем они разнесены по времени. Минимум  $\varepsilon_d$  соответствует точке перегиба кривой роста и середине фазы экспоненциального роста; когда темп роста растений максимален, наблюдается интенсивное загущение ценоза и происходит смена фаз развития с вегетативной на генеративную. С точки зрения радиационного режима на этой стадии роста целесообразно произвести корректировку спектра излучения с учетом специфики поглощения излучения загущенным ценозом, в частности, увеличить мощность зеленой составляющей спектра и уменьшить мощность синей составляющей.

Интегральная энергоемкость имеет минимум, который достигается через определенное время после точки переключения на генеративную фазу развития, например, для графиков на рисунке 2 минимумы  $\varepsilon_d$  и  $\varepsilon_i$  приходятся соответственно на 20-е и 35-е «условные сутки». Этот минимум соответствует наилучшему соотношению между количеством затраченной на облучение электроэнергии и показателем продуктивности растений. Однако с момента

достижения этого минимума общий рост растений замедляется и показатель  $\varepsilon_i$  неизбежно увеличивается. Так как на этой фазе развития происходит созревание растений и не требуется затрат энергии на развитие вегетативной части растений, то можно частично стабилизировать показатель  $\varepsilon_i$ , например, путем сокращения фотопериода досветки и/или уменьшения мощности искусственного облучения.

Для реализации рассмотренных выше алгоритмов оптимизации предлагается энергосберегающая система облучения растений, функциональная схема которой показана на рисунке 3. Известно, что для растений сильными морфогенетическими факторами, регулирующими ростовые и фотосинтетические реакции, являются, по степени значимости, фотопериод, спектральный состав излучения и его интенсивность. В общем случае для многих сельскохозяйственных растений рекомендуется приблизительно следующее распределение энергии излучения по спектру ФАР: 25–30% – в синей области (380–490 нм), 25–20% в зеленой (490–590 нм) и 50% – в красной области (600–700 нм). В [4] показано, что наиболее эффективно формирование необходимого спектра излучения реализуется с помощью светодиодных источников излучения с мощными цветными светодиодами.

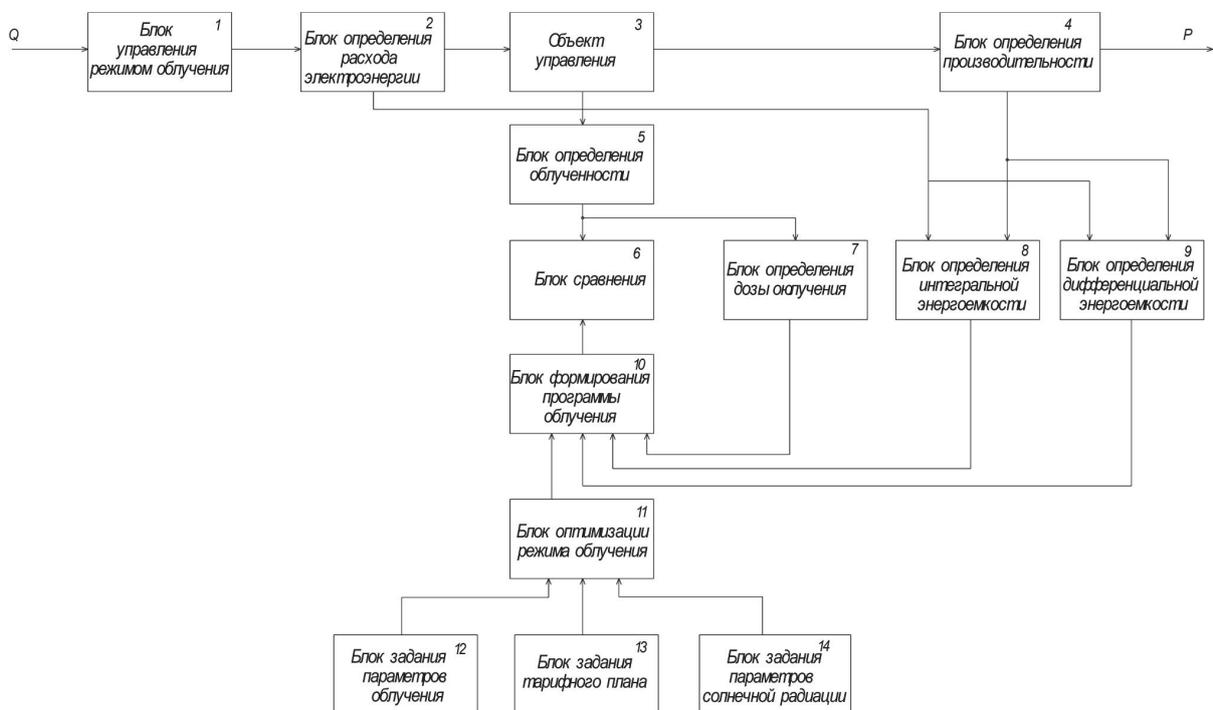


Рис. 3. Энергосберегающая система облучения растений

Система включает в себя блок управления режимом облучения 1, блок определения расхода электроэнергии 2, объект управления 3, блок определения производительности 4, блок определения облученности 5, блок сравнения 6, блок определения дозы облучения 7, блок определения интегрального значения энергоемкости 8, блок определения дифференциального значения энергоемкости 9, блок формирования программы облучения 10, блок оптимизации режима облучения 11, блок задания параметров облучения 12, блок задания тарифного плана электроэнергии 13, блок задания параметров солнечной радиации 14.

Система работает следующим образом. В начале работы в блоке задания параметров облучения 12 задают параметры облучения растений:

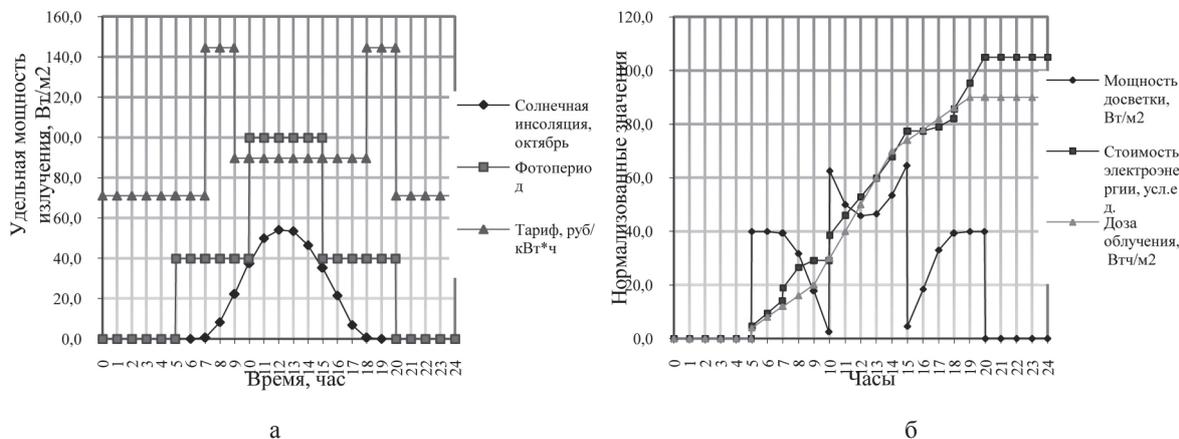


Рис. 4: а) совмещенные графики солнечной инсоляции, фотопериода растений и тарифов на электрическую энергию; б) неоптимизированный график работы блока управления режимом облучения

График тарифного плана электроэнергии принят по ценовой категории № 2, что соответствует одноставочному тарифу, дифференцированному по зонам суток (пик, полупик, ночь). График солнечной радиации соответствует октябрю 2006 года, г. Омск.

Исходные данные с выходов блоков 12, 13, 14 поступают в блок оптимизации режима облучения 11, который формирует график фотопериода, обеспечивающий заданную суточную дозу облучения, сформированную по принципу комплементарности, т. е. дополнения энергии солнечной радиации энергией искусственного облучения. За критерий оптимальности графика фотопериода принимается минимум стоимости электрической энергии за текущие сутки.

Для композиции исходных данных, показанных на рисунке 4а, расчетный неоптимизированный график режима облучения показан на рисунке 4б. Из графика видно, что требования по суточной дозе радиации удовлетворяются, однако по стоимости электроэнергии данный сценарий не оптимален. Опти-

мизация графика фотопериода производится путем фрагментации исходного графика и поиска такого сочетания положений фрагментов фотопериода по времени, при котором выполняется требование по суточной дозе облучения и одновременно достигается минимум стоимости потребленной электроэнергии.

Критерий оптимальности описывается следующими выражениями:

нормированную удельную интенсивность и спектр излучения, нормированный график фотопериода, нормированную суточную дозу облучения. В блоке задания тарифного плана электроэнергии 13 задают параметры тарифного плана электроэнергии. В блоке задания параметров солнечной радиации 14 задают суточные графики часовых сумм суммарной солнечной радиации.

Совмещенные графики заданных параметров показаны на рисунке 4а. Для примера параметры фотопериода облучения выбраны следующим образом. Удельная интенсивность ФАР принята по минимально физиологически допустимому критерию, равному 40 Вт/м² в течение 10 часов плюс 100 Вт/м² в течение 5 часов. Нормированная суточная доза ФАР составляет при этом  $40 \cdot 10 + 100 \cdot 5 = 900$  (Вт·ч/м²).

Критерий оптимальности описывается следующими выражениями:

Критерий оптимальности описывается следующими выражениями:

$$D_{сут} = \sum_{i=1}^{24} (F_{сол\ час}(i) + F_{иск\ час}(i)) \Delta t \geq D_{нсут}, \quad (12)$$

$$C_{эл} = \sum_{i=1}^{24} P_{иск\ час}(i) \Delta t C_T(i) \Rightarrow \min, \quad (13)$$

$$T_{ФП} = \sum_{i=1}^n \Delta t(i), \quad (14)$$

где  $D_{сут}$ ,  $D_{норм}$  – фактическая и нормированная суточные дозы облучения;  $F_{солчас}(i)$ ,  $F_{искчас}(i)$  – удельная интенсивность естественного и искусственного облучения на  $i$ -м часе фотопериода;  $\Delta t$  – значение временного интервала  $i$ -го фрагмента фотопериода, равное 1 часу;  $P_{искчас}(i)$  – электрическая мощность, затраченная на искусственное облучение на  $i$ -м часе фотопериода;  $C_T(i)$  – тариф электроэнергии на  $i$ -м

часе фотопериода;  $i=1, \dots, n$  – номер фрагмента (часа) фотопериода;  $T_{фп}$  – полное время фотопериода.

Результаты оптимизации графика фотопериода облучения растений показаны на рисунке 5а.

Оптимизированные графики показаны на рисунке 5б. Из графиков следует, что доза облучения до оптимизации составляет 92,8 усл. ед., а после оптимизации – 95,5 усл. ед.

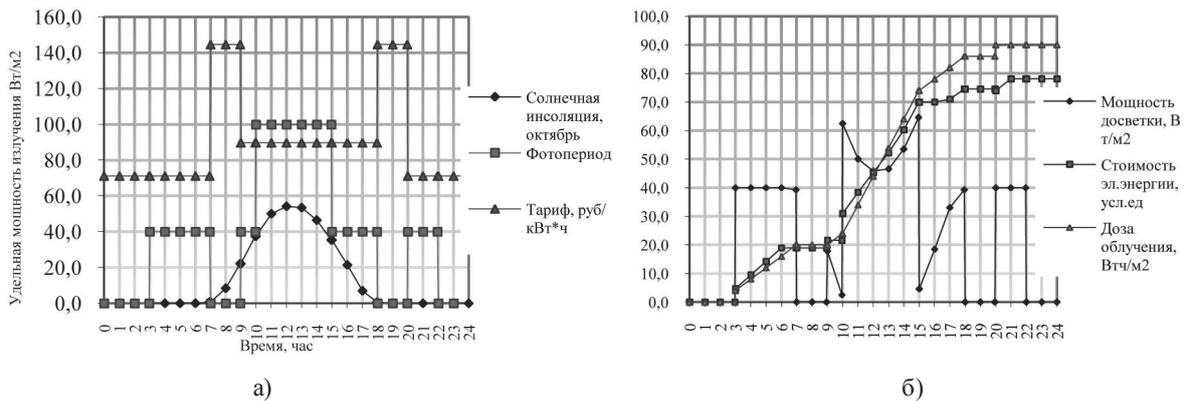


Рис. 5: а) результаты оптимизации графика фотопериода облучения растений; б) оптимизированные расчетные графики

Стоимость затраченной электроэнергии составляет 64,1 усл. ед. до оптимизации и 57,8 усл. ед. после оптимизации. Таким образом, оптимизация сценария облучения растений дает экономию стоимости электроэнергии на 10,9%. При этом получен дополнительный эффект – увеличение суточной дозы облучения на 2,83%.

Фактический расход электроэнергии на досвечивающее облучение с блока определения расхода электроэнергии и показатель производительности (масса наземной части растения, масса и/или площадь листьев, масса плодов) подаются на входы блоков определения  $\epsilon_d$  и  $\epsilon_r$ , рассчитанные значения которых совместно с данными блока определения дозы облучения 7 поступают в блок формирования программы облучения 10 и используются для корректировки параметров циклограммы досветки.

Наиболее простой является корректировка циклограммы по суточной дозе облучения. Как только значение суточной дозы облучения достигнет заданного значения на текущие сутки, блок формирования программы облучения прекращает выполнение программы досветки.

При достижении показателем  $\epsilon_d$  глобального минимума кривая роста проходит через точку перегиба, что соответствует моменту времени около 20-х «условных» суток на рисунке 2. Блок формирования программы облучения производит соответствующую коррекцию интенсивности и спектрального со-

става излучения.

Минимум  $\epsilon_r$  говорит о том, что достигнуто наилучшее соотношение между понесенными затратами электроэнергии и показателем продуктивности. Интегральная энергоёмкость в данном случае может использоваться как объективный индикатор перикарпии, т. е. созревания растения. Целый ряд фруктов и овощей на этом этапе не обязательно должны отвечать оптимальным вкусовым свойствам, но уже могут быть подвергнуты сбору с дозариванием. Для дозаривания неповрежденные плоды помещают в открытые, хорошо проветриваемые ящики, хранилища оборудуют вентиляцией, отоплением и защищают от дневного света. Однако при созревании на растении в плодах происходит не только распад веществ, но и их синтез, и вкусовые качества таких плодов выше, чем дозревших в лежке. Таким образом, фиксируя минимум показателя интегральной энергоёмкости, блок формирования программы облучения может либо выдавать сигнал к сбору урожая с дальнейшим дозариванием, либо продолжить управление облучением с корректировкой параметров облучения.

Момент окончательного созревания плодов может быть определен по энергетическому критерию, когда отношение текущих значений  $\epsilon_d$  и  $\epsilon_r$  к значениям их глобальных минимумов превысит заданное пороговое значение, например, в 50 раз по сравнению со своим минимумом (соответствует прибли-

тельно 86 «условным» суткам на рисунке 2.

#### Список литературы

1. *Солнечная радиация и радиационный баланс* [Текст] / Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – СПб., 2006.

2. *СНиП 2.10.04-85 Теплицы и тепличные комбинаты*. Актуализированная редакция [Текст] / Гипронисельпром. – М.: Стройиздат, 1988.

3. *Торнли Дж. Г.М.* Математические модели в физиологии растений [Текст] / Дж. Г. М. Торнли. – Киев, Наукова думка, 1982.

4. *Яковлев С.М.* Инновационному развитию агропромышленного комплекса – научное обеспечение [Текст] / С.М. Яковлев, И.И. Каримов. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2012. – Часть II. – С. 22–25.

#### References

1. *Solnechnaja radiacija i radiacionnyj balans* [Tekst] / Federal'naja sluzhba Rossii po gidrometeorologii i monitoringu okruzhajushhej sredy. – SPb., 2006.

2. *SNiP 2.10.04-85 Teplicy i teplichnye kombinaty*. Aktualizirovannaja redakcija [Tekst] / Gipronisel'prom. – M.: Strojizdat, 1988.

3. *Tornli Dzh. G.M.* Matematicheskie modeli v fiziologii rastenij. [Tekst] / Dzh. G.M. Tornli. – Kiev, Naukova dumka, 1982.

4. *Jakovlev S.M.* Innovacionnomu razvitiju agropromyshlennogo kompleksa – nauchnoe obespechenie [Tekst] / S.M. Jakovlev, I.I. Karimov. – Ufa: Bashkirskij GAU, 2012. – Chast' II. – S. 22–25.



**Марченко А.А.**

**Marchenko A.A.**

старший преподаватель кафедры  
«Радиооборудование и электрооборудование судов» ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ»,  
Россия, г. Петропавловск-Камчатский

УДК 621.313

## ИСПЫТАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОД НОМИНАЛЬНЫМ ТОКОМ В РЕЖИМЕ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЯ И Понижения ЧАСТОТЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Автором статьи предлагается введение процесса испытаний асинхронных двигателей под искусственной нагрузкой, так как используемый в настоящее время упрощенный регламент испытаний электрических машин после ремонта напрямую влияет на качество проверки такой машины. Изменение частоты питающего напряжения электродвигателя приводит к созданию момента на валу машины. Среднее значение момента и тока на валу электродвигателя является эквивалентом механической нагрузки на валу. Так как перечисленные процессы являются кратковременными, то необходимым требованием является циклическое введение возмущений и изменение параметров. Одним из вариантов изменения момента на валу является процесс противовключения. Основным недостатком данного метода являются резкие изменения момента, что может привести к аварийным режимам электродвигателя. Для уменьшения нагрузки подшипникового узла используется противовключение в совокупности с уменьшением частоты питающего напряжения.

В статье представлены результаты моделирования процесса нагружения электродвигателя 4A80A4 методом противовключения. Несмотря на простоту реализации данного способа нагружения, представленные автором результаты наглядно демонстрируют наличие критических моментов и токов двигателя. Результаты экспериментов нагружения электродвигателя противовключением с уменьшением частоты

позволяют сделать вывод об оптимальных значениях момента и тока, соответствующих нормальной работе электродвигателя. Также применение такого метода позволяет обеспечить работу электродвигателя во всех четырех квадрантах его механической характеристики.

Также в рамках исследования были определены параметры питающего напряжения, соответствующие получению номинального тока и момента электродвигателя. Наилучшие результаты испытаний асинхронного двигателя при помощи разработанной модели получены в диапазоне от 21–25 Гц.

В ходе исследований было выявлено, что эффективным решением при схемотехнической реализации является решение с применением метода изменения чередования фаз при помощи полупроводниковых ключей и понижением частоты питающего напряжения асинхронного двигателя при помощи обратимого преобразователя частоты.

*Ключевые слова:* асинхронный двигатель, динамическое нагружение, режим противовключения, электрический ток, механическая мощность, момент, коммутация, частота сети.

## TEST OF THE ASYNCHRONOUS ENGINE UNDER RATED CURRENT IN THE ANTIINCLUSION AND FALL OF FREQUENCY OF TENSION MODE

The author of article offers introduction of process of tests of asynchronous engines with artificial loading as the now in use simplified regulations of tests of electrical machines after repair directly influence quality of check of such machine. Change of frequency of the feeding tension of the electric motor leads to creation of the moment on a machine shaft. Average value of the moment and current on a shaft of the electric motor is an equivalent of mechanical loading on a shaft. As the listed processes are short-term, the necessary requirement is cyclic introduction of indignations and change of parameters. One of options of change of the moment on a shaft is antiinclusion process. The basic shortcoming of this method is sharp changes of the moment that can lead to emergency operation of the electric motor. For reduction of loading of bearing knot antiinclusion in total with reduction of frequency of the feeding tension is used.

Results of modeling of process of loading of the electric motor 4A80A4 by method are presented in article. The results presented by the author clearly demonstrate existence of the critical moments and currents of the engine despite simplicity of realization of a way of loading. Results of experiments of loading of the electric motor antiinclusion with reduction of frequency allow to draw a conclusion on optimum values of the moment and current, corresponding to normal operation of the electric motor. Also application of such method allows to ensure functioning of the electric motor in all four quadrants of its mechanical characteristic. Also within research the parameters of the feeding tension corresponding to receiving rated current and the moment of the electric motor were determined. The best results of tests of the asynchronous engine by means of the developed model are received in the range from 21–25 Hz.

During researches it was revealed that the effective decision at circuitry realization is the decision about application of a method of change of alternation of phases by means of semiconductor keys and reduction in the frequency of the feeding tension of the asynchronous engine by means of the reversible converter of frequency.

*Key words:* asynchronous engine, dynamic loading, antiinclusion mode, electric current, mechanical power, moment, switching, network frequency.

Сегодня судоремонтные предприятия Дальнего Востока выполняют ремонт и испытания электрооборудования по упрощенному регламенту. Реальные приемо-сдаточные испытания, которым подвергаются отремонтированные АД при их поточном ремонте как в условиях специализированных ремонтных предприятий и цехов, так и в условиях вспомогательных подразделений, как правило, состоят из трех пунктов:

- измерение сопротивления обмоток;
- испытание изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками;
- обкатка двигателя на холостом ходу [1].

Причем обкатка производится в незначительный промежуток времени и лишь для того, чтобы убедиться, что ток холостого хода находится на приемлемом уровне и в работе АД нет явных дефектов (заклинивание подшипников, цепляние ротора о пакет статора и т. п.).

Это, с одной стороны, связано с упрощением состава оборудования испытательных станций, а с другой стороны, снижает качество ремонта ЭД, так как такой регламент зачастую не в состоянии выделить дефекты, проявляющиеся только при эксплуатации.

После завершения ремонта предприятие гаран-

тирует безаварийную работу. В случае повторной неисправности гарантийное обслуживание возможно после завершения рейса. Выход из строя ответственного электропривода может привести к существенному ухудшению результатов рейса, а иногда и невозможности дальнейшего продолжения промысла. Судовладельцы напрямую заинтересованы в улучшении качества ремонта электрооборудования и требуют его выполнения от предприятий. Нередки случаи, когда испытания по длительности превышают общепринятые в несколько раз. Все это указывает на необходимость модернизации процесса испытаний электрооборудования, в частности, испытаний электрических машин.

Анализ причин выхода из строя электрооборудования подтверждает низкую надежность статорной обмотки (63,2% от общего числа отказов). Одним из необходимых этапов является проверка статорных обмоток под номинальным током. Существующие системы испытаний и нагружения электрических машин, как правило, включают нагрузочные агрегаты и комплексы со взаимной нагрузкой, предусматривающей механическое агрегирование электродвигателей со вспомогательными нагрузочными машинами. Сложность осуществления операции агрегирования, отсутствие стендового оборудования, пригодного для электрических машин разной мощности, делает перспективной разработку

станций испытания, обеспечивающих разнообразные нагрузочные режимы в схемах, исключая механическое соединение вала испытуемой машины с нагрузочными агрегатами.

В данной статье приводятся результаты испытаний модели электродвигателя в динамическом режиме. Первой задачей являлось определение параметров схемы замещения электродвигателя.

Наиболее распространенные математические модели АД, основанные на записи системы уравнений Горева – Парка [2], не учитывают потери в стали, насыщение магнитной системы, вытеснение тока в стержнях ротора. Использование такого типа математических моделей АД приводит к заметным различиям расчетных динамических и статических характеристик АД от реальных. Так, для АД серии 4А потери в стали от вихревых токов и гистерезиса составляют до 20% суммарных номинальных потерь и до 50% от полных потерь холостого хода.

Адекватность идентифицированных параметров схемы замещения действительным параметрам АД проверялась сравнением с приведенными каталожными данными схем замещения. Так, в таблице 1 приведено сравнение каталожных и рассчитанных значений параметров схемы замещения:

4А80А4 с паспортными данными:  $3 \times 220$  В,  $\eta_n = 0,75$ ,  $\cos \varphi_n = 0,81$ ,  $I_{1n} = 2,74$  А,  $P_{2n} = 1,1$  кВт,  $\omega_n = 146,5$  рад/с.

Таблица 1

Параметры СЗ для АД типа 4А80А4

Параметр СЗ	Каталожное значение параметров СЗ АД, Ом	Идентифицированное значение параметров СЗ АД, Ом
	4А80А4	4А80А4
$R_1$	9,22	8,2
$R'_1$	5,10	5,9
$X_1$	6,0	6,6
$X'_1$	8,83	8,4
$X_m$	136	155

Одним из самых простых в своей реализации является режим динамического нагружения, сочетающий двигательный режим электрической машины с режимом противовключения.

В режиме противовключения машина потребляет также механическую мощность с ротора, поскольку внешний вращающий момент действует в сторону вращения ротора. Как мощность, потребляемая из сети, так и мощность, потребляемая с вала, расходуются на потери на машине. Поэтому полезной мощности машина не развивает, а в отношении

нагрева рассматриваемый режим является тяжелым.

На основании изложенного на рисунке 1 представлена векторная диаграмма асинхронной машины в режиме противовключения.

По сравнению с двигательным и генераторным режимами работы в режиме противовключения сопротивление  $r_2/s$  мало. Поэтому на основании равенства  $\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{r_2/s + jx_{\sigma 2}}$  можно заключить, что ток  $I_2$  и угол  $\psi_2 = \angle(\dot{E}_2, \dot{I}_2)$  велики. Соответственно этому

первичный ток  $I_1$  и угол сдвига фаз  $\varphi_1 = \angle(U_1, I_1)$  тоже велики. Это также указывает на опасность режима в тепловом отношении. Поэтому при  $U_1 = U_{1н}$  рассматриваемый режим допускается лишь кратковременно [3].

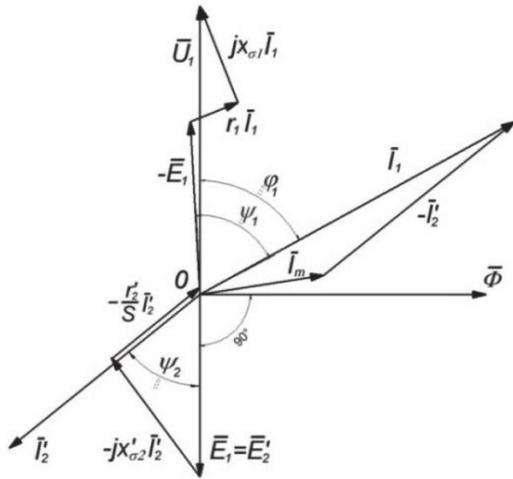


Рис. 1. Векторная диаграмма АД в режиме противовключения

Преобразование реактивной мощности в режиме противовключения происходит так же, как и в двигательном. На рисунке 2 представлена механическая характеристика электродвигателя в режиме торможения противовключением.

Электродвигатель работает на своей механической характеристике, его номинальному моменту соответствует точка *b*. Далее путем изменения чередования фаз двигатель переводится в режим противовключения, этому моменту соответствует точка *c* на обратной механической характеристике, на отрезке *cd* происходит торможение. После окончания тормозного режима двигатель переходит в точку *a* характеристики *b* и начинает разгон до точки *b*. В условиях постоянного динамического нагружения данный цикл повторяется снова.

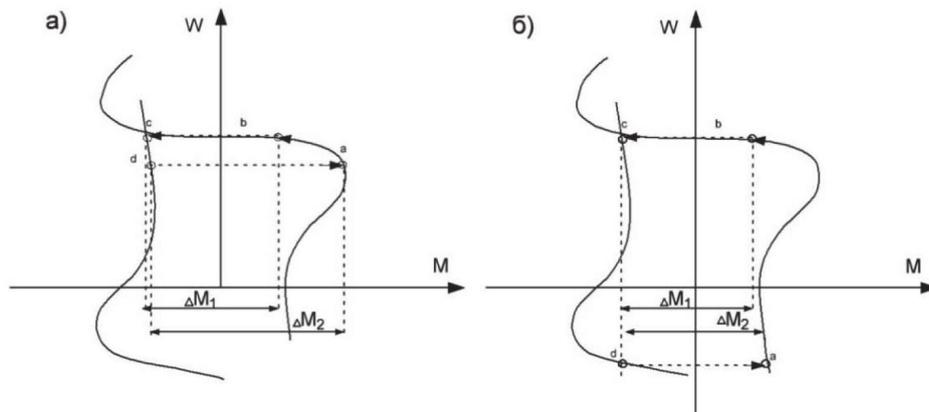


Рис. 2. Механическая характеристика электродвигателя в режиме динамического торможения противовключением: а) при работе в первом и втором квадрантах; б) при работе во всех квадрантах

Данный способ, несмотря на простую реализацию, имеет существенные недостатки, главный из которых это большие скачки изменения моментов при переводе из двигательного режима в режим противовключения и обратно, им соответствуют моменты  $\Delta M_1$  и  $\Delta M_2$ .

Более наглядно это изображено на рисунке 3. Здесь представлена зависимость момента электродвигателя от времени, полученная на модели трехфазного АД с КЗ с номинальным моментом  $7,5 N \times m$ .

На участке от 0 до 0,15 с происходил пуск и разгон АД. Перевод электродвигателя в режим противовключения осуществлялся в момент времени 0,15 с. Аналогичная ситуация с пусковыми токами электродвигателя. Для реализации режима нагружения необходимо обеспечить работу электродвигателя под

номинальным током и обеспечить номинальный момент на валу. Для этих целей реверс до номинальной обратной скорости машины является неприемлемым.

Значительное увеличение времени протекания режима динамического нагружения можно получить, если допустить работу АД в третьем квадранте механической характеристики, как это показано на рисунке 2б.

На рисунке 4 представлен график скорости электродвигателя. В режиме противовключения к времени окончания протекания динамического режима скорость АД достигает 160 рад/с при обратном направлении вращения ротора.

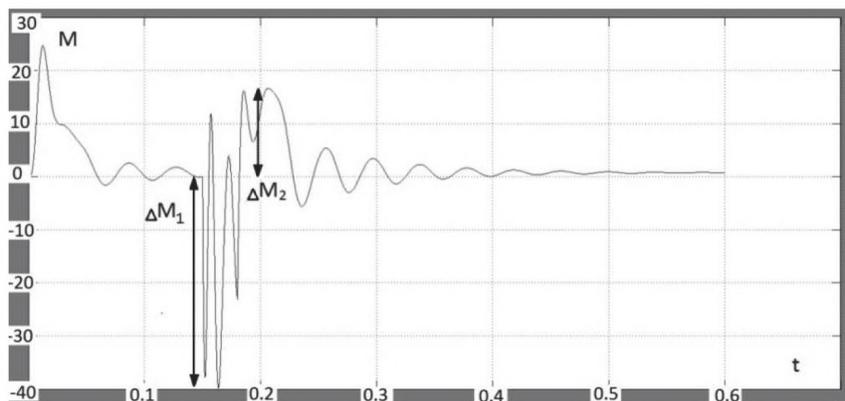


Рис. 3. Зависимость момента электродвигателя от времени

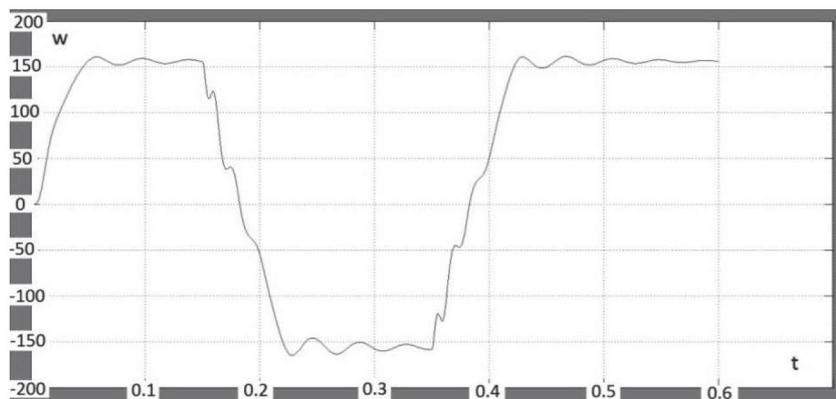


Рис. 4. Скорость электродвигателя

На рисунке 5 также виден резкий скачок момента более максимального. То же происходит в момент

времени 0,35 с при повторном включении АД в прямом направлении вращения.

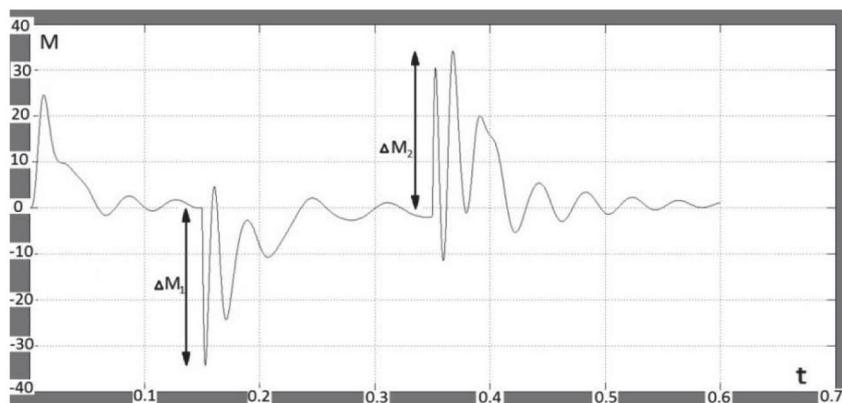


Рис. 5. Зависимость момента электродвигателя от времени в режиме противовключения

Одним из направлений исследования является нахождение оптимальных параметров протекания динамического режима АД, при которых значения  $\Delta M_1$  и  $\Delta M_2$  не превышают значения  $M_{\text{макс}}$ .

Одним из возможных решений является нагружение АД в режиме противовключения и изменения частоты. Из рисунка 2а следует, что существенное снижение  $\Delta M_1$  и  $\Delta M_2$  наблюдается при ограничении

работы АД в первом и втором квадранте механической характеристики и недопущении реверса.

На рисунке 6 механические характеристики  $f'_2$  и  $2f'_{\text{пр}}$  соответствуют работе АД при пониженной частоте сети. Так как в реальной системе значение напряжения изменяется не пропорционально частоте, то фактически АД работает вместо  $f'_2$  и  $2f'_{\text{пр}}$  на характеристиках  $f_2$  и  $2f_{\text{пр}}$  соответственно.

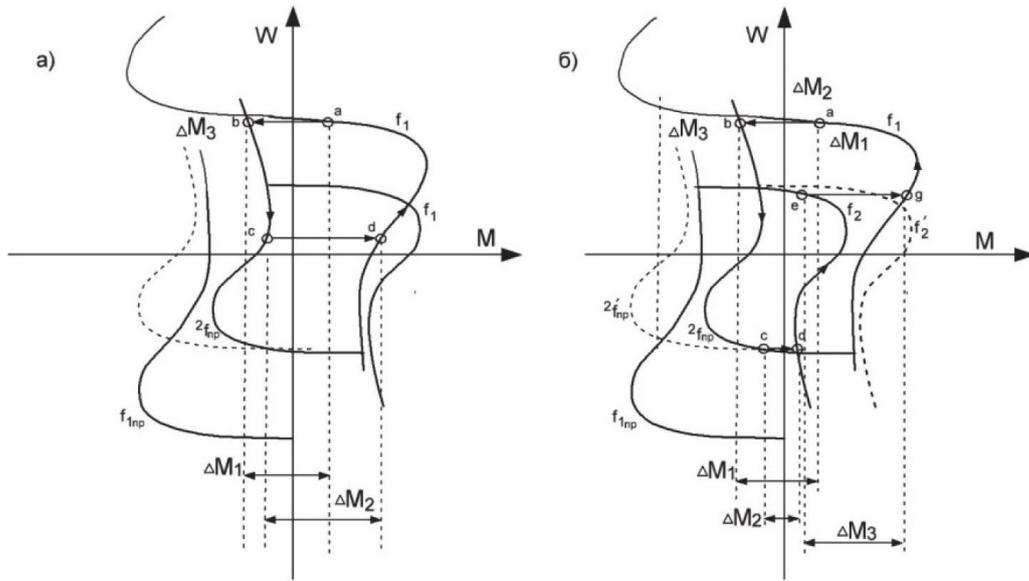


Рис. 6. Механическая характеристика электродвигателя в режиме динамического нагружения противовключением и изменением частоты

Существенное увеличение времени протекания цикла нагружения [4] становится возможным при работе во всех квадрантах механической характеристики, как показано на рисунке 6б. Вращению АД на холостом ходу соответствует точка *a* механической характеристики *f1*, соответствующей частоте сети 50 Гц. После достижения номинальной частоты вращения АД переводится в режим противовключения в точку *b* характеристики *f2<sub>np</sub>*, соответствующей пониженной частоте. Вследствие этого наблюдается снижение  $\Delta M_1$ . К достижению точки *c* характеристики *f2<sub>np</sub>* АД вращается в противоположном направлении вращения. Обратному переходу АД в ре-

жим прямого направления вращения соответствует момент  $\Delta M_2$ . Его уменьшению также способствует переход из точки *c* механической характеристики *f2<sub>np</sub>* в точку *d* механической характеристики *f2*, соответствующей пониженной частоте. Разгон АД до номинальной скорости может проходить только на естественной механической характеристике, поэтому после достижения точки *e* характеристики *f2* происходит изменение частоты напряжения сети до номинальной и переход работы АД в точку *g*. Переход сопровождается небольшим увеличением момента  $\Delta M_3$ . Результаты моделирования представлены на рисунке 7.

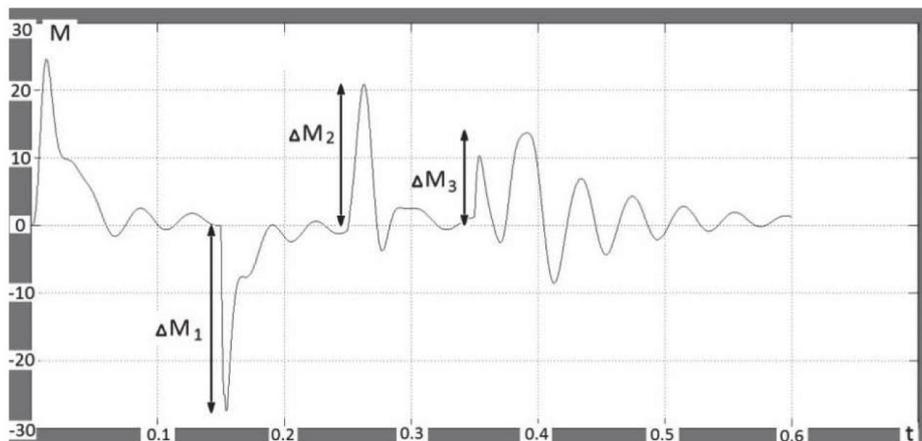


Рис. 7. Зависимость момента электродвигателя от времени в режиме противовключения и изменения частоты

Скорость вращения электродвигателя соответствует механической характеристике на рисунке 6б. При переходе с характеристики  $f1$  на  $f2_{пр}$  и достижении точки с этой характеристики скорости вращения соответствует  $w_1$ . При прямом включении двигателя и его работе на  $f2$  скорость достигает значения  $w_2$ . После перевода двигателя на естественную характеристику  $f1$  он развивает номинальную скорость  $w_3$

$w_{ном}$ . В рамках эксперимента для данного типа электродвигателя была выявлена оптимальная частота напряжения сети для ограничения момента электродвигателя в рамках максимального  $M_{макс}$ . Наилучшие результаты испытаний асинхронного двигателя при помощи разработанной модели получены в диапазоне 21–25 Гц.

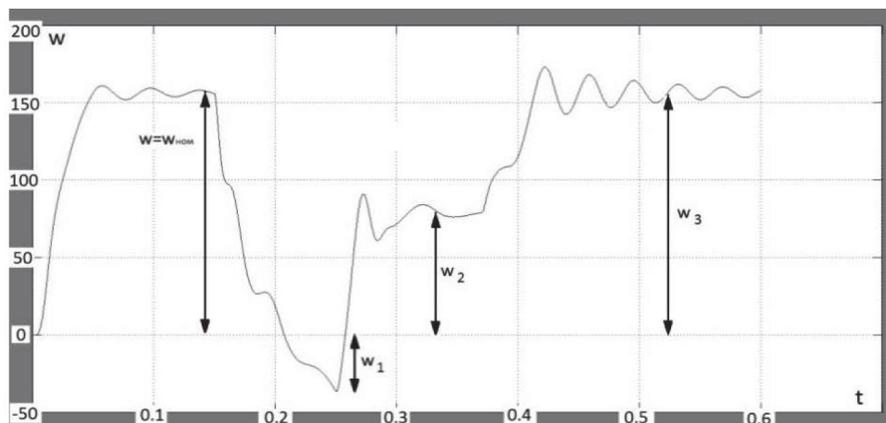


Рис. 8. Изменение скорости АД в режиме противовключения и изменения частоты

Основной целью испытаний является проверка статорных обмоток электродвигателя под номинальным током.

В ходе исследований было выявлено, что при испытаниях методом противовключения с изменением частоты сети в заданных пределах среднее

значение силы тока равно 2,6 А, что соизмеримо с номинальным значением для электродвигателя 4А80А4 (табл.1). На рисунке 9 представлена зависимость силы тока по времени протекания одного цикла нагружения противовключения с изменением частоты.

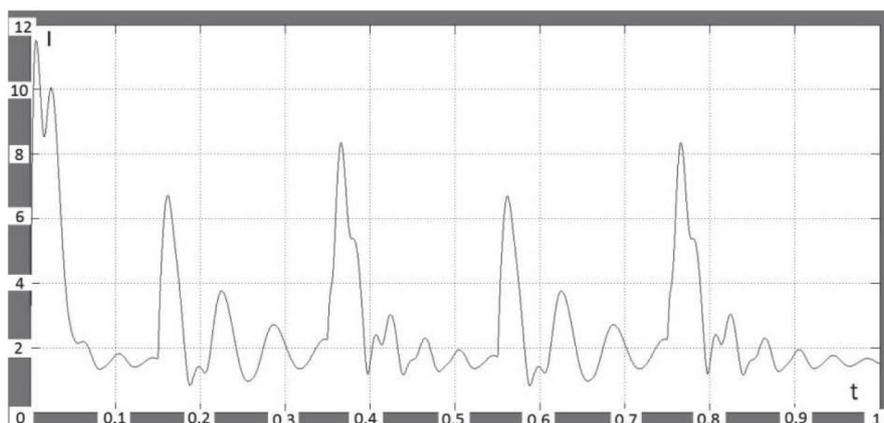


Рис. 9. Зависимость силы тока по времени

Видно, что переход с одной механической характеристики на другую сопровождается броском тока, но его значение не превышает пускового тока испытуемого электродвигателя.

Для получения значения тока статорной обмотки двигателя, соизмеримого с номинальным значе-

нием при нагружении в режиме противовключения, необходимо получение значений на длительном промежутке времени, что может быть достигнуто при циклическом изменении направления вращения АД, а также при увеличении частоты сети и ее уменьшении [5]. При получении среднего значения

силы тока на длительном промежутке времени необходимым условием является плавное прохождение переходных процессов также при увеличении частоты питающего напряжения.

Эффективным решением при схемотехнической реализации является решение с применением метода изменения чередования фаз при помощи полупроводниковых ключей и понижением частоты питающего напряжения асинхронного двигателя при помощи обратимого преобразователя частоты.

*Список литературы*

1. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин [Текст] / Г.К. Жерве. – 4-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – С. 351–354.
2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие [Текст] / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – С. 233–239.
3. Вольдек А.И. Электрические машины: учеб. для высш. техн. заведений [Текст] / А.И. Вольдек. – 3-е изд. – Л.: Энергия, 1978. – С. 510–514.
4. Марченко А.А. Моделирование процесса динамического нагружения асинхронного электродвигателя [Текст] / А.А. Марченко, Н.Н. Портнягин // Соврем. проблемы науки и образования. – Пенза,

2012. – № 6. – С. 125–125.

5. Марченко А.А. Исследование процесса динамического нагружения асинхронного электродвигателя [Текст] / А.А. Марченко, Н.Н. Портнягин // Фундам. исслед. – 2013. – № 1–2. – С. 408–412.

*References*

1. Zherve G.K. Promyshlennye ispytaniya jelektricheskikh mashin [Tekst] / G.K. Zherve. – 4-e izd. – L.: Jenergoatomizdat, 1984. – S. 351–354.
2. German-Galkin S.G. Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyyh sistem v MATLAB 6.0: Uchebnoe posobie [Tekst] / S.G. German-Galkin. – SPb.: KORONA print, 2001. – S. 233–239.
3. Vol'dek A.I. Jelektricheskie mashiny: ucheb. dlja vyssh. tehn. zavedenij [Tekst] / A.I. Vol'dek. – 3-e izd. – L.: Jenergija, 1978. – S. 510–514.
4. Marchenko A.A. Modelirovanie procesa dinamicheskogo nagruzhenija asinhronnogo jelektrodvigatelja [Tekst] / A.A. Marchenko, N.N. Portnjagin // Sovrem. problemy nauki i obrazovanija. – Penza, 2012. – № 6. – S. 125–125.
5. Marchenko A.A. Issledovanie procesa dinamicheskogo nagruzhenija asinhronnogo jelektrodvigatelja [Tekst] / A.A. Marchenko, N.N. Portnjagin // Fundam. issled. – 2013. – № 1–2. – S. 408–412.



**Tatevosyan A.A.**  
**Tatevosyan A.A.**

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



**Osinina E.V.**  
**Osinina E.V.**

инженер-программист  
ОАО НПП «Эталон»,  
Россия, г. Омск

УДК 621.313.17

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНОГО  
МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ  
ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРОВ**

Расчет характеристик, определяющих релаксационные свойства эластомеров, сопровождается трудоемкостью вычислений, требует использования громоздкого математического аппарата и проводится с

привлечением конечно-разностных и проекционно-сеточных методов. В связи с этим на практике отдается предпочтение экспериментальным методам исследования эластомеров. Центральное место в решении этой задачи занимают работы по созданию надежных экспериментальных технических комплексов, обеспечивающих управление силовой нагрузкой, действующей на опытный образец эластомера, не только при статических, но и динамических измерениях реологических характеристик, включая измерения по силе и по деформации, отличающиеся точностью полученных результатов и требуемым диапазоном измерений стандарта испытаний. В статье изложены принципы построения математической модели линейного магнитоэлектрического привода для испытания вязкоупругих свойств эластомеров, описывающей взаимосвязь физических процессов в отдельных подсистемах привода, предложена базовая конструкция магнитной системы, а также определены ее геометрические параметры, удовлетворяющие требованию оптимальности по обеспечению максимума прижимного усилия на опытный образец эластомера при минимуме массы активных материалов. С использованием метода конечных элементов в прикладном программном обеспечении проведен анализ предложенной магнитной системы и на основе полученных результатов разработан экспериментальный макетный образец линейного магнитоэлектрического двигателя, предназначенного для испытания вязкоупругих свойств эластомеров; рассмотрено решение задачи математического моделирования линейного магнитоэлектрического привода с учетом динамических процессов при заданных режимах нагружения. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния опытного образца эластомера для учета его вязкоупругих свойств при статических и динамических испытаниях выполнено с использованием схемы замещения, параметры которой определяются экспериментально при фиксированном значении деформации и заданной температуре испытаний. Разработаны алгоритмическое и программное обеспечения для решения задачи оптимизации магнитной системы линейного магнитоэлектрического двигателя, расчета параметров схемы замещения опытных образцов эластомеров при заданной деформации и температуре испытаний, исследования динамических характеристик привода.

*Ключевые слова:* магнитоэлектрический двигатель, магнитная система, электромагнитное поле, схема замещения, эластомер, реологические характеристики, оптимизация.

## **STUDY DYNAMIC CHARACTERISTICS LINEAR MAGNETOELECTRIC DRIVE FOR RESEARCH VISCOELASTIC PROPERTIES ELASTOMERS**

Calculation of the characteristics that determine the relaxation properties of elastomers, accompanied by laborious calculations require the use of cumbersome mathematical apparatus and conducted using the finite-difference and projection-grid methods. Therefore, in practice, experimental research methods preferred elastomers. A central place in this task took the work to establish reliable experimental technical systems management support power loads acting on the prototype elastomer, not only for static and dynamic rheology measurements, including measuring the strength and deformation of differing accuracy of the results obtained and the required measuring range of standard tests. The article outlines the principles of the mathematical model of a linear magnetoelectric drive for testing the viscoelastic properties of elastomers, which describes the relationship of the physical processes in the individual subsystems drive offered the basic design of the magnetic system, as well as defining its geometric parameters satisfying the requirement of optimality to ensure maximum downforce on the prototype of the elastomer at minimum mass of active materials, using the finite element method in the application software analyzes the proposed magnetic system and based on the results, a pilot model sample linear magnetoelectric engine designed to test the viscoelastic properties of elastomers, consider the solution of the problem of mathematical modeling of linear magnetoelectric drive with the dynamic processes for the given loading conditions. Mathematical modeling of the stress-strain state of a prototype of the elastomer to account for its viscoelastic properties under static and dynamic tests are performed using the equivalent circuit parameters are determined experimentally for a fixed value of the deformation and the specified test temperature. Developed algorithms and software for solving the optimization problem of the magnetic system of linear magnetoelectric motor calculate equivalent circuit parameters prototypes elastomers for a given strain and temperature tests, the study of dynamic characteristics of the drive.

*Key words:* magneto motor, magnetic system, electromagnetic field, equivalent circuit, elastomer, rheological characteristics, optimization.

Общая математическая модель линейного магнитоэлектрического привода (ЛМЭП) для испытания вязкоупругих свойств эластомеров включает в свой состав уравнения, описывающие процессы различной физической природы, протекающие при определенных условиях (например, температурный режим испытаний) в отдельных подсистемах привода, к числу которых можно отнести источник питания, электрический преобразователь тока, магнитоэлектрический двигатель, опытный образец эластомера.

Источник питания и система управления ЛМЭП обеспечивают заданный закон изменения тока в обмотке двигателя:

$$i_{ист} = I_0 + I_m \sin(\omega t). \quad (1)$$

Развиваемое линейным магнитоэлектрическим двигателем прижимное электромагнитное усилие и противо-ЭДС в обмотке двигателя не зависят от хода якоря и определяются из выражений

$$F_{ЭМ}(t) = C_M i; e(t) = C_e \dot{\varphi}, \quad (2)$$

где  $C_M, C_e$  – постоянные, определяемые численным расчетом магнитного поля ЛМЭП.

В связи с тем, что обмотка магнитоэлектрического двигателя представляет собой большое количество параллельно включенных секций, в математической модели принимается допущение о том, что индуктивность обмотки двигателя является постоянной величиной.

Среди характеристик эластомеров, определяющих качество продукции, – модули вязкости, упругости и внутреннего трения, обуславливающие гистерезис и тангенс угла механических потерь. Эти параметры в значительной степени отражают релаксационные свойства эластомеров при механических деформациях и прессовых воздействиях, и их определение относится к числу первоочередных экспертных задач [1, 2, 3].

Учет вязкоупругих свойств нагрузки в модели ЛМЭП осуществляется на основе синтеза многоконтурной схемы замещения напряженно деформированного состояния опытного образца эластомера, снятого по опыту релаксации напряжения при заданной деформации [4]. Параметры схемы замещения для опытных образцов эластомеров П-550 и П-234 приведены в табл.1. В табл. 2 приведены значения параметров схемы замещения для опытного образца эластомера П-550 для различных значений относительной деформации, однако в математической модели целесообразным является применение усредненных параметров схемы замещения (табл. 3).

Учет вязкоупругих свойств нагрузки в модели ЛМЭП осуществляется на основе синтеза многоконтурной схемы замещения напряженно деформированного состояния опытного образца эластомера, снятого по опыту релаксации напряжения при заданной деформации [4]. Параметры схемы замещения для опытных образцов эластомеров П-550 и П-234 приведены в табл.1. В табл. 2 приведены значения параметров схемы замещения для опытного образца эластомера П-550 для различных значений относительной деформации, однако в математической модели целесообразным является применение усредненных параметров схемы замещения (табл. 3).

Таблица 1

**Параметры многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера с различным наполнителем технического углерода П-550 и П-234**

Техуглерод П-550			Техуглерод П-234		
$\tau_i, 1/c$	$C_i, \Phi$	$R_i, \text{Ом}$	$\tau_i, 1/c$	$C_i, \Phi$	$R_i, \text{Ом}$
3.541	$2.154 \cdot 10^{-8}$	$1.644 \cdot 10^8$	0.919	$6.312 \cdot 10^{-9}$	$1.457 \cdot 10^8$
433.779	$1.581 \cdot 10^{-6}$	$2.742 \cdot 10^8$	120.991	$1.135 \cdot 10^{-6}$	$1.066 \cdot 10^8$
15.683	$3.27 \cdot 10^{-7}$	$4.796 \cdot 10^7$	4.872	$1.108 \cdot 10^{-7}$	$4.398 \cdot 10^7$
$2.464 \cdot 10^3$	$6.11 \cdot 10^{-6}$	$4.034 \cdot 10^8$	$1.350 \cdot 10^3$	$7.597 \cdot 10^{-6}$	$1.778 \cdot 10^8$
0.744	$3.129 \cdot 10^{-8}$	$2.379 \cdot 10^7$	0.158	$1.305 \cdot 10^{-8}$	$1.211 \cdot 10^7$
$2.019 \cdot 10^5$	$3.741 \cdot 10^{-3}$	$5.399 \cdot 10^7$	$1.388 \cdot 10^5$	$2.472 \cdot 10^{-3}$	$5.616 \cdot 10^7$

**Параметры многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера при различной величине относительной деформации**

$\varepsilon = 0.08$		$\varepsilon = 0.1$		$\varepsilon = 0.15$	
$C_i, \Phi$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \Phi$	$R_i, \text{Ом}$	$C_i, \Phi$	$R_i, \text{Ом}$
$3.697 \cdot 10^{-8}$	$1.740 \cdot 10^8$	$1.052 \cdot 10^{-8}$	$1.813 \cdot 10^8$	$1.713 \cdot 10^{-8}$	$1.383 \cdot 10^8$
$9.219 \cdot 10^{-7}$	$1.598 \cdot 10^8$	$9.169 \cdot 10^{-7}$	$4.339 \cdot 10^8$	$2.905 \cdot 10^{-6}$	$2.290 \cdot 10^8$
$2.152 \cdot 10^{-7}$	$4.648 \cdot 10^7$	$2.234 \cdot 10^{-7}$	$6.585 \cdot 10^7$	$5.436 \cdot 10^{-7}$	$3.154 \cdot 10^7$
$6.701 \cdot 10^{-6}$	$2.088 \cdot 10^8$	$3.583 \cdot 10^{-6}$	$4.182 \cdot 10^8$	$8.052 \cdot 10^{-6}$	$5.834 \cdot 10^8$
$3.299 \cdot 10^{-8}$	$2.130 \cdot 10^7$	$2.305 \cdot 10^{-8}$	$2.359 \cdot 10^7$	$3.783 \cdot 10^{-8}$	$1.866 \cdot 10^7$
$4.463 \cdot 10^{-3}$	$5.005 \cdot 10^7$	$4.134 \cdot 10^{-3}$	$6.043 \cdot 10^7$	$2.630 \cdot 10^{-3}$	$5.151 \cdot 10^7$

Таблица 3

**Усредненные значения параметров многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера с наполнителем технического углерода П-550**

Техуглерод П-550		
$\tau_i, 1/\text{с}$	$C_i, \Phi$	$R_i, \text{Ом}$
3.541	$2.154 \cdot 10^{-8}$	$1.644 \cdot 10^8$
433.779	$1.581 \cdot 10^{-6}$	$2.742 \cdot 10^8$
15.683	$3.27 \cdot 10^{-7}$	$4.796 \cdot 10^7$
$2.464 \cdot 10^3$	$6.11 \cdot 10^{-6}$	$4.034 \cdot 10^8$
0.744	$3.129 \cdot 10^{-8}$	$2.379 \cdot 10^7$
$2.019 \cdot 10^5$	$3.741 \cdot 10^{-3}$	$5.399 \cdot 10^7$

С учетом принятых допущений математическая модель ЛМЭП включает в себя:

– уравнение электрического состояния обмотки линейного магнитоэлектрического двигателя

$$i_{\text{ист}} R_{\text{обм}} + L_s \frac{di_{\text{ист}}}{dt} + C_e \vartheta = u_{\text{ист}}; \quad (3)$$

– уравнения, описывающие напряженно-деформированное состояние опытного образца эластомера, составленные для его синтезированной многоконтурной схемы замещения с использова-

нием уравнений Кирхгофа (для упрощения записи уравнений воспользуемся обозначениями, принятыми действующим стандартом для электрических схем, учитывая формальную аналогию при замене параметров электрической цепи с сопротивлениями  $R_0, R_1, \dots, R_n$  на инверсные модули упругости  $E_0^{-1}, E_1^{-1}, \dots, E_n^{-1}$ , с емкостями  $C_0, C_1, \dots, C_n$  на коэффициенты вязкого течения  $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n$ , с токами  $i_k$  и напряжениями на участках цепи  $u_{Rk}$  и  $u_{Ck}$  соответственно на механические напряжения  $\sigma_k$ , упругие  $\varepsilon_{yk}$  и вязкие относительные деформации  $\varepsilon_{BK}$ .

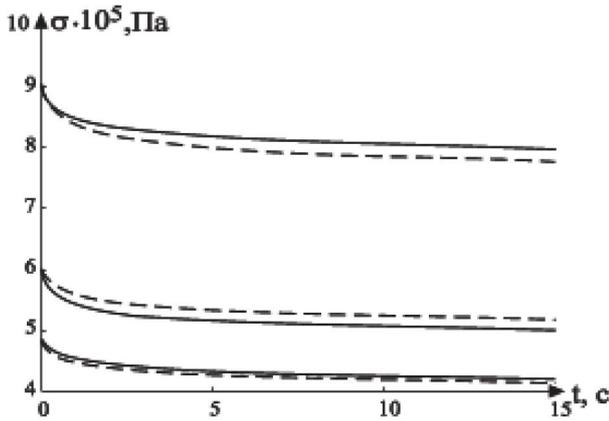


Рис. 1. Процесс релаксации механического напряжения испытываемого образца при заданном значении относительной деформации: 1 –  $\epsilon = 0,08$  ; 2 –  $\epsilon = 0,1$ ; 3 –  $\epsilon = 0,15$

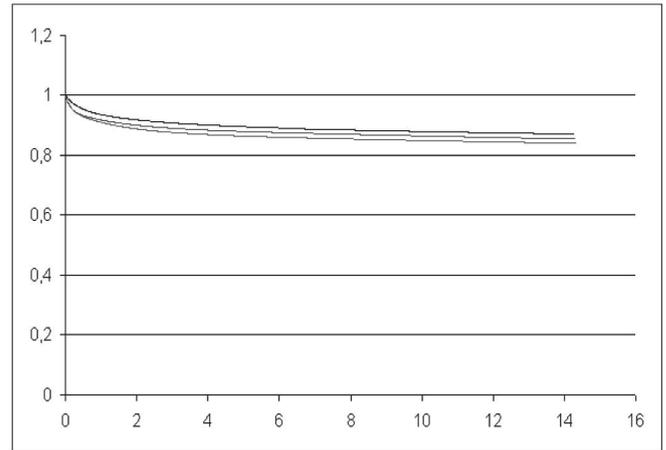


Рис. 2. Процесс релаксации механического напряжения испытываемого образца, построенный в относительных единицах: 1 –  $\epsilon = 0,08$ ; 2 –  $\epsilon = 0,1$ ; 3 –  $\epsilon = 0,15$

с напряжением  $u$  и током  $i$  на входе электрической цепи соответственно на полные деформацию  $\epsilon$  и механическое напряжение  $\sigma$ ):

$$\begin{aligned} \frac{du_{c0}}{dt} &= \frac{1}{C_0} \left( \frac{u - u_{c0}}{R_0} - \frac{u_{c0} - u_{c1}}{R_1} - \dots - \frac{u_{c0} - u_{cn}}{R_n} \right), \\ \frac{du_{c1}}{dt} &= \frac{1}{C_1 R_1} (u_{c0} - u_{c1}), \\ \frac{du_{c2}}{dt} &= \frac{1}{C_2 R_2} (u_{c0} - u_{c2}), \\ &\dots \dots \dots \\ \frac{du_{cn}}{dt} &= \frac{1}{C_n R_n} (u_{c0} - u_{cn}); \end{aligned} \quad (4)$$

– уравнения движения якоря:

$$\begin{aligned} \frac{d\vartheta}{dt} &= \frac{1}{m} (C_M i_{ист} - \sigma S - mg) \\ \frac{dx}{dt} &= \vartheta, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения опытного образца эластомера;  $m$  – масса якоря;  $x$  – ход якоря;

– уравнения связи между токами (механические напряжения) и напряжениями (деформациями) на участках многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера:

$$i = \frac{u - u_{c0}}{R_0}, \quad i_1 = \frac{u_{c0} - u_{c1}}{R_1}, \dots, \quad i_n = \frac{u_{c0} - u_{cn}}{R_n}, \quad (6)$$

$$i_0 = i - i_1 - \dots - i_n$$

и, соответственно, между ходом якоря и полной относительной деформацией  $\epsilon$ :

$$x = \epsilon \ell_0, \quad (7)$$

где  $\ell_0$  – высота опытного образца эластомера в ненагруженном состоянии (рис. 1, 2).

Для исследования динамики ЛМЭП уравнения (1–7) необходимо объединить в систему и провести ее решение с использованием численных методов [5, 6, 7, 8, 10, 11] анализа жестких систем уравнений, характеризующихся большим диапазоном изменений постоянных времени, при нулевых начальных условиях и ограничениях:

$$0 \leq x(t) \leq 2x_m, \quad (8)$$

$$|u_{ист}| \leq U_{доп}, \quad (9)$$

где  $x_m$  – амплитуда хода якоря;  $U_{доп}$  – максимально допустимое напряжение на обмотке двигателя.

Разработанную математическую модель используем для расчета его динамических характеристик ЛМЭП при заданном законе изменения тока в обмотке двигателя  $i_{ист} = 0,4 + 0,3 \sin(62,8 t)$ . Расчет проведем для двух образцов эластомеров, имеющих различные свойства, обусловленные химическим составом (в состав эластомера входят различные марки технического углерода).

Конструкция магнитной системы линейного магнитоэлектрического двигателя представлена на рис. 3

Для разработки макетного образца на максимальное тяговое усилие 100 Н был проведен предварительный оптимизационный расчет его магнитной системы с определением основных геометрических размеров и обмоточных данных с помощью программного обеспечения «Выбор» [9]. Корректировка полученных из решения задачи оптимизации параметров проводилась с учетом результатов численного расчета магнитного поля ЛМЭП.

Расчет трехмерной модели магнитной системы линейного магнитоэлектрического двигателя проведен в программном обеспечении Ansoft Maxwell 15.0 (рис. 4).

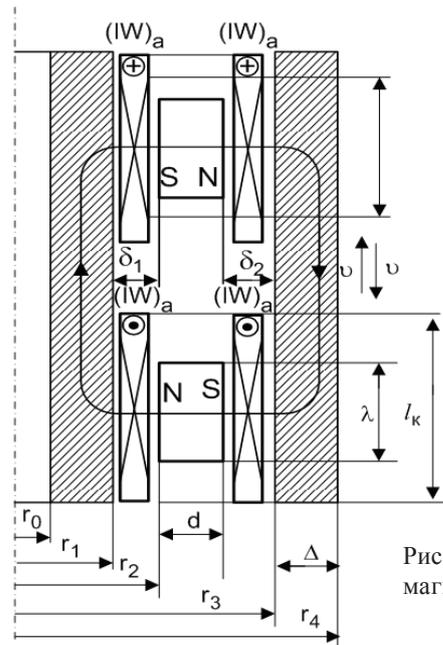


Рис. 3. Магнитная система линейного магнитоэлектрического двигателя

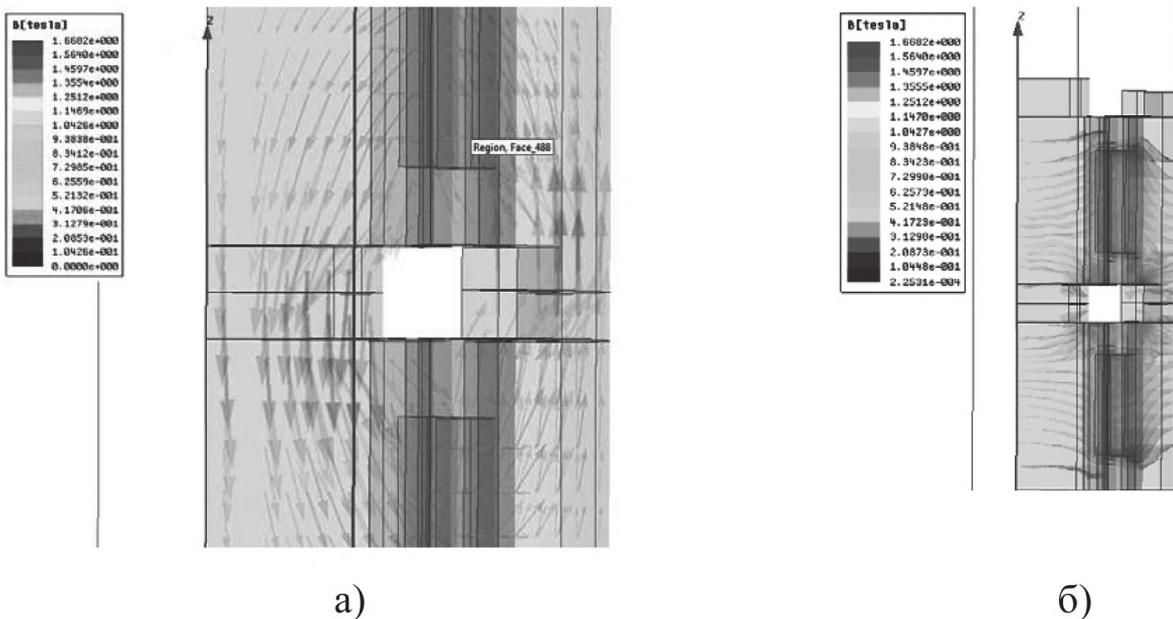


Рис. 4. Индукция магнитного поля в магнитной системе линейного магнитоэлектрического двигателя при заданном токе в обмотках: а) направление вектора; б) поле распределения

На основе численного расчета магнитного поля при различных положениях якоря были получены средние значения коэффициентов для определения тягового усилия и противо-ЭДС обмотки линейного магнитоэлектрического двигателя  $C_{\epsilon} = 76,677$  и  $C_m = 79,577$ .

При использовании оптимизационных расчетов различных базовых конфигураций магнитных систем, а также результатов исследования электромагнитного поля в прикладном программном обеспече-

нии предложена геометрия магнитной системы линейного магнитоэлектрического двигателя, которая нашла свое применение в техническом решении по реализации макетного образца ЛМЭП для испытания вязкоупругих свойств эластомеров. Внешний вид разработанного линейного магнитоэлектрического двигателя приведен на рис. 5. Основные технические характеристики используемого двигателя приведены в табл. 4.



Рис. 5. Макетный образец ЛМЭП для испытаний вязкоупругих свойств эластомеров опытных образцов эластомеров: а – внешний вид привода; б – термокамера

Таблица 4

**Основные технические характеристики базовой конструкции  
магнитоэлектрического двигателя**

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
Максимальное электромагнитное усилие, $F_{ЭМ}$	Н	100
Индукция в сердечнике, $B_m$	Тл	1.6
Амплитуда хода якоря, $x$	м	0.005
Высота магнита, $\lambda$	м	0.054
Длина магнита по оси намагничивания, $d$	м	$7.9 \cdot 10^{-3}$
Высота активной части обмотки, $l_a$	м	0.06
Высота обмотки, $l_k$	м	0.07
Толщина внутренней обмотки, $\delta_1$	м	$2.7 \cdot 10^{-3}$
Толщина внешней обмотки, $\delta_2$	м	$3.3 \cdot 10^{-3}$
Средний радиус магнита	м	$5.18 \cdot 10^{-2}$
Средний радиус внутренней обмотки	м	$4.64 \cdot 10^{-2}$
Средний радиус внешней обмотки	м	$5.74 \cdot 10^{-2}$
Радиус внутреннего сердечника магнитопровода, $r_1$	м	$4.51 \cdot 10^{-2}$
Радиус внутренней обмотки, $r_2$	м	$4.78 \cdot 10^{-2}$
Радиус магнита, $r_3$	м	$5.57 \cdot 10^{-2}$
Радиус внешней обмотки, $r_4$	м	$5.9 \cdot 10^{-2}$
Радиус внешнего сердечника магнитопровода, $r_5$	м	$7.43 \cdot 10^{-2}$

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
Индукция в нейтральном сечении магнита	Тл	0.578
Индукция во внутреннем зазоре	Тл	0.586
Индукция во внешнем зазоре	Тл	0.474
Масса якоря, m	кг	2.5
Активное сопротивление обмотки двигателя, $R_{обм}$	Ом	9.078
Индуктивность обмотки двигателя, $L_s$	Гн	0.038
Номинальное напряжение двигателя, $U_d$	В	24
Номинальная мощность двигателя, $P_d$	Вт	72
Величина созд. усил. на штоке двигателя, $F_{эм}$	Н	$50 \pm 25$
Диапазон регулировки создаваемого усилия на штоке двигателя	Н	1...25
Частота колеб. штока двигателя	Гц	1 ÷ 25
Точность установки создаваемого усилия	%	$\pm 0.05$
Форма периодического силового воздействия		синусои- дальная
Наружный контроль температуры образца в диапазоне	°С	0 ÷ 160

Для шестиконтурной схемы замещения опытного образца эластомера уравнения (1–9) после соответствующих преобразований можно объединить в систему (10):

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{di_{ист}}{dt} = \frac{1}{L_{обм}} (u_{ист} - i_{ист} R_{обм} - e_{дв}) \\
 \frac{d\varepsilon_0}{dt} = \frac{1}{\lambda_0} [E_0(\varepsilon - \varepsilon_0) - E_1(\varepsilon - \varepsilon_1) - E_2(\varepsilon - \varepsilon_2) - E_3(\varepsilon - \varepsilon_3) - E_4(\varepsilon - \varepsilon_4) - E_5(\varepsilon - \varepsilon_5)], \\
 \frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{E_1}{\lambda_1} (\varepsilon_0 - \varepsilon_1), \\
 \frac{d\varepsilon_2}{dt} = \frac{E_2}{\lambda_2} (\varepsilon_0 - \varepsilon_2), \\
 \frac{d\varepsilon_3}{dt} = \frac{E_3}{\lambda_3} (\varepsilon_0 - \varepsilon_3) \\
 \frac{d\varepsilon_4}{dt} = \frac{E_4}{\lambda_4} (\varepsilon_0 - \varepsilon_4) \\
 \frac{d\varepsilon_5}{dt} = \frac{E_5}{\lambda_5} (\varepsilon_0 - \varepsilon_5) \\
 \frac{d\vartheta}{dt} = \frac{1}{m_я} (F_{эм} - F_{эл} - m_я g) \\
 \frac{dx}{dt} = \vartheta.
 \end{array} \right. \quad (10)$$

Параметры испытуемых цилиндрических образцов эластомеров в ненагруженном состоянии: диаметр, высота и площадь поперечного сечения равны соответственно:  $d = 0,01$  м,  $l_0 = 0,01$  м,  $S = 7,853 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>.

Расчет динамических характеристик ЛМЭП выполнен на основе решения системы уравнений (10) с

использованием имитационной модели в программе MatLab (рис. 6).

Сравнение вариантов расчета динамических характеристик ЛМЭП с различными опытными образцами эластомеров проведем при заданном значении тока в обмотке двигателя и температуре испытаний (рис. 7, 8).

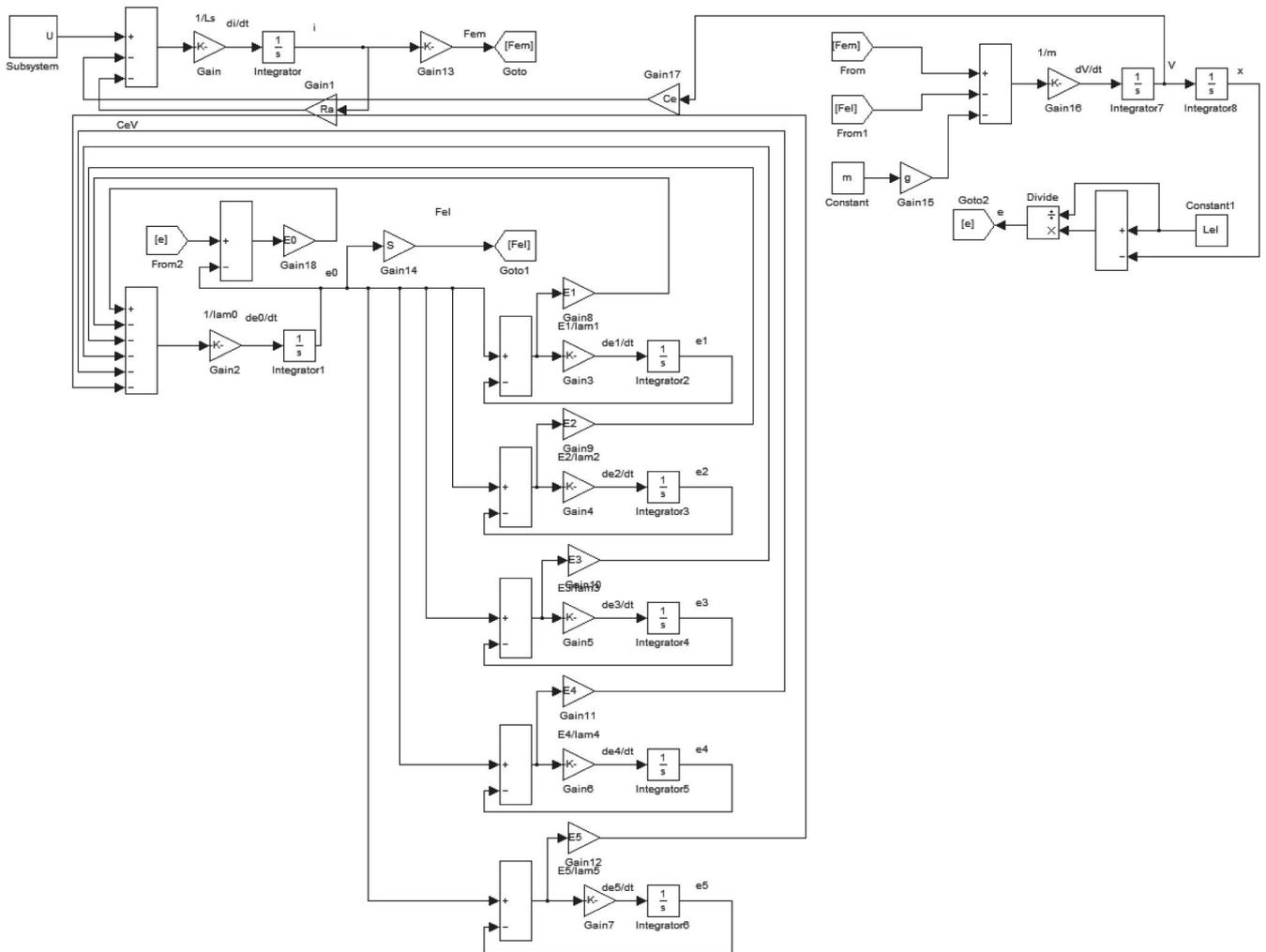


Рис. 6. Имитационная модель по расчету динамических характеристик линейного магнитоэлектрического привода для испытания вязкоупругих свойств эластомеров

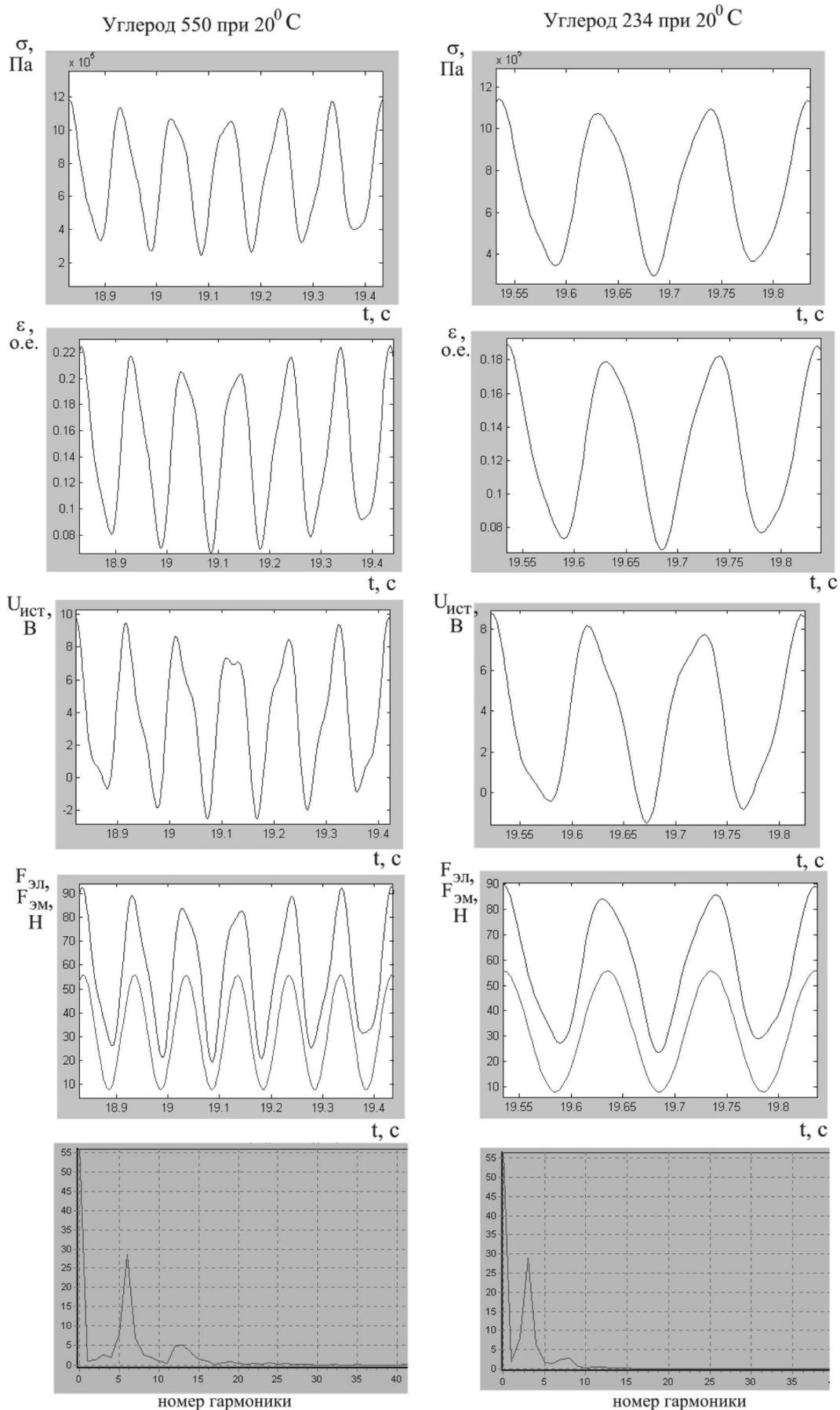


Рис. 7. Результаты расчета динамических характеристик ЛМЭП при температуре испытаний образцов, содержащих различные марки технического углерода П-550 и П-234 (вид справа), равной 20 °С

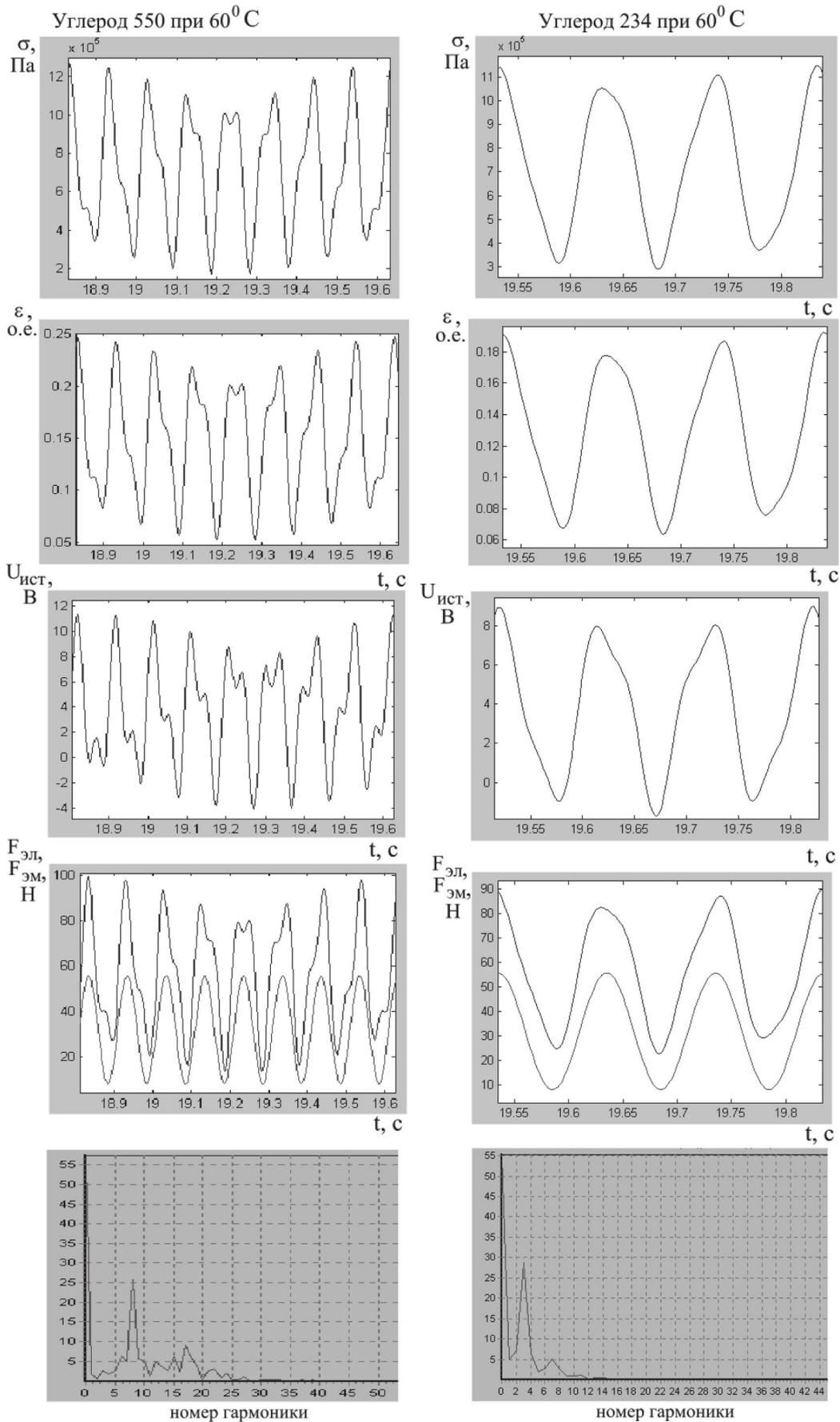


Рис. 8. Результаты расчета динамических характеристик ЛМЭП при температуре испытаний образцов, содержащих различные марки технического углерода П-550 и П-234 (вид справа), равной 60 °С

Особенности разработанной модели согласуются с использованием численных методов расчета жестких систем уравнений, что делает возможным применение модели ЛМЭП для исследования динамических характеристик привода и определения

реологических характеристик опытных образцов эластомеров при разложении расчетных временных зависимостей механической силы и деформации в ряд Фурье (табл. 5).

Таблица 5

**Реологические характеристики опытных образцов эластомеров с различным наполнителем технического углерода П-550 и П-234 при температуре испытаний  $T$  °С**

№	Параметр	Условное обозн.	Техуглерод П-550		Техуглерод П-234	
			$T = 20$ °С	$T = 60$ °С	$T = 20$ °С	$T = 60$ °С
1	Динам. модуль упругости, МПа	$ E $	5.84	5.62	6.87	6.67
2	Модуль упругости, $10^3$ Н/м	$K_y(1)$	45.9	44.1	54.0	52.4
3	Модуль вязкости, $10^3$ Н/м	$K_v(1)$	0.27	0.046	0.633	0.397
4	Тангенс угла механических потерь, $10^{-3}$	$tg(\delta)$	5.95	1.04	11.74	7.57

Расчет динамических характеристик ЛМЭП при испытании опытных образцов, наполненных техническим углеродом марок П-550 и П-234, отражает адекватность математической модели физическим процессам, протекающим в различных подсистемах привода, что подтверждается уточнением решения задачи оптимизации конструкции привода и накопленным опытом проектирования при создании экспериментального макетного образца ЛМЭП на основе разработанных расчетных методик.

*Список литературы*

1. *Материаловедение: Учебник для вузов* [Текст] / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др., под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 5-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 648 с.
2. *Jiri George Drobny. Handbook of Thermoplastic Elastomers* [Text] / Drobny Jiri George. – PDL handbook series, Elsevier, 2007.
3. *Cohen and Bergman, 2003b I. Cohen, D.J. Bergman. Effective elastic properties of periodic composite medium. J. Mech. Phys. Solids, 51 (2003). – P. 1433–1457.*
4. *Татевосян А.А. Синтез многоконтурной схемы замещения* [Текст] / А.А. Татевосян // *Электротехнические и информационные комплексы и системы.* – 2013. – Т. 9. – № 3. – С. 24–31.
5. *Ковалев Ю.З. Разработка алгоритмов исследования динамики обобщенного электромеханического преобразователя энергии на ЭЦВМ: Автореф.*

дис. д-ра техн. наук [Текст] / Ю.З. Ковалев. – М., 1980. – 40 с.

6. *Ковалев Ю.З. Расчет переходных процессов электрических машин при автоматизированном проектировании* [Текст] / Ю.З. Ковалев, И.П. Копылов // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.* – 1980. – № 3. – С. 7–12.

7. *Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии* [Текст] / И.П. Копылов. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.

8. *Ковалев Ю.З. Моделирование взаимодействующих динамических систем при определении электромагнитных характеристик* [Текст] / Ю.З. Ковалев, Е.Г. Андреева // *Информационные технологии в моделировании и управлении: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф.* – СПб., 1996. – С. 80–81.

9. *Татевосян А.А. Расчет параметров оптимальных конструкций магнитных систем магнитоэлектрического привода по испытанию вязкоупругих свойств эластомеров* [Текст] / А.А. Татевосян // *Омский научный вестник, 2004.* – С. 35–39.

10. *Захарова Н.В. Экспериментальное исследование и математическое моделирование поверхностного эффекта в ферромагнитном пазу* [Текст] / Н.В. Захарова, А.С. Татевосян // *Электротехнические и информационные комплексы и системы.* – 2013. – Т. 8. – № 4. – С. 5–12.

11. *Исмагилов Ф.Р. Влияние неравномерности воздушного зазора на ЭДС синхронного генератора переменного тока* [Текст] / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов // *Электротехнические и*

информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 8. – № 4. – С. 54–59.

#### References

1. *Materialovedenie: Uchebnik dlja vuzov* [Tekst] / B.N. Arzamasov, V.I. Makarova, G.G. Muhin i dr., pod obshh. red. B.N. Arzamasova, G.G. Muhina. – 5-e izd., stereotip. – M.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2003. – 648 s.
2. *Jiri George Drobny. Handbook of Thermoplastic Elastomers* [Text] / Drobny Jiri George. – PDL handbook series, Elsevier, 2007.
3. *Cohen and Bergman, 2003b* I. Cohen, D.J. Bergman. Effective elastic properties of periodic composite medium. *J. Mech. Phys. Solids*, 51 (2003). P. 1433–1457.
4. *Tatevosjan A.A. Sintez mnogokonturnoj shemy zameshhenija* [Tekst] / A.A. Tatevosjan // *Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy*. – 2013. – Т. 9. – № 3. – С. 24–31.
5. *Kovalev Ju.Z. Razrabotka algoritmov issledovanija dinamiki obobshhennogo jelektromehaničeskogo preobrazovatelja jenerгии na JeCVM: Avtoref. dis. d-ra tehn. nauk* [Tekst] / Ju.Z. Kovalev. – M., 1980. – 40 s.
6. *Kovalev Ju.Z. Raschet perehodnyh processov jelektričeskikh mashin pri avtomatizirovannom proektirovanii* [Tekst] / Ju.Z. Kovalev, I.P. Kopylov // *Izv. AN SSSR. Jenergetika i transport*. – 1980. – № 3. – S. 7–12.
7. *Kopylov I.P. Jelektromehaničeskije preobrazovatelji jenerгии* [Tekst] / I.P. Kopylov. – M.: Jenerгija, 1973. – 400 s.
8. *Kovalev Ju.Z. Modelirovanie vzaimodejstvujushhih dinamičeskikh sistem pri opredelenii jelektromagnitnyh harakteristik* [Tekst] / Ju.Z. Kovalev, E.G. Andreeva // *Informacionnye tehnologii v modelirovanii i upravlenii: Tez. dokl. mezhdunar. nauch.-tehn. konf.* – SPb., 1996. – S. 80–81.
9. *Tatevosjan A.A. Raschet parametrov optimal'nyh konstrukcij magnitnyh sistem magnitojelektričeskogo privodapo ispytaniju vjazkouprugih svojstv jelastomero* [Tekst] / A.A. Tatevosjan // *Omskij nauchnyj vestnik*, 2004. – S. 35–39.
10. *Zaharova N.V. Jeksperimental'noe issledovanie i matematičeskoe modelirovanie poverhnostnogo jeffekta v ferromagnitnom pazu* [Tekst] / N.V. Zaharova, A.S. Tatevosjan // *Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy*. – 2013. – Т. 8. – № 4. – С. 5–12.
11. *Ismagilov F.R. Vlijanie neravnomernosti vozdušnogo zazora na JeDS sinhronnogo generatore permennogo toka* [Tekst] / F.R. Ismagilov, I.H. Hajrullin, V.E. Vavilov // *Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy*. – 2013. – Т. 8. – № 4. – С. 54–59.



**Возмилов А.Г.**  
**Vozmilov A.G.**

*доктор технических наук, профессор кафедры «Электрооборудование и электронные системы автомобилей и транспорта» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Россия, г. Челябинск*



**Фаин В.Б.**  
**Fain V.B.**

*кандидат технологических наук, доцент кафедры «Применение электрической энергии в сельском хозяйстве» ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия», Россия, г. Челябинск*



**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*



**Юркин В.В.**  
**Yurkin V.V.**

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

УДК 62-784.222:636.5

## **АНАЛИЗ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА В ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ И ПТИЦЕВОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ**

В статье проведен анализ систем очистки воздуха на животноводческих и птицеводческих комплексах. Рассмотрены варианты очистки приточного, вытяжного и рециркуляционного воздуха от микроорганизмов с точки зрения эффективности защиты предприятий от распространения аэрогенных инфекций, защиты окружающей среды, энергоресурсосбережения. Показано, что использование одновременно системы очистки как приточного, так и вытяжного воздуха позволяет объединить их преимущества и исключить недостатки. Наиболее перспективной системой очистки воздуха с точки зрения защиты от распространения аэрогенных инфекций, защиты окружающей среды, улучшения санитарно-гигиенического

состояния воздушной среды в животноводческих помещениях и снижения энергозатрат на создание оптимального микроклимата в данных помещениях является система комплексной очистки рециркуляционного воздуха на электрофильтрации воздуха. Для высокоэффективной очистки рециркуляционного воздуха необходим электрофильтр, обладающий высокой пылеемкостью и возможностью непрерывной регенерации осадительных электродов. Такими качествами обладает специально разработанный мокрый однозонный электрофильтр, который и предлагается использовать в системах очистки рециркуляционного воздуха животноводческих помещений. Приведено устройство мокрого однозонного электрофильтра и описан принцип действия. Приведены схематическое изображение конструкции мокрого однозонного электрофильтра и фотографии внешнего вида. Отобрана структурная схема системы очистки приточного и рециркуляционного воздуха животноводческого помещения, позволяющая наиболее эффективно очищать и обеззараживать приточный и рециркуляционный воздух. В результате проведения комплексных лабораторных и производственных экспериментов были получены результаты, показывающие высокую эффективность данной системы очистки приточного и рециркуляционного воздуха от пыли, микроорганизмов и вредных газов, таких как аммиак и сероводород. Использование систем комплексной очистки рециркуляционного воздуха позволяет снизить энергозатраты на создание оптимального микроклимата в отопительный период в климатической зоне Урала на 30–70 процентов. Также необходимо отметить, что мокрый электрофильтр, работающий в режиме рециркуляции, осуществляет регулирование влажности внутри птицеводческих помещений.

*Ключевые слова:* животноводческие и птицеводческие комплексы, системы фильтрации приточного, вытяжного и рециркуляционного воздуха, аэрогенная инфекция, эффективность очистки воздуха, мокрый однозонный электрофильтр.

## ANALYSIS OF AIR PURIFICATION SYSTEMS IN LIVESTOCK AND POULTRY FARMS

The article analyzes the air purification systems for livestock and poultry farms. The variants of air supply, exhaust and return air from micro-organisms in terms of the protection of enterprises from spreading airborne infections, environmental protection, energy saving. It is shown that the use of both the cleaning system as supply and exhaust air allows you to combine the advantages and the disadvantages. The most promising air purification system in terms of protection against the spread of airborne infections, protect the environment, improve the sanitary conditions of the air environment in livestock buildings and reduce energy consumption for an optimal microclimate in these areas is a complex purification system recirculating air electrofiltration air. For high return air purification needs with high electrostatic pyleemkostyu and the possibility of continuous regeneration of the collecting electrodes. These qualities have a specially designed wet electrostatic-band, which is proposed to be used in purification systems recirculated air livestock buildings. Powered by a wet electrostatic precipitator and a single-band described the principle of operation. Shows a schematic view of the structure of wet electrostatic precipitator and a single-band photo appearance. Displayed block diagram of air supply and return air of livestock premises, allowing most effectively clean and disinfect the supply and return air. As a result of the integrated production and laboratory experiments, results were obtained showing a high efficiency of the cleaning system of air supply and recirculation of dust, microorganisms and harmful gases such as ammonia and hydrogen sulfide. Using complex purification systems return air to reduce energy consumption for an optimal microclimate in the heating period in the climate zone of the Urals by 30–70 percent. Also it should be noted that the wet electrostatic precipitator operating in recirculation mode, regulates humidity inside the poultry houses.

*Key words:* livestock and poultry farms, filtration systems of supply, vent and recirculation air, aerogenic infection, air cleaning efficiency, wet-band electrostatic.

Для индустриальных методов ведения животноводства характерны высокая концентрация и плотность размещения животных и птицы. Например, в птицеводческих помещениях под одной крышей может находиться 150 тыс. и более голов птицы с плотностью посадки более 40 гол./м<sup>2</sup> [1, 2].

В результате жизнедеятельности птицы внутри птицеводческих помещений выделяется значительное количество различных вредодействующих веществ (органическая пыль, микроорганизмы, вредодействующие газы, дурнопахнущие вещества и т.п.). Концентрация пыли, микроорганизмов, вред-

нодействующих газов (аммиак, сероводород, углекислый газ, кишечные газы и др.), дурнопахнущих веществ (меркаптанов) в животноводческих и птицеводческих помещениях зависит от ряда факторов и, как правило, превышает предельно допустимые концентрации (ПДК) [1, 2].

Как правило, нормируемый воздухообмен в животноводческих помещениях обеспечивается за счет круглосуточного использования механической принудительной приточно-вытяжной системы вентиляции. При работе вытяжной вентиляции в воздушный бассейн животноводческих комплексов непрерывно выбрасывается большое количество вышеперечисленных вредностей. Так, вытяжной системой вентиляции комплекса на 10 тыс. телят за холодный период года из помещений удаляется 103,9 млрд микробных тел, 6,2 кг пыли, 23 кг аммиака [1]. На птицекомплексе с поголовьем 480 тыс. кур-несушек

в окружающую среду ежедневно выбрасывается более 480 кг пыли в летний период и 140 кг зимой [2].

Вследствие больших выбросов различных загрязнений в окружающую среду современное промышленное животноводство и птицеводство столкнулись с рядом серьезных проблем, без решения которых невозможно дальнейшее успешное развитие данных отраслей. Это прежде всего проблема очистки и обеззараживания воздуха [3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10]. Решение данной проблемы позволит осуществить (рис. 1):

- защиту окружающей среды в зоне размещения животноводческих и птицеводческих комплексов;
- защиту комплексов от проникновения и распространения инфекционных заболеваний аэрогенным путем [11];
- энерго- и ресурсосбережение.

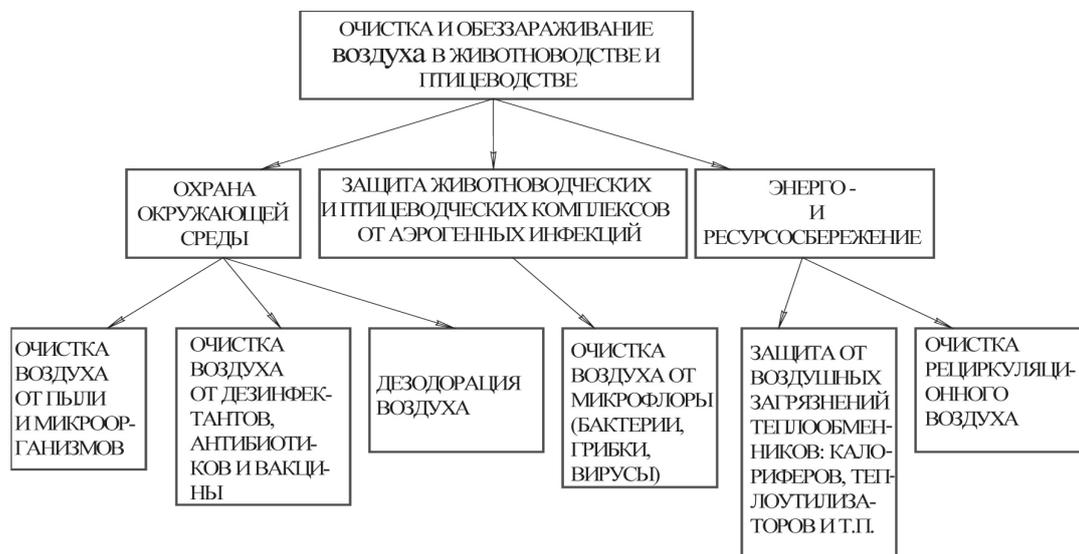


Рис. 1. Очистка и обеззараживание воздуха в животноводстве и птицеводстве

Биологическая защита птицеводческих комплексов в настоящее время является одной из основных проблем промышленного птицеводства. Распространение патогенных микроорганизмов может происходить по нескольким каналам: по воздуху, с водой и кормами, с обслуживающим персоналом, тарой и др. Наибольшую опасность представляет собой воздушный путь распространения инфекции, поскольку он является основным для большинства инфекционных заболеваний животных и птицы [5]. Эффективным способом очистки и обеззараживания воздуха является его фильтрация [3; 7].

Рассмотрим возможные варианты систем фильтрации воздуха в животноводческих помещениях:

а) система фильтрации приточного воздуха (СФПВ);

б) система фильтрации вытяжного воздуха (СФВВ);

в) система фильтрации как приточного, так и вытяжного воздуха (СФПВВ);

г) система фильтрации рециркуляционного воздуха (СФРВ).

Практический интерес представляет сравнительная оценка данных систем фильтрации с точки зрения:

- предотвращения распространения инфекций аэрогенным путем;
- эффективности защиты окружающей среды;
- энерго- и ресурсосбережения.

Опыт применения воздушных фильтров в животноводстве в основном относится к очистке приточного вентиляционного воздуха (СФПВ) [2; 3; 4;

5; 6; 7; 8]. Сравнение вариантов систем фильтрации вентиляционного воздуха проведем на основе применения их в птицеводстве. При рассмотрении данного вопроса были использованы общие положения фильтрационной техники с учетом специфических условий ее использования в птицеводстве.

Прежде всего, отметим, что система фильтрации вытяжного воздуха не защищает птичник от заноса инфекции от источника, находящегося вне территории птицефабрики. Это обстоятельство имеет большее или меньшее значение в зависимости от места расположения предприятия. В дальнейшем мы будем проводить сравнение систем очистки воздуха с учетом того, что вероятность заноса инфекции от источника, находящегося вне территории предприятия, равна нулю.

Если рассмотреть СФПВ и СФВВ с точки зрения биологической защиты не всех животноводческих помещений, а только одного или нескольких, то, очевидно, наиболее приемлемой является установка СФПВ. Однако на практике необходимо осуществить защиту всех помещений, где содержится птица. Поэтому в данном случае уже нет такой ясности в том, какой из систем очистки воздуха отдать предпочтение с точки зрения защиты от аэрогенных инфекций.

Проведем сравнение СФПВ и СФВВ в случае очистки воздуха во всех птицеводческих помещениях хозяйства, где содержатся животные. Для этого целесообразно прибегнуть к элементарному математическому описанию. Пусть предприятие состоит из  $n$  птичников. Введем следующие обозначения:

–  $q_i$  – количество микроорганизмов, удаляемых в единицу времени с вытяжным воздухом из  $i$ -го птичника ( $i = 1, 2, \dots, n$ );

–  $\alpha_{i1}, \dots, \alpha_{in}$  – коэффициенты микробной связи, показывающие, какая доля микроорганизмов, выброшенных в единицу времени с вытяжным воздухом из соответствующего птичника, поступает с приточным воздухом в  $i$ -й птичник.

Величины  $q_i, \alpha_{ii}$  относятся к случаю отсутствия в птичниках СФПВ и СФВВ. Ясно, что  $q_j, \alpha_{ii}$  непрерывно изменяются во времени в зависимости от большого числа факторов. Поэтому ниже все соотношения записаны для мгновенных значений этих величин. Кроме этого, мы пренебрегаем временем переноса микробов по воздуху от одного птичника к другому.

**Вариант 1.** Все птичники оборудованы СФПВ, причем эффективность фильтров равна  $\eta$ . Тогда количество микробов, проникающих в единицу времени в  $i$ -й птичник, равно:

$$Q_i^{(1)} = (1 - \eta) (q_1 \alpha_{i1} + \dots + q_i \alpha_{ii} + \dots + q_n \alpha_{in}). \quad (1)$$

**Вариант 2.** Все птичники оборудованы СФВВ с той же эффективностью фильтрации  $\eta$ . Тогда количество микробов, проникающих в единицу времени в  $i$ -й птичник из других птичников, будет равно:

$$Q_i^{(2)} = (1 - \eta) q_1 \alpha_{i1} + \dots + (1 - \eta) q_i \alpha_{ii} + \dots + (1 - \eta) q_n \alpha_{in} = (1 - \eta) (q_1 \alpha_{i1} + \dots + q_i \alpha_{ii} + \dots + q_n \alpha_{in}), \quad (2)$$

т. е.  $Q_i^{(1)} = Q_i^{(2)}$ . (3)

Проведенный анализ показывает, что при равной эффективности очистки воздуха у СФПВ и СФВВ количество микроорганизмов, проникающих в единицу времени в  $i$ -й птичник, одинаково как при СФПВ, так и при СФВВ. Следовательно, с данной точки зрения при одинаковой эффективности фильтрации воздуха  $\eta$  системы СФПВ и СФВВ равноценны.

Чтобы установка СФПВ была наиболее эффективна, в птичнике необходимо поддерживать избыточное давление по отношению к окружающей среде. В случае установки в птичнике СФВВ, наоборот, необходимо иметь разрежение. С точки зрения обеспечения оптимального микроклимата в птичнике более предпочтительным является поддержание внутри него избыточного давления.

В проектируемых и существующих птицеводческих помещениях система вентиляции имеет вытяжных вентиляторов намного больше, чем приточных. Поэтому при одинаковой общей производительности по воздуху число фильтров в СФВВ будет больше, чем в СФПВ. Это значительно увеличивает стоимость фильтрационной системы и усложняет ее эксплуатацию.

Концентрация пыли в вытяжном воздухе птичника приблизительно на порядок превышает концентрацию ее в приточном воздухе. Поэтому при одинаковой пылеемкости частота регенерации фильтра вытяжного воздуха окажется значительно больше, чем у фильтра приточного воздуха. Чтобы увеличить пылеемкость фильтра вытяжного воздуха, перед ним следует установить фильтр грубой очистки. В результате стоимость СФВВ окажется выше стоимости СФПВ.

СФВВ уменьшает запыленность и микробную обсемененность воздуха на территории птицеводческого хозяйства. Это уменьшает опасность заноса инфекции в птичники с обслуживающим персоналом, также уменьшается загрязненность окружающей среды, а следовательно, улучшаются санитарно-гигиенические условия труда персонала.

В случае выхода из строя СФПВ птичник полностью лишается биологической защиты. В случае выхода из строя СФВВ птичник не лишается биологической защиты, если СФВВ в других птичниках исправны. Однако если в птичнике имеется патогенная

микрофлора, то при выходе из строя СФВВ данного птичника появляется опасность распространения патогенной микрофлоры в другие птичники.

Применение системы СФПВВ позволяет объединить преимущества СФПВ и СФВВ и исключить их недостатки. Несмотря на то, что при СФПВ целесообразно избыточное давление в птичнике, а при СФВВ разряжение, при создании СФПВВ с избыточным давлением воздуха внутри эффект фильтрации, а следовательно, и биологическая защита птицеводческого хозяйства будет эффективнее, чем при применении только СФПВ или только СФВВ. Но при этом капиталовложения и затраты на эксплуатацию СФПВВ значительно превосходят затраты на СФПВ и СФВВ, применяемые раздельно.

Рассмотрим более подробно применение систем фильтрации воздуха (СФРВ). Исследования систем комплексной отчистки рециркуляционного воздуха (отчистка от пыли, микроорганизмов, вредных газов и т. п.) показали, что использование данной системы позволяет получить максимальный эффект по ряду показателей, а именно:

- снижению концентрации вредностей (пыли, микроорганизмов, аммиака, сероводорода) внутри птицеводческих помещений;
- защите воздушного бассейна над территорией птицекомплексов;
- улучшению условий труда обслуживающего персонала;
- снижению энергозатрат на создание оптимального микроклимата [7; 8; 9; 10].

Для очистки вентиляционного воздуха, в том числе и рециркуляционного, используются воздушные фильтры. Современное производство предоставляет широкую линейку воздушных фильтров и фильтрующих элементов, имеющих различные технологические и конструктивные параметры, сравнение которых показывает очевидное преимущество электрофильтров (рис. 2). В основу действия электрофильтра положен коронный разряд, в поле которого происходит зарядка взвешенных в очищаемом воздухе частиц и их осаждение на осадительных электродах под действием электрических сил.

В свою очередь, рециркуляционные электрофильтры, согласно требованиям к очистке рециркуляционного воздуха, должны обладать высокой пылеемкостью и способностью к непрерывной регенерации осадительных электродов от осевших на них пылевых частиц. Такими качествами обладает мокрый однозонный электрофильтр (рис. 3), специально разработанный при сотрудничестве Челябинской государственной агроинженерной академии и Государственного аграрного университета Северно-

го Зауралья.

Мокрый однозонный электрофильтр состоит из двух основных частей: верхней части с коронирующими электродами и системой высоковольтных изоляторов; нижней части с емкостью для жидкости и системой удаления загрязненной омывающей жидкости через сливной клапан.

В качестве коронирующих электродов используются игольчатые или проволочные электроды. Осадительные электроды выполняются в виде параллельных плоских дисков, вращающихся на валу электрофильтра.

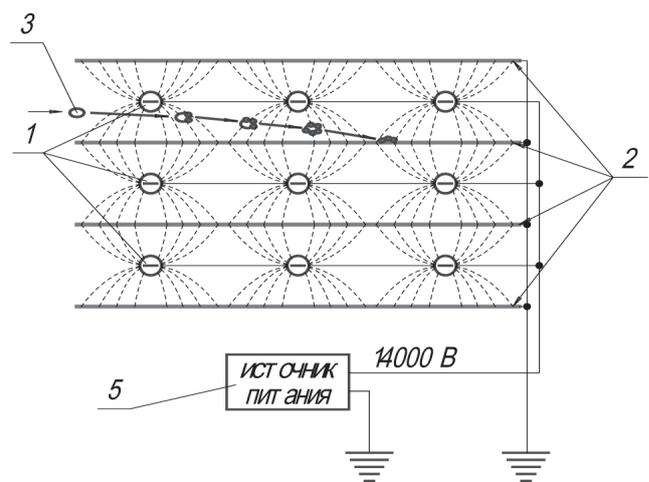


Рис. 2. Принцип действия электрофильтра:

- 1 – коронирующие электроды; 2 – заземленные осадительные электроды; 3 – осаждаемая частица;
- 4 – потенциальные плоские электроды в зоне зарядки;
- 5 – источник питания электрофильтра

Использование комплексной очистки рециркуляционного воздуха мокрым электрофильтром, осуществляемой по схеме, представленной на рисунке 4, показало высокую эффективность по всем выше приведенным показателям [11; 12].

Данная схема позволяет проводить отчистку как рециркуляционного, так и приточного воздуха.

Испытания систем очистки рециркуляционного воздуха в помещениях с помощью мокрого электрофильтра показали эффективность отчистки воздуха от:

- частиц пыли размером 1 мкм и более  $\eta_{\text{п}} \geq 95,4 \pm 1,5\%$  [14];
- микроорганизмов  $\eta_{\text{м}} \geq 70 \pm 1,5\%$  [14; 15; 16];
- аммиака  $\eta_{\text{N}_2} \geq 83,8 \pm 1,9\%$  [13];
- сероводорода  $\eta_{\text{S}} \geq 48 \pm 2\%$  [9].

Использование систем комплексной очистки рециркуляционного воздуха позволяет снизить энергозатраты на создание оптимального микроклимата в отопительный период в климатической зоне Урала на 30–70 процентов [7].

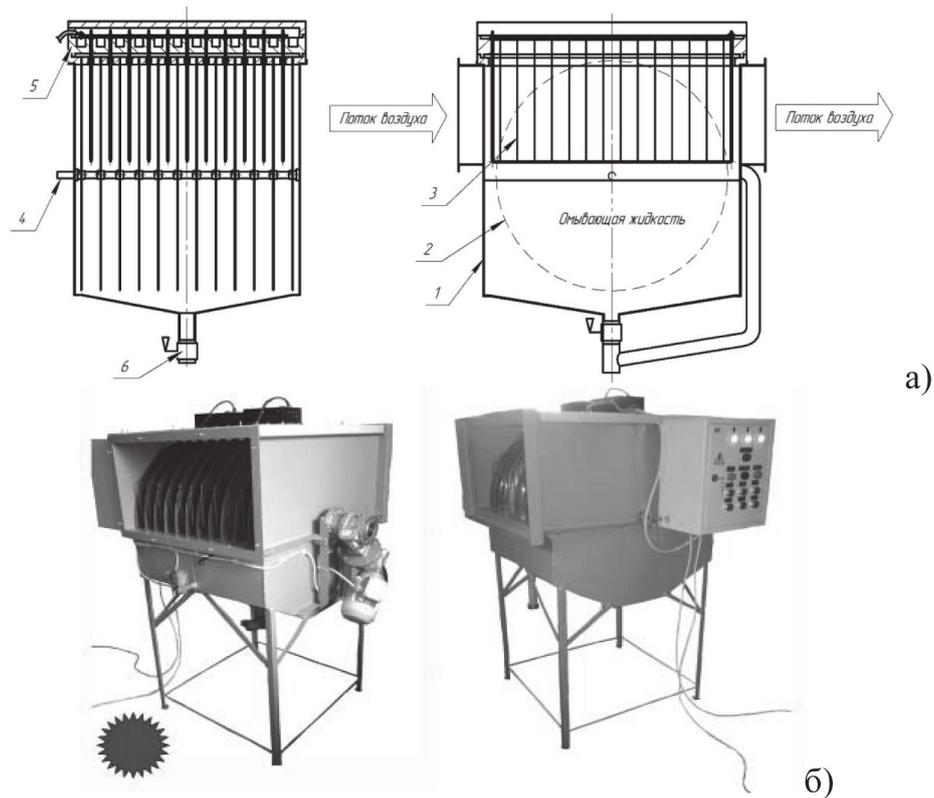


Рис. 3. Мокрый одноозонный электрофильтр: а) устройство; б) внешний вид: 1 – корпус; 2 – осадительные электроды; 3 – коронирующие электроды; 4 – вал электрофильтра; 5 – изоляционная плита; 6 – сливной клапан

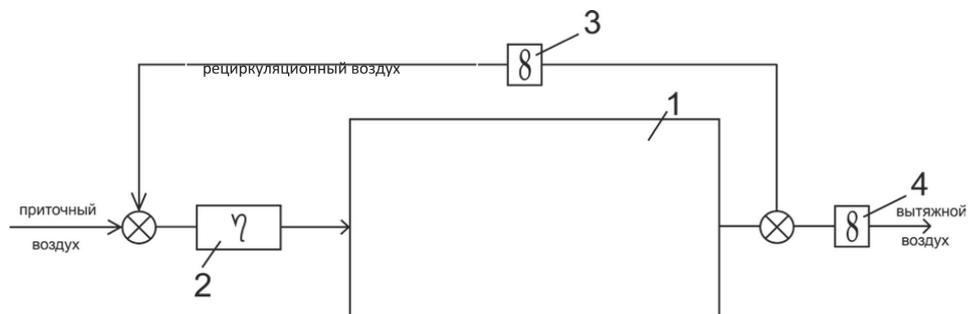


Рис. 4. Схема фильтрации рециркуляционного и приточного воздуха мокрым электрофильтром: 1 – птицеводческое помещение; 2 – мокрый электрофильтр; 3 – рециркуляционный вентилятор; 4 – вытяжной вентилятор

Также необходимо отметить, что мокрый электрофильтр, работающий в режиме рециркуляции, осуществляет регулирование влажности внутри птицеводческих помещений [17].

**Выводы**

1. Использование системы фильтрации приточного воздуха (СФПВ) позволяет защищать животноводческие помещения от проникновения инфекций извне, защищать поверхность калориферов на притоке от загрязнений.

2. Система очистки вытяжного воздуха (СФВВ) позволяет эффективно снижать экологическую нагрузку на воздушный бассейн животноводческих комплексов, защищать поверхность теплообменников от загрязнений.

3. Применение одновременно систем очистки как приточного, так и вытяжного воздуха (СФПВВ) технически сложнее и дороже систем СФПВ и СФВВ, примененных отдельно. Но система СФПВВ позволяет получить наивысшую эффективность биологической защиты птицеводческих помещений и ее целесообразно применять в качестве последующего этапа в развитии фильтрации приточно-вытяжного воздуха в птицеводстве.

4. Использование систем комплексной очистки рециркуляционного воздуха (СФРВ) является наиболее эффективным и перспективным направлением в решении проблемы очистки и обеззараживания воздуха крупных животноводческих и птицеводческих комплексов. Данная система позволяет снизить

концентрации вредных веществ внутри помещений, защитить воздушный бассейн над территорией животноводческих комплексов, улучшить условия труда обслуживающего персонала, снизить энергозатраты на создание оптимального микроклимата.

#### Список литературы

1. Селянский В.М. Микроклимат в птичниках [Текст] / В.М. Селянский. – М.: Колос, 1975. – 304 с.
2. Вайнштейн Г.С. Проблема санитарной изоляции птицеводческих помещений [Текст] / Г.С. Вайнштейн // Птицеводство. – 1970. – № 12. – С. 45–47.
3. Вайнштейн Г.С. Современные методы обеззараживания поступающего в птичники воздуха [Текст] / Г.С. Вайнштейн // Сельское хозяйство за рубежом. Сер. «Животноводство». – 1970. – № 11. – С. 39–41.
4. Anderson D. Система фильтрации и охлаждения воздуха в птичниках для выращивания ремонтных кур-несушек [Текст] / D. Anderson // Птицеводство. – 1973. – № 4.
5. Tester L. Очистка воздуха птичников от бактерий [Текст] / L. Tester // Птицеводство. – 1974. – № 2.
6. Волков Г.К. Эффективность фильтрации воздуха на птицефабриках [Текст] / Г.К. Волков, Л.Ф. Силенок // Ветеринария. – № 8. – С. 28–31
7. 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.
8. Басов А.М., Возмилов А.Г. Требования к воздушным фильтрам для птичников [Текст] / А.М. Басов, А.Г. Возмилов // Птицеводство. – 1975. – № 2. – С. 32 – 33.
9. Возмилов А.Г. Результаты производственных испытаний мокрого электрофильтра [Текст] / А.Г. Возмилов, Л.Н. Андреев, Д.В. Астафьев, Б.В. Жеребцов, А.А. Дмитриев // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2013. – № 8. – С. 185–191.
10. Возмилов А.Г. Электроочистка и электрообеззараживание воздуха в технологических процессах АПК [Текст] / А.Г. Возмилов, О.В. Звездакова // Вестник ЧГАА. – 2013. – Т. 66. – С. 14–24.
11. Власов М.В. Очистка вытяжного воздуха в промышленном птицеводстве [Текст] / М.В. Власов, А.Г. Возмилов // Вестник ЧГАА. – 2010. – Т. 56. – С. 29–31.
12. Патент № 2343362 Российская Федерация МПК7 F24F3/16. Мокрый однозонный электрофильтр [Текст] / А.Г. Возмилов, В.Н. Мишагин, Л.Н. Андреев, Д.В. Астафьев; Федеральное государственное образовательное учреждение высшего

профессионального образования «Челябинский государственный агроинженерный университет» (RU). – № 2007124044/06; заявл. 26.06.2007; опубл. 10.01.2009. – Бюл. № 1.

13. 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.

14. Возмилов А.Г. Расчет основных параметров осадительных электродов мокрого электрофильтра [Текст] / А.Г. Возмилов, Л.Н. Андреев, В.Н. Мишагин // Техника в сельском хозяйстве. – 2010. – № 4. – С. 19–22.

15. Возмилов А.Г. Разработка полной методики расчета эффективности очистки воздуха от пыли, микроорганизмов и вредных газов с помощью двухступенчатого мокрого электрофильтра [Текст] / А.Г. Возмилов, Л.Н. Андреев, А.А. Дмитриев, Б.В. Жеребцов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 4. – С. 60–65.

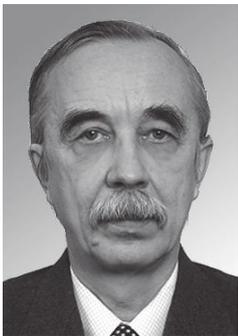
16. Мишагин В.Н. Методика определения эффективности систем очистки воздуха от микроорганизмов [Текст] / В.Н. Мишагин, Л.Н. Андреев, И.Е. Сыромятов, С.Д. Матвеев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – № 5. – С. 39–40.

17. Возмилов А.Г. Очистка воздуха в помещениях для свиней [Текст] / А.Г. Возмилов // Достижения науки и техники в АПК. – 1991. – С. 48–55.

#### References

1. Seljanskij V.M. Mikroklimat v ptichnikah [Tekst] / V.M. Seljanskij. – M.: Kolos, 1975. – 304 s.
2. Vajnshtejn G.S. Problema sanitarnoj izoljicii pticevodcheskih pomeshhenij [Tekst] / G.S. Vajnshtejn // Pticevodstvo. – 1970. – № 12. – S. 45–47.
3. Vajnshtejn G.S. Sovremennye metody obezzarazhivaniya postupajushhego v ptichniki vozduha [Tekst] / G.S. Vajnshtejn // Sel'skoe hozjajstvo za rubezhom. Ser. «Zhivotnovodstvo». – 1970. – № 11. – S. 39–41.
4. Anderson D. Sistema fil'tracii i ohlazhdenija vozduha v ptichnikah dlja vyrashhivaniya remontnyh kur-nesushek [Tekst] / D. Anderson // Pticevodstvo. – 1973. – № 4.
5. Tester L. Ochistka vozduha ptichnikov ot bakterij [Tekst] / L. Tester // Pticevodstvo. – 1974. – № 2.
6. Volkov G.K. Jefferktivnost' fil'tracii vozduha na pticefabrikah [Tekst] / G.K. Volkov, L.F.Silenok // Veterinarija. – № 8. – S. 28–31/
7. Vozmilov A.G. Jelektroochistka i jelektroobezzarazhivanie vozduha v promyshlennom zhivotnovodstve i pticevodstve: dis. d-ra tehn. nauk [Tekst] / A.G. Vozmilov. – Cheljabinsk, 1993. – 268 s.

8. *Basov A.M.* Trebovanija k vozdušnym fil'tram dlja ptichnikov [Tekst] / A.M. Basov, A.G. Vozmilov // Pticevodstvo. – 1975. – № 2. – S. 32–33.
9. *Vozmilov A.G.* Rezul'taty proizvodstvennyh ispytanij mokrogo jelektrofil'tra [Tekst] / A.G. Vozmilov, L.N. Andreev, D.V. Astaf'ev, B.V. Zherebcov, A.A. Dmitriev // Vestnik Krasnojarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2013. – № 8. – S. 185–191.
10. *Vozmilov A.G.* Jelektroochistka i jelektroobezzarazhivanie vozduha v tehnologicheskikh processah APK [Tekst] / A.G. Vozmilov, O.V. Zvezdakova // Vestnik ChGAA. – 2013. – T. 66. – S. 14–24.
11. *Vlasov M.V.* Ochistka vytjazhnogo vozduha v promyshlennom pticevodstve [Tekst] / M.V. Vlasov, A.G. Vozmilov // Vestnik ChGAA. – 2010. – T. 56. – S. 29–31.
12. *Patent № 2343362* Rossijskaja Federacija MPK7 F24F3/16. Mokryj odnozonnij jelektrofil'tr [Tekst] / A.G. Vozmilov, V.N. Mishagin, L.N. Andreev, D.V. Astaf'ev; Federal'noe gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija «Cheljabinskij gosudarstvennyj agroinženernyj universitet» (RU). – № 2007124044/06; zajavl. 26.06.2007; opubl. 10.01.2009. – Bjul. № 1.
13. *Vozmilov A.G.* Rezul'taty issledovanij mokrogo odnozonnogo jelektrofil'tra [Tekst] / A.G. Vozmilov, V.N. Mishagin, L.N. Andreev // Tehnika v sel'skom hozjajstve. – 2009. – № 3. – S. 20–22.
14. *Vozmilov A.G.* Raschet osnovnyh parametrov osaditel'nyh jelektrodov mokrogo jelektrofil'tra [Tekst] / A.G. Vozmilov, L.N. Andreev, V.N. Mishagin // Tehnika v sel'skom hozjajstve. – 2010. – № 4. – S. 19–22.
15. *Vozmilov A.G.* Razrabotka polnoj metodiki rascheta jeffektivnosti ochistki vozduha ot pyli, mikroorganizmov i vrednyh gazov s pomoshh'ju dvuhstupenchatogo mokrogo jelektrofil'tra [Tekst] / A.G. Vozmilov, L.N. Andreev, A.A. Dmitriev, B.V. Zherebcov // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – T. 9. – № 4. – S. 60–65.
16. *Mishagin V.N.* Metodika opredelenija jeffektivnosti sistem ochistki vozduha ot mikroorganizmov [Tekst] / V.N. Mishagin, L.N. Andreev, I.E. Syromjatov, S.D. Matveev // Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. – 2008. – № 5. – S. 39–40.
17. *Vozmilov A.G.* Ochistka vozduha v pomeshhenijah dlja svinej [Tekst] / A.G. Vozmilov // Dostizhenija nauki i tehniki v APK. – 1991. – S. 48–55.



**Кабашов В.Ю.**  
**Kabashov V.Yu.**

доктор технических наук, доцент кафедры  
«Безопасность жизнедеятельности и экологии»  
ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный  
аграрный университет», Россия, г. Уфа

УДК 621.315.1

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЛЕТА НА АВАРИЙНЫЕ ОТКЛЮЧЕНИЯ СЕЛЬСКИХ ВЛ 6–10 кВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЕТРА

В статье представлены результаты исследований влияния стрел провеса, длины пролета на сближения проводов при воздействии ветра, вызывающие аварийные отключения сельских ВЛ 6–10 кВ. Получено кубическое уравнение и его решение для определения коэффициента разрегулировки стрел провеса проводов в зависимости от длины пролета и величины удлинения провода в пролете. На основе выполненных расчетов получены зависимости коэффициента разрегулировки стрел провеса проводов от величины их удлинения в пролетах длиной 40...120 м. Показано, что даже небольшая разница в длинах фазных проводов ведет к существенной разрегулировке их стрел провеса. При одинаковом удлинении провода коэффициент разрегулировки резко увеличивается с уменьшением длины пролета, чем объясняется высокая подверженность ВЛ 6–10 кВ с пролетами 40...60 м опасным сближениям и схлестываниям проводов при воздействии ветра. Экспериментально установлено, что при скоростях ветра 16,5...18,5 м/с расстояния между проводами при их максимальных сближениях в пролете длиной 50 м в 1,21...1,28 раза меньше, чем в пролете длиной 100 м. Увеличение коэффициента разрегулировки стрел провеса на 0,1 вызывает умень-

шение расстояния между проводами при их максимальных сближениях в среднем на 0,05...0,15 м. Изменение направления ветра к оси пролета в пределах 40...90° практически не влияет на величину взаимных сближений проводов, а при углах менее 40° вызывает их существенное уменьшение. Для предотвращения опасных сближений проводов ВЛ 6–10 кВ при воздействии ветра разработан и внедрен в производство гаситель маятниковых колебаний проводов, работоспособность которого доказана экспериментально. Результаты измерений, проведенных в двух пролетах ВЛ 10 кВ, показали, что при скоростях ветра 10...18 м/с расстояния между проводами при их максимальных сближениях в пролете с гасителями в 1,35...1,53 раза больше, чем в пролете без гасителей.

*Ключевые слова:* воздушная линия электропередачи, стрела провеса провода, длина пролета, ветер, сближение проводов.

## INFLUENCE OF PARAMETER OF SPAN ON THE EMERGENCY SHUT-OFF RURAL OVERHEAD LINES 6–10 kV AT IMPACT OF WIND

The article presents the results of researches the influence of sag wires, length of span on rapprochement of wires at impact of wind, defiant emergency shut-off rural overhead lines 6–10 kV. The obtained cubic equation and its solution for determining the coefficient disajustment sag of the wires depending on the length of the span and the value of elongation of the wire in the span. On the basis of the calculation obtained dependences of the coefficient disajustment of sag of the wires from the value of their elongation in the span length of 40...120 m. It is shown that even a small difference in the lengths of the phase wires of leads to significant disajustment of their arrows sag of wires. At the same elongation of the wire coefficient disajustment increases sharply with decreasing length of the span which explains the high susceptibility overhead lines 6–10 kV with length of spans.

40...60 m dangerous rapprochement and touching wires when exposed to wind. It was established experimentally that at wind speeds 16,5...18,5 m/s the distance between the wires at their maximum rapprochement in the span length of 50 m to 1,21...1,28 times less than in the span length of 100 m. The increasing coefficient disajustment sag of the wires on 0,1 causes a decrease of the distance between the wires at their maximum rapprochement on average on 0,05...0,15 m. The change in the wind direction to the axis of the span within 40...90° practically does not effect the value of mutual rapprochements of the wires, and when the angles of less than 40° causes their significant decreasing. To prevent dangerous rapprochement wires overhead lines 6–10 kV at impact of wind is developed and introduced into production the damper pendulum fluctuation of wires the operability of which proved experimentally. The results of the measurements carried out in two spans of overhead lines 10 kV showed that at wind speeds of 10...18 m/s the distance between the wires at their maximum rapprochement in span with dampers in 1,35...1,53 times more than in span without dampers.

*Key words:* air-line of an electricity transmission, sag of wire, length of span, wind, rapprochement wires.

При эксплуатации сельских воздушных линий электропередачи (ВЛ) 6–10 кВ раскачивания проводов под действием порывистого ветра вызывают их взаимные сближения на опасные в изоляционном отношении расстояния и схлестывания [1]. При этом токи короткого замыкания ведут к перегосу и обрыву проводов, что приводит к аварийным отключениям ВЛ и нарушению электроснабжения сельских потребителей. Многочисленные наблюдения показали, что несинхронные маятниковые колебания проводов ВЛ 6–10 кВ, вызывающие их опасные сближения, часто наблюдаются в пролетах с разными стрелами провеса.

Для исследований введем величину относительной разрегулировки (коэффициент разрегулировки) стрел провеса фазных проводов  $\delta_f$ :

$$\delta_f = \frac{f_2 - f_1}{f_1}, \quad (1)$$

где  $f_1, f_2$  – стрелы провеса соответственно первого и второго проводов ( $f_1 > f_2$ ).

С учетом коэффициента разрегулировки стрелы провеса фазных проводов в пролете ВЛ будут связаны следующим соотношением:

$$f_2 = f_1 (1 + \delta). \quad (2)$$

Разрегулировка проводов в процессе эксплуатации возникает из-за недостаточной прочности крепления провода к изолятору. При ослабленном креплении разница в гололедно-ветровых нагрузках на провода соседних пролетов (например, при неравных длинах, неравномерности покрытия проводов гололедом и т.д.) приводит к перемещению (проскальзыванию) провода через крепление и его удлинению в одном из смежных пролетов.

В связи с тем, что при увеличении длины провода в пролете уменьшается и тяжесть в нем, одно-

временно происходит сокращение провода за счет упругих свойств его материала. Общее увеличение длины провода в пролете  $\Delta L$  описывается следующим выражением [2]:

$$\Delta L = \frac{8}{3 \cdot l} (f_2^2 - f_1^2) - \frac{l^3 \cdot \gamma_1}{8 \cdot E} \left( \frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} \right), \quad (3)$$

где  $l$  – длина пролета, м;  $\gamma_1$  – удельная нагрузка от массы провода, Н/(м·мм<sup>2</sup>);  $E$  – модуль упругости провода, Н/мм<sup>2</sup>.

Выражение (3) после подстановки соотношения (2) приведем к следующему виду:

$$\Delta L = \frac{8}{3 \cdot l} \cdot f_1^2 \cdot (\delta_f^2 + 2 \cdot \delta_f) + \frac{l^3 \cdot \gamma_1 \cdot \delta_f}{8 \cdot E \cdot f_1 \cdot (1 + \delta_f)}. \quad (4)$$

После выполнения соответствующих алгебраических преобразований из выражения (4) получим кубическое уравнение:

$$\delta_f^3 + a \cdot \delta_f^2 + b \cdot \delta_f + c = 0, \quad (5)$$

где  $a = 3$ ;

$$b = 2 + \frac{3 \cdot l^4 \cdot \gamma_1}{64 \cdot E \cdot f_1^3} - \frac{3 \cdot l \cdot \Delta L}{8 \cdot f_1^2};$$

$$c = -\frac{3 \cdot l \cdot \Delta L}{8 \cdot f_1^2}.$$

Подстановкой  $\delta_f = y - 1$  уравнение (5) приводится к «неполному» виду:

$$y^3 + p \cdot y + q = 0, \quad (6)$$

где  $p = b - 3 = \frac{3 \cdot l^4 \cdot \gamma_1}{64 \cdot E \cdot f_1^3} - \frac{3 \cdot l \cdot \Delta L}{8 \cdot f_1^2} - 1$ ;

$$q = 2 - b + c = -\frac{3 \cdot l^4 \cdot \gamma_1}{64 \cdot E \cdot f_1^3}.$$

Дискриминант «неполного» кубического уравнения (6) определяется следующим образом [3]:

$$Q = \left( \frac{p}{3} \right)^3 + \left( \frac{q}{2} \right)^2. \quad (7)$$

Если  $Q > 0$ , то действительный корень уравнения (6) равен:

$$y = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}. \quad (8)$$

Если  $Q < 0$ , то

$$y = 2 \cdot \sqrt{-\frac{p}{3}} \cdot \cos \frac{\alpha}{3}, \quad (9)$$

где  $\cos \alpha = -\frac{q}{2 \cdot \sqrt{-\left(\frac{p}{3}\right)^3}}$ .

На основе выполненных расчетов получены зависимости относительной разрегулировки стрел провеса проводов  $\delta_f$  от величины их удлинения в пролетах длиной 40...120 м (рис. 1).

Проведенные исследования показали, что даже небольшая разница в длинах фазных проводов  $\Delta L$  ведет к существенной разрегулировке их стрел провеса  $\delta_f$ . Для III ветрового и гололедного района в пролете длиной 40 м (провод АС-35/6,2) уже при  $\Delta L = 0,01$  м коэффициент разрегулировки составляет 0,44. Согласно данным, приведенным в работе [4], опасные сближения и схлестывания фазных проводов возникали в пролетах ВЛ 6–10 кВ с разрегулировкой их стрел провеса от 0,2 до 0,6.

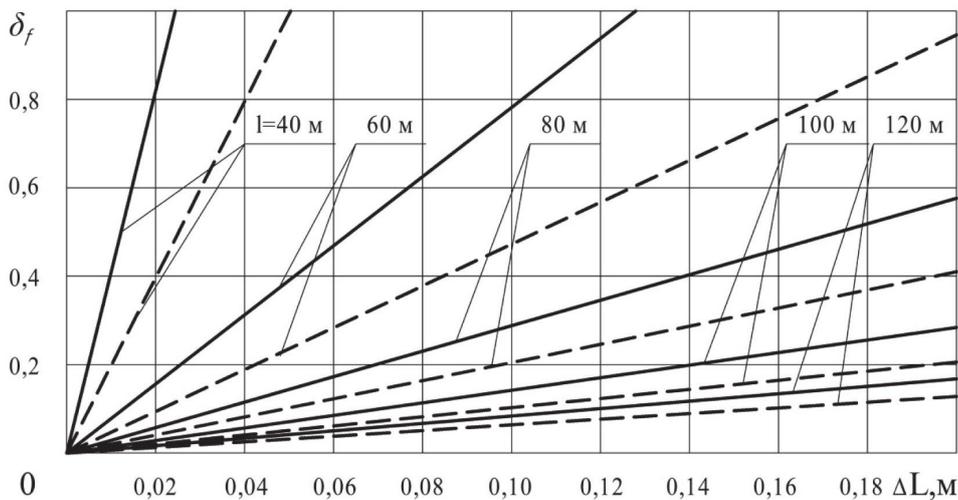


Рис. 1. Зависимость коэффициента разрегулировки стрел провеса проводов от величины их удлинения  $\Delta L$  в пролетах разной длины:

— для III ветрового, III гололедного районов, провода АС-35/6,2;  
 - - - для IV ветрового, III гололедного районов, провода АС-50/8,0

При одинаковом удлинении провода  $\Delta L$  относительная разрегулировка резко увеличивается с уменьшением длины пролета. Расчеты показали, что при  $\Delta L = 0,02$  м коэффициент разрегулировки стрел провеса проводов в пролете длиной 60 м в 5,71 раза больше, чем в пролете длиной 100 м и в 10,53 раза – в пролете длиной 120 м. Этим объясняется высокая подверженность ВЛ 6–10 кВ с пролетами 40...60 м опасным сближениям и схлестываниям проводов при воздействии ветра.

С целью оценки влияния длины пролета измерения сближения проводов были выполнены на комплексе экспериментальных линий [4] в натуральных пролетах длиной 50, 75 и 100 м. Измерения проводились в середине пролета с помощью специально раз-

работанного для этих целей устройства [5]. Предложенная конструкция удобна в эксплуатации, так как позволяет производить необходимые измерения и настройку прибора непосредственно на земле, без подъема персонала на высоту подвеса проводов, где устанавливается само устройство. Траверсы, установленные на опорах, снабжены натяжными устройствами для изменения величины стрел провеса проводов. Измерения проводились при скоростях ветра 6,5...18,5 м/с. Угол между направлением ветра и осью пролета составлял  $90 \pm 25^\circ$ , коэффициент разрегулировки стрел провеса проводов – 0,2.

Результаты измерений расстояний между проводами при их максимальных сближениях представлены в таблице.

**Минимальные расстояния между проводами в пролетах разной длины**

Скорость ветра, м/с	Минимальные расстояния между проводами (м) в пролетах длиной, м		
	50	75	100
6,5	1,08	1,09	1,10
7,2	1,07	1,08	1,09
8,0	1,06	1,07	1,08
9,2	1,03	1,05	1,06
10,0	1,01	1,03	1,05
11,2	0,96	0,99	1,02
12,5	0,93	0,96	1,00
14,0	0,87	0,92	0,98
15,2	0,83	0,89	0,95
16,5	0,77	0,85	0,93
17,4	0,74	0,82	0,91
18,5	0,69	0,78	0,88

Анализ полученных результатов показал, что с уменьшением длины пролета расстояния между проводами при их максимальных сближениях снижаются. Чем выше скорость ветра, тем более существенным оказывается влияние длины пролета. При скоростях ветра 16,5...18,5 м/с эти расстояния в пролете длиной 50 м в 1,21...1,28 раза меньше, чем в пролете длиной 100 м.

Измерения расстояний между проводами при их сближениях под действием ветра в пролете длиной 50 м показали, что увеличение коэффициента разрегулировки стрел провеса  $\delta$ , на 0,1 вызывает уменьшение расстояния между проводами при их макси-

мальных сближениях в среднем на 0,05...0,15 м.

Были выполнены исследования влияния на перемещения проводов направления ветра. Для этого данные наблюдений группировались по различным направлениям скорости ветра к оси пролета: 20...40°, 40...60°, 60...80°, 80...100°.

В диапазоне углов 40...90° максимальные перемещения проводов отличаются незначительно (0,04...0,06 м), т. е. изменение направления ветра в этих пределах практически не влияет на величину перемещений и расстояния между проводами при их колебаниях под действием ветра. При углах менее 40° величина перемещения проводов резко снижает-

ся (при скорости ветра 18...20 м/с величина сближения не превышает 0,23 м) и возникновение опасных сближений проводов при таких направлениях ветра исключается.

Для предотвращения опасных сближений и схлестываний проводов ВЛ 6–10 кВ при воздействии ветра разработан гаситель маятниковых колебаний проводов (рис. 2) [6].

Гаситель выполнен в виде колец 1, жестко закрепленных на проводе 2. В кольцах 1 расположен груз в виде стержня 3, снабженного ограничителями продольного перемещения 4. Перемещения стержня внутри колец синхронизируются с раскачиванием провода, а периодическая реакция, создаваемая движущимся элементом, противодействует колебаниям провода, уменьшая их амплитуды.

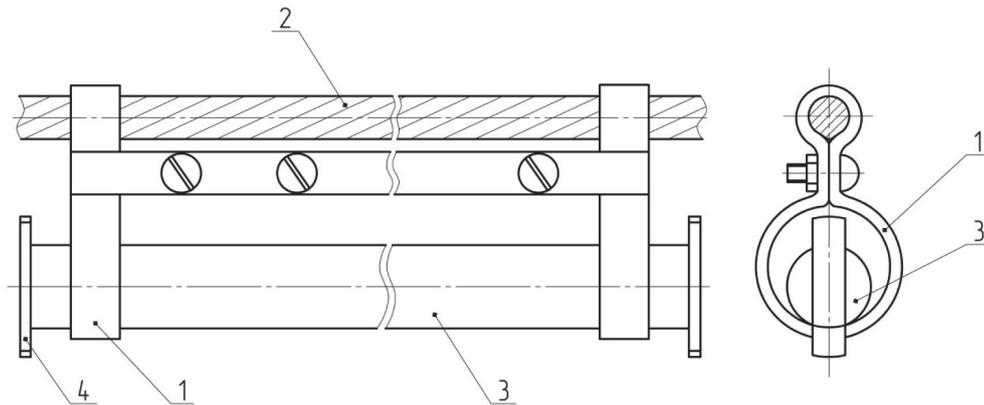


Рис. 2. Гаситель маятниковых колебаний проводов

Для сельских ВЛ 6–10 кВ с длиной пролета 50...60 м масса стержня гасителя составляет 7,35...8,35 Н при диаметре колец 0,12...0,15 м [7]. Длина гасителя выбирается в пределах 0,30...0,40 м.

Гасители монтируют с телескопической вышки на каждом проводе в зоне 1/2 длины пролета. При установке гасителей на двух проводах в пролете необходимо обеспечивать смещение между ними с целью уменьшения сближения гасителей при маятниковых колебаниях проводов.

Сравнительные измерения сближения двух горизонтально расположенных проводов с гасителями и без них были выполнены в течение трех лет в двух натуральных пролетах. Длина каждого пролета составляла 50 м, расположение проводов треугольником, расстояние между проводами по горизонтали – 1,2 м, стрела провеса – 0,6 м, провод марки АС-50/8,0. Гасители маятниковых колебаний с расчетными параметрами монтировали на двух проводах в середине первого пролета со смещением 0,7...0,8 м. Во втором пролете гасители не устанавливались. Замеры проводились при скоростях ветра 10...18 м/с, направлениях под углом 90° к оси пролета, коэффициентах разгрузки стрел провеса проводов – 0,2...0,5.

Результаты проведенных измерений показали, что расстояния между проводами при их максимальных сближениях в пролете с гасителями в 1,35...1,53 раза больше, чем в пролете без гасителей.

Таким образом, одной из причин аварийных отключений сельских ВЛ 6–10 кВ является разрегулировка стрел провеса проводов в пролете, возникающая из-за недостаточной прочности или повреждения крепления провода к изолятору и его удлинения в одном из смежных пролетов. При одинаковом удлинении провода коэффициент разрегулировки стрел провеса проводов резко увеличивается с уменьшением длины пролета. Экспериментально установлено, что расстояния между проводами при их максимальных сближениях под действием ветра уменьшаются с увеличением коэффициента разрегулировки и уменьшением длины пролета. Для снижения аварийных отключений ВЛ 6–10 кВ предложена конструкция гасителя, снижающего амплитуды маятниковых колебаний проводов при воздействии ветра, работоспособность которого доказана экспериментально в натуральных пролетах. Гаситель колебаний проводов внедрен на предприятии Северных электросетей «Карагандаэнерго», на Калушском ПО «Хлорвинил» (Ивано-Франковская обл., Украина) и трех предприятиях Министерства гражданской авиации.

*Список литературы*

1. Кабашов В.Ю. Исследование условий возможного схлестывания проводов сельских ВЛ 6–10 кВ [Текст] / В.Ю. Кабашов // Электротехнические и

информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 2. – С. 9–12.

2. Андреевский В.Н. Эксплуатация воздушных линий электропередачи [Текст] / В.Н. Андреевский, А.Т. Голованов, А.С. Зеличенко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 616 с.

3. Справочник машиностроителя [Текст]: в 6 т. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машгиз, 1963. – Т. 1. – 592 с.

4. Кабашов В.Ю. Повышение надежности сельских воздушных линий 6–10 кВ в условиях воздействия ветровых нагрузок: монография [Текст] / В.Ю. Кабашов. – Уфа: Изд-во «Здравоохранение Башкортостана», 2009. – 140 с.

5. А. с. 834386 СССР, МКИЗ G01B5/10. Устройство для измерения сближения проводов при ветре [Текст] / В.Ю. Кабашов, Р.З. Шайхитдинов (СССР). – № 2815621/25–28; заявл. 07.09.79; опубл. 30.05.81, Бюл. № 20.

6. А. с. 712884 СССР, МКИ2 H02G7/14. Гаситель колебаний проводов [Текст] / В.Ю. Кабашов, Ю.Ж. Байрамгулов. – № 2639599/24-07; заявл. 03.07.78; опубл. 30.01.80, Бюл. № 4.

7. Кабашов В.Ю. Предотвращение опасных сближений проводов сельских ВЛ 6–10 кВ [Текст] / В.Ю. Кабашов, М.З. Нафиков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1989. – № 1. – С. 41–42.

## References

1. Kabashov V.Ju. Issledovanie uslovij vozmozhnogo shlestyvanija provodov sel'skih VL 6–10 kV [Tekst] / V.Ju. Kabashov // Jeletrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – Т. 9. – № 2. – С. 9–12.

2. Andrievskij V.N. Jekspluatacija vozdušnyh linij jeletroperedachi [Tekst] / V.N. Andrievskij, A.T. Golovanov, A.S. Zelichenko. – 3-e izd., pererab. i dop. – М.: Jenergija, 1976. – 616 s.

3. Spravochnik mashinostroitelja [Tekst]: v 6 t. – 3-e izd., pererab. i dop. – М.: Mashgiz, 1963. – Т. 1. – 592 s.

4. Kabashov V.Ju. Povыshenie nadezhnosti sel'skih vozdušnyh linij 6–10 kV v uslovijah vozdejstvija vetrovyh nagruzok: monografija [Tekst] / V.Ju. Kabashov. – Ufa: Izd-vo «Zdravoohranenie Bashkortostana», 2009. – 140 s.

5. А. s. 834386 SSSR, МКИЗ G01V5/10. Ustrojstvo dlja izmerenija sbliženija provodov pri vetre [Tekst] / V.Ju. Kabashov, R.Z. Shajhitdinov (SSSR). – № 2815621/25–28; zajavl. 07.09.79; opubl. 30.05.81, Bjul. № 20.

6. А. s. 712884 SSSR, МКИ2 H02G7/14. Gasitel' kolebanij provodov [Tekst] / V.Ju. Kabashov, Ju.Zh. Bajramgulov. – № 2639599/24-07; zajavl. 03.07.78; opubl. 30.01.80, Bjul. № 4.

7. Kabashov V.Ju. Predotvrashhenie opasnyh sbliženij provodov sel'skih VL 6–10 kV [Tekst] / V.Ju. Kabashov, M.Z. Nafikov // Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. – 1989. – № 1. – С. 41–42.

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

## DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS



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

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



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

магистрант факультета математики и информационных технологий ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», Россия, г. Уфа



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

доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории математической химии ФГБОУ науки «Институт нефтехимии и катализа Российской академии наук», Россия, г. Уфа



**Коледина К.Ф.**  
**Koledina K.F.**

кандидат физико-математических наук, доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедрой информатики и информационно-коммуникационных технологий ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа

УДК 519.876.2

### ИНФОРМАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ПОСТРОЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕАКЦИИ ГИДРОАЛЮМИНИРОВАНИЯ ОЛЕФЕНОВ ТРИИЗОБУТИЛАЛЮМИНИЕМ

Целенаправленное управление ходом химического взаимодействия является важнейшей задачей любого химика. Для решения проблемы используют два основных подхода – термодинамический и кинетический. Термодинамический анализ позволяет выявить, в какую сторону будет сдвинуто положение равновесия реакции в тех или иных условиях, а кинетический – с какой скоростью будут реагировать реагенты. Основными компонентами при рассмотрении задачи являются температура, давление и концентрация веществ. Опираясь на условие поставленной задачи, разработан информационный комплекс для построения кинетических моделей сложных реакций металлокомплексного катализа. В качестве объекта исследования рассматривалась реакция гидроалюминирования олефинов триизобутилалюминием в присутствии катализатора  $(C_3H_5)_2ZrCl_2$ . Информационный комплекс включает в себя базу экспериментальных и расчетных данных, методы анализа жесткости системы, методы решения прямой и обратной задачи. Для решения прямой задачи использован метод Розенброка, который подходит для решения жестких задач. Обратная задача была решена с помощью метода генетического алгоритма, который состоит из следующих шагов: подготовительный шаг, отбор, скрещивание, мутация, оценка решений и остановка алгоритма.

Выбранные алгоритмы позволяют находить решение прямой и обратной задач с приемлемой точно-

стью за короткий срок. С помощью разработанного информационного комплекса построена кинетическая модель исследуемой реакции.

В таблицах представлены константы скорости стадий и энергии активации. На основе кинетической модели рассмотрены способы управления химической реакцией, а именно варьирование концентраций исходных веществ. На рисунках представлены графики выхода продукта реакции в зависимости от концентраций исходных веществ. На основе полученных данных проанализированы различные ситуации, влияющие на скорость протекания данной реакции. Найдено соотношение исходных веществ, при котором максимальный выход продукта получается за короткое время.

*Ключевые слова:* выход продукта, информационный комплекс, катализатор, кинетическая модель, константа скорости, энергия активации.

## INFORMATION SYSTEM OF KINETIC MODELING OLEFIN HYDROALUMINATION REACTIONS WITH TRIISOBUTYLALUMINUM

Targeted management of the course of chemical interaction is the most important task of any chemist. Two main approaches – the thermodynamic and kinetic are used to solve the problem. Thermodynamic analysis allows to reveal in what direction the equilibrium position of the reaction will shift in different conditions, and the kinetic – the speed with which the reagents will react. The main components are temperature, pressure, and concentration of the substances in considering the problem. Based on the condition of the problem, the information system for constructing kinetic models of complex reactions of catalysis by metal is developed. The object of investigation was considered olefin hydroalumination reactions with triisobutylaluminum in the presence of a catalyst  $(C_3H_5)_2ZrCl_2$ . Information complex includes a database of experimental and computational data, analysis methods rigidity of the system, methods for solving direct and inverse problems. The Rosenbrock method was used to solve the direct problem, which is suitable for solving stiff problems. The inverse problem was solved using the method of genetic algorithm, which consists of the following steps: a preparatory step, selection, crossover, mutation, evaluation decisions and stop the algorithm. Selected algorithms are used to find the solution of direct and inverse problems with acceptable accuracy in a short time. The kinetic model of the reaction was constructed using developed information complex. The rate constant and the activation energy presented in the tables. Based on the kinetic model, the methods of controlling chemical reactions are presented, namely the variation in concentrations of the starting materials. The graphs of product yield of the reaction depending on the concentration of the starting materials are presented on the figures.

Based on this data various situations affecting the flow rate of the reaction were analyzed. The ratio of the initial substance is found, in which the maximum yield is obtained in a short time.

*Key words:* yield, information complex, catalyst, kinetic model, the rate constant, the activation energy.

Подавляющее большинство химических реакций находится во власти стихии. Они трудноконтролируемы: в одних случаях их просто не удается осуществить, хотя они в принципе осуществимы, в других – трудно остановить, например, горения и взрывы, в третьих случаях их трудно ввести в одно желаемое русло, так как они самопроизвольно создают десятки непредвиденных ответвлений с образованием сотен побочных продуктов. В самом общем виде методы управления химическими процессами можно подразделить на термодинамические и кинетические, а среди последних ведущую роль играют каталитические методы.

Основными рычагами управления реакцией выступают: температура, давление и концентрация реагирующих веществ [1].

В качестве объекта исследования рассмотрим

реакцию гидроалюминирования олефинов триизобутилалюминием (ТИБА) в присутствии катализатора  $(C_3H_5)_2ZrCl_2$ . Экспериментальные исследования проводились в лаборатории структурной химии Института нефтехимии и катализа РАН [2]. Был предложен следующий механизм реакции:

*Схема реакции:*

- 1)  $X_{15} + X_{14} \rightleftharpoons X_{18} + X_9$
- 2)  $X_{18} + X_9 \rightarrow X_{10} + X_{13}$
- 3)  $X_{10} + X_9 \rightarrow X_2 + X_{13} + X_{11}$
- 4)  $2X_2 \rightleftharpoons X_1$
- 5)  $X_2 + X_3 \rightarrow X_4 + X_5$
- 6)  $X_1 + X_5 \rightarrow X_8 + X_2$
- 7)  $X_2 + X_5 \rightarrow X_8$
- 8)  $X_8 + X_3 \rightarrow X_4 + 2X_5$
- 9)  $X_4 + X_5 \rightarrow X_7 + X_6$
- 10)  $X_1 + X_{14} \rightarrow X_8 + X_2 + X_{13}$

*Скорости стадий:*

$$w_1 = k_{20}x_{15}x_{14} - k_{-20}x_{18}x_9$$

$$w_2 = k_{14}x_{18}x_9$$

$$w_3 = k_8x_{10}x_9$$

$$w_4 = k_{12}x_2^2 - k_{11}x_1$$

$$w_5 = k_9x_2x_3$$

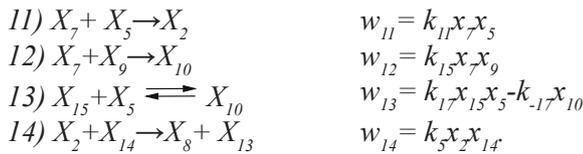
$$w_6 = k_2x_1x_5$$

$$w_7 = k_3x_2x_5$$

$$w_8 = k_{12}x_8x_3$$

$$w_9 = k_{10}x_4x_5$$

$$w_{10} = k_4x_1x_{14}$$



**Начальные концентрации:**  $x_3 = x_3^0, x_{14} = x_{14}^0, x_{15} = x_{15}^0$ .

Здесь  $X_1 = [Cp_2ZrH_2 \cdot ClAlBu_2]_2, X_2 = [Cp_2ZrH_2 \cdot ClAlBu_2], X_3 = CH_2CHR, X_4 = Cp_2ZrCl(CH_2CH_2R), X_5 = HAlBu_2$  - ДИБАГ,  $X_6 = Bu_2Al(CH_2CH_2R), X_7 = Cp_2ZrHCl, X_8 = [Cp_2ZrH_2 \cdot HAlBu_2 \cdot ClAlBu_2], X_9 = ClAlBu_2$  - ДИБАХ,  $X_{10} = [Cp_2ZrHCl \cdot ClAlBu_2], X_{11} = Cl_2AlBu, X_{13} = C_4H_8, X_{14} = AlBu_3, R = C_5H_{11}, C_6H_{13}, C_7H_{15}, C_8H_{17}, Bu = C_4H_9, Cp = C_5H_5, X_{15} = Cp_2ZrCl_2, X_{18} = Cp_2ZrClBu$ .

Реакция проводилась при трех температурах – 0, 10 и 20 °С. В данной реакции 14 стадий, 3 из которых являются обратимыми. Таким образом, необходимо найти 17 констант скоростей стадий. По механизму реакции выписана система обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, которая оказалась жесткой, поэтому для решения прямой задачи (нахождение концентраций веществ по заданным параметрам) использовался метод Розенброка. Для решения обратной задачи (определение кинетических параметров по заданным концентрациям) был выбран генетический алгоритм.

Генетический алгоритм – это эвристический алгоритм поиска, используется для решения задач оптимизации и моделирования путем случайного подбора, комбинирования и вариации искоемых параметров с применением механизмов, напоминающих биологическую эволюцию, является разновидностью эволюционных вычислений. Отличительная особенность генетического алгоритма – акцент на использовании оператора «скрещивания», производящего операцию

рекомбинации решений-кандидатов, роль которой аналогична роли скрещивания в живой природе [3].

Алгоритм состоит из нескольких шагов:

- Подготовительный шаг – формирование начальной популяции (начального набора кинетических параметров). Для формирования начальных параметров используется случайный процесс с целью получения большего разнообразия для поиска решений.

- Отбор – важный этап в алгоритме, отвечающий за выбор направления развития популяций, где чаще всего отбрасываются решения с низким значением функции приспособленности (fitness function), что способствует улучшению средней приспособленности всей популяции. (Отбираются те наборы кинетических констант, которые лучше других удовлетворяют экспериментальным данным.)

- Скрещивание – этап, на котором происходит образование новых решений в популяции, прошедшей через отбор, для восстановления численности. Особенность его в том, что при использовании скрещивания берутся два или более существующих решений в популяции, а из них – составные части (гены) и соединяются в новом решении, которое остается в популяции.

- Мутация – этап, который состоит в том, что в некоторых решениях из популяции происходят случайные изменения в генах. Этот процесс способствует увеличению разнообразия в популяции.

- Оценка решений и остановка алгоритма. Когда решение достигает заданной точности, т. е. найденный набор кинетических параметров удовлетворяет экспериментальным данным, происходит остановка алгоритма.

Таким образом, разработан программный комплекс для определения кинетических параметров. В результате решения задачи получен набор кинетических параметров (табл. 1–3) [4].

Таблица 1

**Кинетические параметры для общей реакции ГА триизобутилалюминием,  $[k_i]=[1/\text{мин}], [E_i]=[ккал/моль]$**

T°С	20	10	0	$E_a$
$k_1$	0,415	0,32	0,24	4,36
$k_{-1}$	30,88	20,17	12,77	7,02
$k_2$	3,4	2,29	1,54	6,3
$k_3$	148,26	93,31	58,28	7,43
$k_4$	0,18	0,14	0,11	3,92
$k_5$	58,5	30,41	5	19,67
$k_8$	131,02	68,73	34,39	10,64
$k_{11}$	420,3	201,61	110	10,65
$k_{14}$	311,3	136,18	91,18	9,72
$k_{15}$	1,6	0,14	0,051	27,27
$k_{17}$	0,9E-5	0,41E-5	0,18E-5	12,8
$k_{-17}$	20	10	3,5	13,89
$k_{20}$	157,7	81,4	41,4	10,64
$k_{-20}$	149,2	70,94	35	11,53

Кинетические константы для стадий с олефинами в общей реакции  
ГА триизобутилалюминием,  $[k_i]=[1/\text{мин}]$

T °C	олефин	гептен	октен	нонен	децен
20	$k_9$	179,69	209,44	222,83	236,22
	$k_{10}$	256,29	374,37	614,08	853,79
	$k_{12}$	0,8	1	5,65	30,3
10	$k_9$	95	100	102	121
	$k_{10}$	139,54	219,54	299,54	359,54
	$k_{12}$	0,55	0,6	1,6	3,6
0	$k_9$	44,4	65,4	68,4	79,4
	$k_{10}$	80	136,48	146,48	166,48
	$k_{12}$	0,3	0,35	0,7	1

Таблица 3

Энергии активации для стадий с олефинами в общей реакции  
ГА триизобутилалюминием,  $[E_i]=[ккал/моль]$

	гептен	октен	нонен	децен
$E_9$	11,13	9,23	9,36	8,65
$E_{10}$	9,25	8,02	11,4	12,99
$E_{12}$	7,82	8,35	33,8	23,9

Управление химическими реакциями является актуальной задачей. Варьируя концентрацию исходных веществ, можно влиять на выход продукта. Было проанализировано влияние катализатора, ТИБА и олефина на выход продукта  $\text{Cu}_2\text{Al}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{R})$ .

При уменьшении количества катализатора (рис.

1б) на 33% максимальный выход продукта можно получить за 770 мин, что в 2,1 раза медленнее, чем при заданном количестве катализатора. При увеличении количества катализатора (рис. 1а) в 5,5 раза максимальный выход продукта можно получить за 15 мин, что в 21 раз быстрее, чем при заданном количестве катализатора.

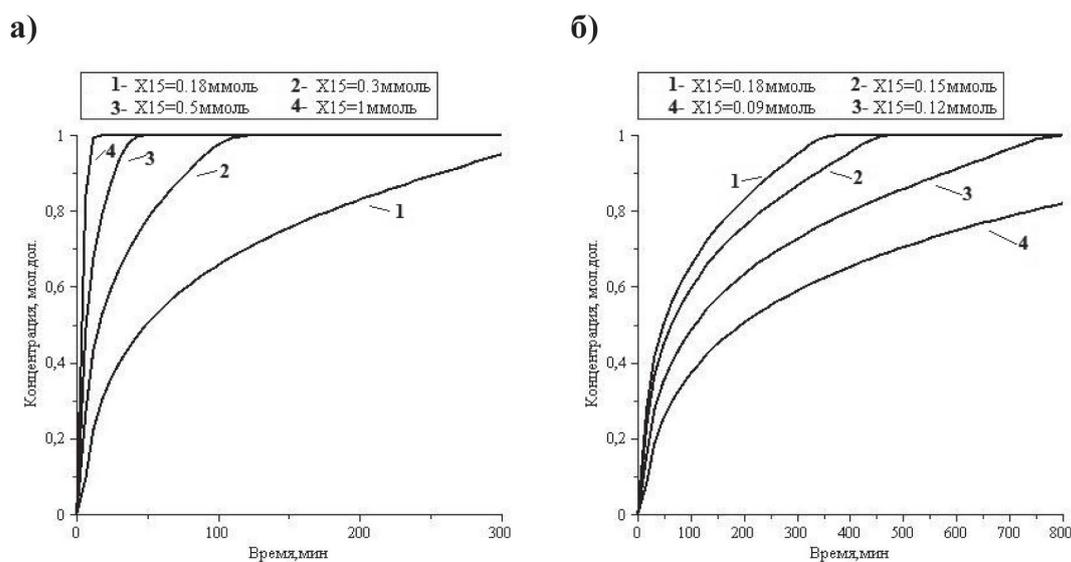


Рис. 1. Влияние катализатора на выход продукта

Таким образом, варьируя начальное количество катализатора, можно предсказать оптимальное время протекания реакции.

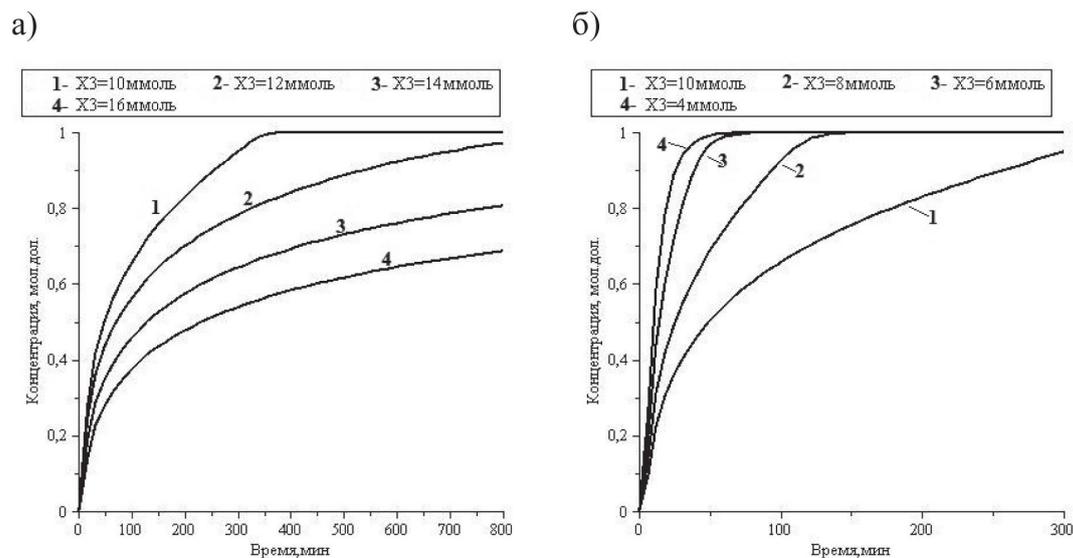


Рис. 2. Влияние ТИБА на выход продукта

При уменьшении количества ТИБА (рис. 2б) на 17% максимальный выход продукта (99,8%) можно получить в 2 раза медленнее, однако при дальнейшем уменьшении ТИБА максимальный выход продукта, который можно получить, составит всего

50 %. При увеличении количества ТИБА (рис. 2а) на 33% максимальный выход продукта можно получить в 2 раза быстрее, однако при дальнейшем увеличении ТИБА время реакции не уменьшается.

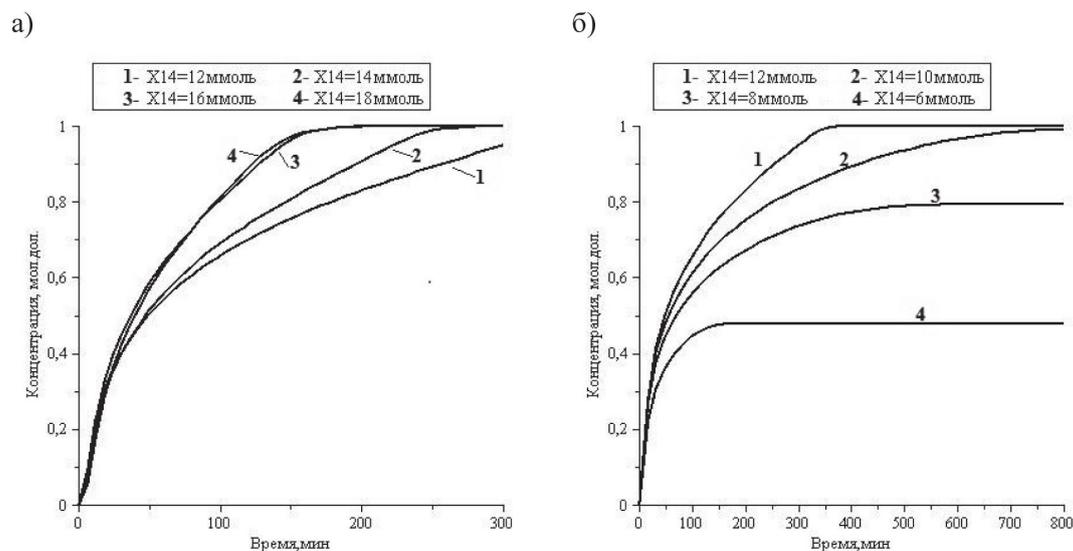


Рис. 3. Влияние олефина на выход продукта

При увеличении количества олефина (рис. 3а) на 20% максимальный выход продукта (99,8%) можно получить в 2,5 раза медленнее, при дальнейшем увеличении олефина получение 99,8% выхода продукта сильно замедляется. При уменьшении количества олефина (рис. 3б) на 20% время реакции резко сокращается, при уменьшении олефина на 60% составляет всего 50 минут, что в 7 раз быстрее, чем при заданном количестве олефина.

Таким образом, на основе вычислительных экспериментов при использовании разработанного информационного комплекса было найдено такое соотношение исходных веществ X3:X14:X15=10:12:1 (рис. 4), при котором максимальный выход продукта – 99,8% достигается за 15 минут, при этом конверсия исходных веществ составляет 95–99%.

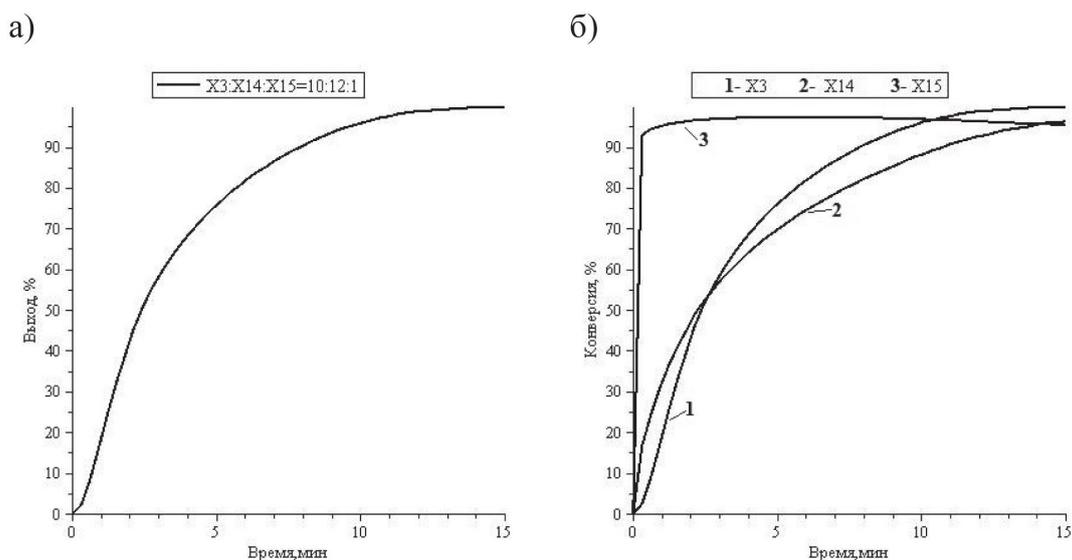


Рис. 4: а) выход продукта; б) конверсия реагентов при соотношении X3:X14:X15 = 10:12:1

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

#### Список литературы

1. Кушхов Х.Б. Современные проблемы химии. Курс лекций [Текст] / Х.Б. Кушхов. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2003. – 46 с.
2. Парфенова Л.В. Исследование механизма гидроалюминирования олефинов алкилаланами, катализируемого  $\text{Cr}_2\text{ZrCl}_2$  [Текст] / Л.В. Парфенова, С.В. Печаткина, Л.М. Халилов, У.М. Джемилев // Изв. РАН, сер. «Хим». – 2005. – Т. 2. – С. 311–322.
3. Морov В.А. Применение генетического алгоритма к задачам оптимизации. Реализация генетического алгоритма для задачи коммивояжера [Текст] / В.А. Морov // Вестник Амурского государственного университета. Серия: естественные и экономические науки. – 2012. – № 57. – С. 18–22.
4. Ахметов И.В. Математическое моделирование сложных химических реакций в присутствии металлокомплексных катализаторов на основе многоядерных вычислительных систем [Текст] / И.В. Ахметов, Ю.О. Бобренева, И.М. Губайдуллин, А.В. Новичкова // Системы управления и информационные технологии. – 2013. – Т. 52. – № 2.1. – С. 111–115.

#### References

1. Kushhov H.B. Sovremennye problemy himii. Kurs lekcij.[Tekst] / H.B.Kushhov. – Nal'chik: Kab.-Balk. un-t, 2003. – 46 s.
2. Parfjonova L.V. Issledovanie mehanizma gidroaljumirovanija olefinov alkilalanami, kataliziruемого  $\text{Cr}_2\text{ZrCl}_2$  [Tekst] / L.V. Parfjonova, S.V. Pechatkina, L.M. Halilov, U.M. Dzhemilev // Izv. RAN, ser. «Him». – 2005. – T. 2. – S. 311–322.
3. Morov V.A. Primenenie geneticheskogo algoritma k zadacham optimizacii. Realizacija geneticheskogo algoritma dlja zadachi kommivojazhera [Tekst] / V.A. Morov // Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: estestvennye i jekonomicheskie nauki. – 2012. – № 57. – S. 18–22.
4. Ahmetov I.V. Matematicheskoe modelirovanie slozhnyh himicheskikh reakcij v prisutstvii metallokompleksnyh katalizatorov na osnove mnogojadernyh vychislitel'nyh sistem [Tekst] / I.V. Ahmetov, Ju.O. Bobreneva, I.M. Gubajdullin, A.V. Novichkova //Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii. – 2013. – T. 52. – № 2.1. – S. 111–115.



**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*



**Кучеров Б.А.**  
**Kuchеров B.A.**

*аспирант кафедры «Информационные  
технологии и управляющие системы»  
ГБОУ ВПО МО «Финансово-технологическая  
академия», Россия, г. Королев*

УДК 681.5.034

## **АЛГОРИТМЫ АДАПТАЦИИ ЛИНИЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ ПО МОЩНОСТИ ПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ ПРИ РАБОТЕ В СОСТАВЕ УЗЛОВОЙ СЕТИ**

В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с осуществлением анализа оценки эффективности методов регулирования мощности и скорости работы земных станций линий спутниковой связи при их работе в составе узловой сети. Проведены расчеты коэффициента помехозащищенности для различных значений скорости передачи и добротности. Показано, что при отсутствии помех или других станций в полосе можно уменьшить мощность земной станции до определенного предела почти без потери относительной помехозащищенности. При наличии преднамеренных помех уменьшать мощность земной станции необходимо до величины, равной сумме эффективной изотропно-излучаемой мощности земной станции и коэффициента помехозащищенности, превышающего мощность действующей помехи. Рассмотрен случай, когда в четвертом стволе ретранслятора в режиме с прямой ретрансляцией работают  $N$  одинаковых узловых сетей в помехозащищенном режиме с одной узловой станцией и четыремя также одинаковыми, с точки зрения энергетических параметров, оконечными станциями при заданной скорости передачи в каждом направлении. Показано, что возможное изменение мощности узловой станции без значительного изменения помехозащищенности ограничивается слева влиянием шумов ретранслятора и сигналов оконечных станций, как помех, а справа – за счет влияния сигналов других направлений связи узловой земной станции. Проведенный анализ показал, что при работе средств спутниковой связи через ретранслятор в режиме прямой ретрансляции сигналов регулировка мощности земных станций позволяет уменьшить энергетические затраты при незначительном уменьшении относительной помехозащищенности или скорости передачи информации. В качестве критерия оптимизации энергетических затрат при заданной помехозащищенности направлений можно выбрать критерий минимума суммарной мощности земных станций при установленном проценте снижения скорости передачи информации относительно максимальной скорости, достигаемой при максимальных значениях мощности передающих устройств.

*Ключевые слова:* сети спутниковой связи, помехозащищенность, земная станция, космический аппарат, ретранслятор, мощность передающих устройств, скорость передачи.

## **ADAPTATION ALGORITHMS OF SATELLITE COMMUNICATION LINKS BY TRANSMITTER POWER ON GROUND STATIONS WHEN WORKING AS PART OF A MESHED NETWORK**

Issues of analysis of evaluating the effectiveness of methods to adjust power and rate of the ground stations of satellite communication links when working as part of a meshed network are considered. Calculations of noise

immunity coefficient for different values of transmission speed and reactance factor are performed. It is shown that in the absence of interference signal or other stations in the band the power of ground station can be reduced to a certain limit almost without losing relative noise immunity. In the presence of intentional interference it is necessary to reduce the power of ground station to value equal to the sum of the effective isotropic radiated power of ground station and the coefficient of noise immunity greater than the current power of interference. The case where in the fourth repeater channel in the mode with direct relaying  $N$  identical nodal networks work in anti-interference mode with one nodal station and four identical in terms of energy parameters terminal stations at a given rate in each direction is considered. It is shown that a possible change of nodal station power without significantly changing noise immunity is limited to the influence of repeater noise and terminal stations signal such as interference on the left and to the influence of other communication direction nodal ground stations signals on the right. The analysis showed that when satellite transmission facilities work through repeater in the direct relaying mode adjustment of ground station power allow to reduce energy costs with a slight decrease relative noise immunity or transmission rate. As a criterion for energy cost optimization for a specified noise immunity the criterion of a minimum total ground stations power with a fixed percentage transmission rate reduction regarding the maximum speed reached at the maximum values of the transmission devices power can be chosen.

*Key words:* satellite communication network, noise immunity, ground station, spacecraft, repeater, transmission devices power, transmission rate.

Наиболее сложной задачей регулирования мощностей земных станций (ЗС) и скорости их работы с целью повышения эффективности системы спутниковой связи является задача регулирования при работе их в стволе с прямой ретрансляцией, так как в данном случае на эффективность использования энергетики ретранслятора (РТР) влияет много факторов [1]. Это и отбор мощности РТР сильной в энергетическом отношении станцией, и подавление мощной помехи сигналов ЗС, различные амплитудно-модулированные и фазомодулированные (АМ–ФМ) преобразования, и непосредственное взаимное влияние станций друг на друга при перекрытии спектров их сигналов.

При работе через прямой ствол многих ЗС у них, в общем случае, могут быть различными скорость передачи информации, эффективная изотропно-излучаемая мощность (ЭИИМ), условия распространения. При независимом управлении этих линий связи их параметры могут изменяться случайным для других линий связи образом. Как было показано в [1], чисто случайный характер носит изменение затуханий в каналах связи при работе ЗС в различных климатических зонах. Параметры преднамеренных помех также, естественно, случайны.

Таким образом, отношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности помехи на входе приемника любой линии спутниковой связи, работающей через один ствол с другими линиями в режиме с прямой ретрансляцией (ПР), зависит от параметров этих линий и многих других факторов, обусловленных взаимодействием сигналов в РТР, и в общем случае является случайной величиной.

При работе в стволе одной узловой сети организовать регулирование параметров радиолинии с

целью повышения ее эффективности возможно, так как узловая ЗС (УЗС) имеет канал управления, по которому может осуществлять контроль за режимами работы оконечных ЗС (ОЗС) и регулировать их мощность и скорость передачи [1–3]. Кроме того, УЗС имеет, как правило, возможность принимать свой передаваемый сигнал, так как обычно работает в одной зоне с ОЗС. Следовательно, в этом случае возможен не только косвенный контроль за параметрами радиолинии, но и непосредственное измерение параметров сигнала на выходе РТР.

Аналогичное управление параметрами радиолинии возможно при работе в стволе нескольких узловых сетей и если они имеют связь с приемопередающим центром (ППЦ) по информационным каналам или по каналу управления [4–6]. При этом ППЦ, как правило, также может наблюдать сигнал с выхода РТР. Централизованное регулирование, если оно возможно, является наилучшим, так как обеспечивает большую точность и минимальное время адаптации.

Для более строгого и детального обоснования высказанных выше соображений, проведем оценку эффективности методов регулирования мощности и скорости работы ЗС.

Рассмотрим сначала наиболее простой случай на примере работы РТР «Бастион» и КА «Глобус 1», когда в 4-м стволе РТР «Бастион» КА «Глобус 1» работает одна ЗС в помехозащищенном режиме. Характеристики сигнала соответствуют характеристикам аппаратуры помехозащиты (АПЗ) «Кулон-ШМЗ» [2].

Для расчета коэффициента помехозащиты  $q$  (отношение мощности помехи  $P_{п.вх.1}$ , попадающей в спектр сигнала, к мощности сигнала  $P_{с.вх}$  земной станции на входе РТР) воспользуемся результатами,

полученными в работе [1] при получении общего выражения для допустимого отношения мощностей внешней помехи на входе РТР, попадающей в спектр

сигнала, и сигнала в зависимости от требуемого качества приема:

$$\rho_{п.вн.1} = P_{п.вн.1} / P_{с.вх.ртр} = [A - \rho_{п.вн.2} - \rho_{ст.2} - (P_{ртр} - P_c) / \mathcal{E}_{3-с} - \rho_3 B (\mathcal{E}_{с-3} / P_c)] \times [(\mathcal{E}_{с-3} / P_c) + 1 + \rho_3 (\mathcal{E}_{с-3} / P_c)]^{-1} - \rho_{ст.1} - (P_c / \mathcal{E}_{3-с}), \quad (1)$$

где:  $A = (\mathcal{E}_{с-3} / h_{зс} V_c) \gamma$ ;  $B = \rho_{п.вн.2} + \rho_{ст.2} + (P_{ртр} - P_c) / \mathcal{E}_{3-с} + \gamma$ ;  $h_{зс}$  – качество приема дискретных широкополосных сигналов наземным приемником при условии малой нестабильности несущей частоты;  $\gamma < 1$  – влияние нелинейности борта, оценивающееся числом, показывающим, во сколько раз изменяется отношение сигнал/помеха (ОСП) при прохождении РТР;  $\rho_{п.вн.2} = P_{п.вн.2} / P_{с.вх.ртр}$  – превышение внешней помехи, действующей вне полосы частот сигнала, над сигналом ЗС на входе РТР;  $P_{п.вн.1}$  и  $P_{п.вн.2}$  – соответственно мощность внешних помех в полосе и вне полосы сигнала на входе РТР;  $P_{с.вх.ртр}$  – мощность сигнала ЗС на входе РТР;  $\rho_{ст.1}$  – отношение суммы мощностей сигналов станций, работающих в одной полосе частот с рассматриваемой станцией, к мощности сигнала этой же станции;  $\rho_{ст.2}$  – то же

для станций, работающих вне полосы частот с рассматриваемой станцией;  $P_c$  – полоса частот сигнала;  $P_{ртр}$  – ширина полосы пропускания РТР;  $\mathcal{E}_{3-с}$  и  $\mathcal{E}_{с-3}$  – соответственно энергетический параметр участка Земля – спутник и спутник – Земля;  $V_c$  – скорость передачи информационных символов в бодах;  $\rho_3$  – превышение внешней помехи на входе приемника ЗС над сигналом РТР.

На рис. 1 представлены результаты расчета коэффициента помехозащиты  $q$  с использованием выражения (1), полученного для скоростей передачи 1,5 Кбит/с сплошными линиями и 6 Кбит/с пунктирными. Кривые 1 соответствуют добротности приемной антенны средних ЗС  $G/T = 7,5$  дБ/К, а кривые 2 – добротности малых станций  $G/T = -4$  дБ/К.

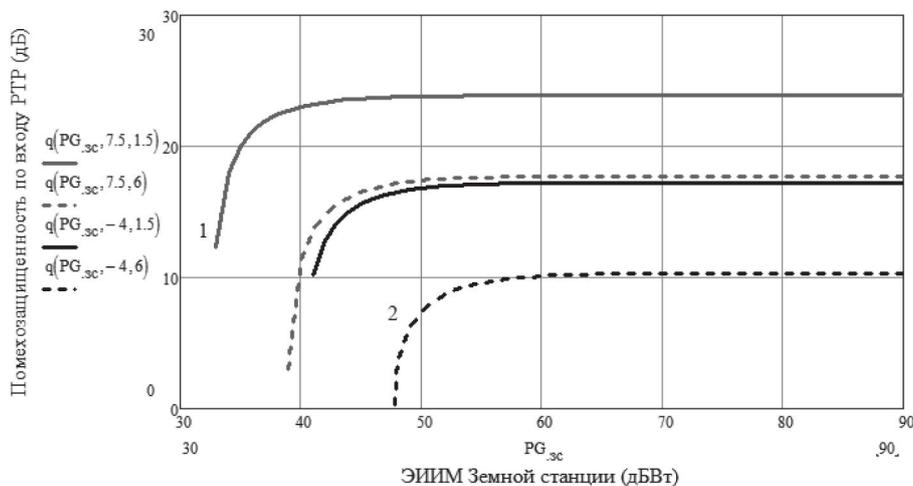


Рис. 1. Помехозащитенность по входу РТР при работе одной станции в стволе

Заметим, что добротность  $Q$  – это отношение эффективного усиления по мощности антенны к эффективной шумовой температуре  $G/T$  (дБ/ К) всего внешнего блока приемного устройства.

Из представленных результатов видно, что коэффициент относительной помехозащитенности (ПЗ) уменьшается незначительно при уменьшении мощности ЗС до определенного предела, после которого наступает резкое уменьшение  $q$ . Чем выше скорость передачи и чем меньше добротность при-

емной системы ЗС, тем меньше допустимый предел уменьшения мощности ЗС. Существование данного предела объясняется влиянием внутренних шумов РТР и ЗС.

Таким образом, при отсутствии помех или других станций в полосе можно уменьшить мощность ЗС до определенного предела почти без потери относительной ПЗ. В качестве критерия оптимизации, при установленной скорости передачи информации, может быть выбран минимум мощности ЗС при за-

данной степени уменьшения относительной помехозащищенности от достигаемой в случае максимальной мощности ЗС, например 1%.

При наличии преднамеренных помех уменьшать мощность ЗС необходимо до величины, равной сумме ЭИИМ ЗС и коэффициента ПЗ в децибелах, превышающей мощность действующей помехи. Например, при действии помехи с ЭИИМ 80 дБВт ЭИИМ ЗС при скорости передачи информации 1,5 Кбит/с с  $G/T = 7,5$  дБ/К можно уменьшить до 56 дБВт. При этом относительная ПЗ составит 24 дБ. Очевидно, что в качестве помех можно рассматривать сигналы

других ЗС, работающих в данной полосе.

Так как рост ПЗ при использовании сигнальных методов помехозащиты достигается за счет уменьшения пропускной способности линии связи, то для повышения ПЗ необходимо уменьшать скорость передачи информации. На рис. 2 показаны зависимости пропускной способности от ЭИИМ ЗС при различной ПЗ, полученные с использованием выражения (1), где сплошные линии рассчитаны при  $G/T = 7,5$  дБ/К, пунктирные –  $G/T = -4$  дБ/К, кривые 1 соответствуют  $q = 1$  дБ, 2 –  $q = 10$  дБ, 3 –  $q = 25$  дБ.

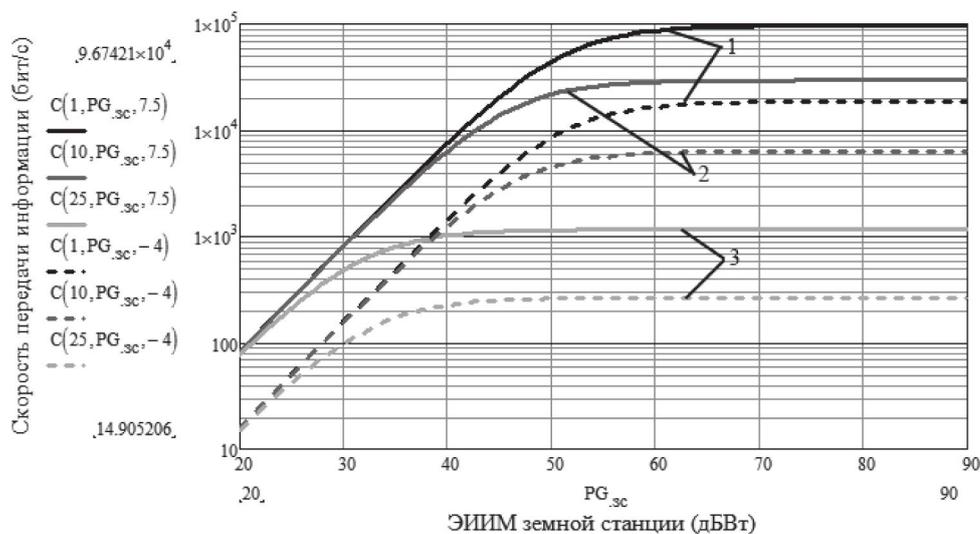


Рис. 2. Скорость передачи информации при заданной помехозащищенности для одной станции в стволе

Как видно из кривых, представленных на рис. 2, предел, до которого можно уменьшить ЭИИМ ЗС при заданной ПЗ, не уменьшая скорости передачи информации, почти не зависит от добротности приемной системы ЗС. Увеличение ЭИИМ ЗС выше этого предела при заданной добротности приемной системы ЗС не приводит к значительному увеличению пропускной способности линии связи, так как она ограничивается пропускной способностью РТР. Однако увеличение  $G/T$  приводит к общему увеличению пропускной способности линии связи. Уменьшение мощности ЗС сверх указанного предела приводит к недоиспользованию пропускной способности РТР из-за ослабления энергетики линии вверх и тем самым к уменьшению пропускной способности линии спутниковой связи в целом.

Таким образом, в качестве критерия оптимизации мощности ЗС при установленной помехозащищенности может быть минимум мощности ЗС при заданной степени снижения скорости передачи информации от достигаемой при работе ЗС с максимальной мощностью.

Далее рассмотрим такую же радиолинию с одной передающей станцией в стволе, но при дополнительном воздействии помехи по входу приемника одной из приемной ЗС. Результаты расчета ПЗ линии связи с этой станцией в зависимости от ЭИИМ передающей станции при скорости передачи 1,5 Кбит/с показаны на рис. 3.

Сплошными линиями показаны результаты расчета при превышении мощности помехи над мощностью сигнала на входе ЗС на 10 дБ, пунктирными линиями – на 20 дБ. Кривые 1 соответствуют  $G/T = 7,5$  дБ/К, кривые 2 –  $G/T = -4$  дБ/К.

При сравнении зависимостей, представленных на рис. 1 и 3, видно, что помехозащищенность по входу РТР уменьшается на величину, равную примерно отношению мощности помехи по входу ЗС к мощности сигнала на входе ЗС. Кроме того, величина данного отношения влияет и на значения предела, до которого можно уменьшить ЭИИМ ЗС.

Сравнение сплошных и пунктирных кривых 1, 2 на рис. 3 со сплошными кривыми на рис. 1 показывает, что с увеличением мощности помехи по входу

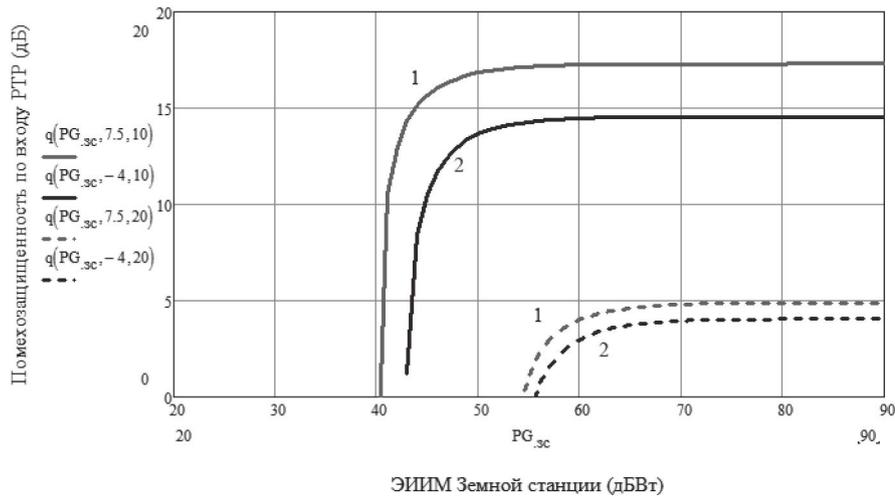


Рис. 3. Помехозащищенность одного направления связи по входу РТР при воздействии помехи на приемную ЗС

ЗС увеличивается значение предела регулирования мощности ЗС. При этом влияние добротности приемной ЗС на величину предела регулирования мощности передающей ЗС уменьшается при увеличении мощности помехи по входу ЗС. Однако и в этом случае в качестве критерия оптимизации при установленной скорости передачи информации может быть выбран минимум мощности ЗС при заданной степени уменьшения относительной помехозащищенности от достигаемой в случае максимальной мощности ЗС.

Воздействие помехи по входу ЗС при сохране-

нии требований на ПЗ по входу РТР требует уменьшения скорости передачи информации. Это видно из результатов расчета скорости передачи такой линии связи, в зависимости от ЭИИМ передающей ЗС, представленных на рис. 4, при сравнении их с аналогичными результатами, приведенными на рис. 2.

Расчеты проводились для приемной ЗС с  $G/T = 7,5$  дБ/К. Сплошные линии соответствуют отношению мощности помехи по входу приемной ЗС к мощности сигнала 10 дБ, пунктирные – 20 дБ. Кривые 1 для  $q = 1$  дБ, 2 –  $q = 10$  дБ, 3 –  $q = 20$  дБ.

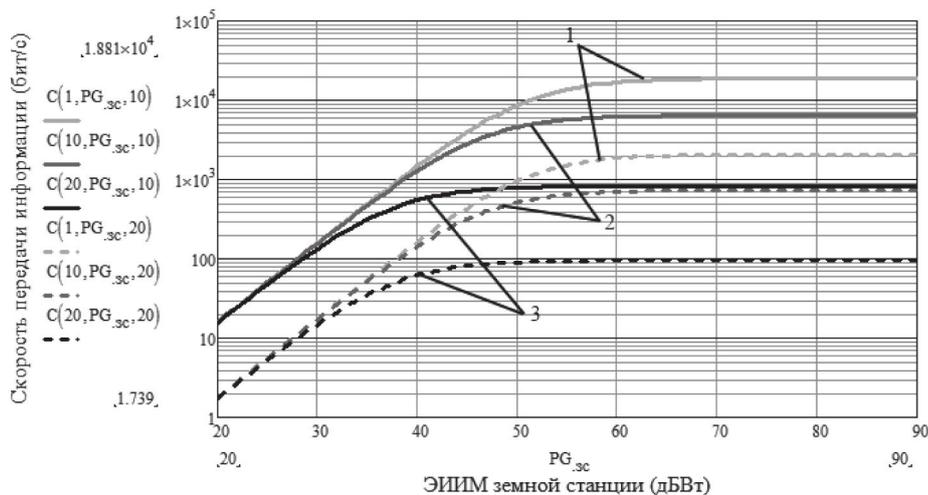


Рис. 4. Скорость передачи информации в одном направлении связи при воздействии помехи по входу приемной ЗС

Сравнение кривых 1–3 на рис. 2 и 4 показывает, что с ростом мощности помехи по входу ЗС предел, до которого можно уменьшать ЭИИМ передающей ЗС без значительного уменьшения пропускной способности линии связи, увеличивается незначительно. Основное влияние мощности помехи по входу ЗС сказывается на уменьшении пропускной способности линии связи с такой станцией. В этом случае, так же как и в предыдущем, в качестве критерия оптимизации мощности ЗС при установленной помехозащищенности может быть минимум мощности ЗС при заданной степени снижения скорости передачи информации от достигаемой, при работе ЗС с максимальной мощностью.

Рассмотрим далее более сложный случай, когда в 4-м стволе РТР в режиме с прямой ретрансляцией работают  $N$  одинаковых узловых сетей в помехозащищенном режиме с одной узловой станцией (УЗС)

и четырьмя также одинаковыми, с точки зрения энергетических параметров, оконечными станциями (ОЗС) при скорости передачи в каждом направлении 1,5 Кбит/с (микроузловые сети).

Сначала предположим, что помеха может воздействовать только по входу РТР. При этом будем полагать, что мощность УЗС делится одинаково между 4-мя направлениями связи. В соответствии с тем, что полоса РТР и полоса ШПС равны по 40 МГц, все станции будут работать в одной полосе и, следовательно, являться друг для друга помехами.

На рис. 5 показаны зависимости ПЗ от ЭИИМ УЗС для станций с  $G/T = 7,5$  дБ/К при ЭИИМ ОЗС 59 дБВт. Предполагается, что все УЗС имеют одинаковую ЭИИМ. Сплошными линиями показана ПЗ направления УЗС – РТР – ОЗС, пунктирными – ОЗС – РТР – УЗС. Кривые 1 соответствуют работе в стволе одной микроузловой сети, 2 – 10-ти, 3 – 20-ти.

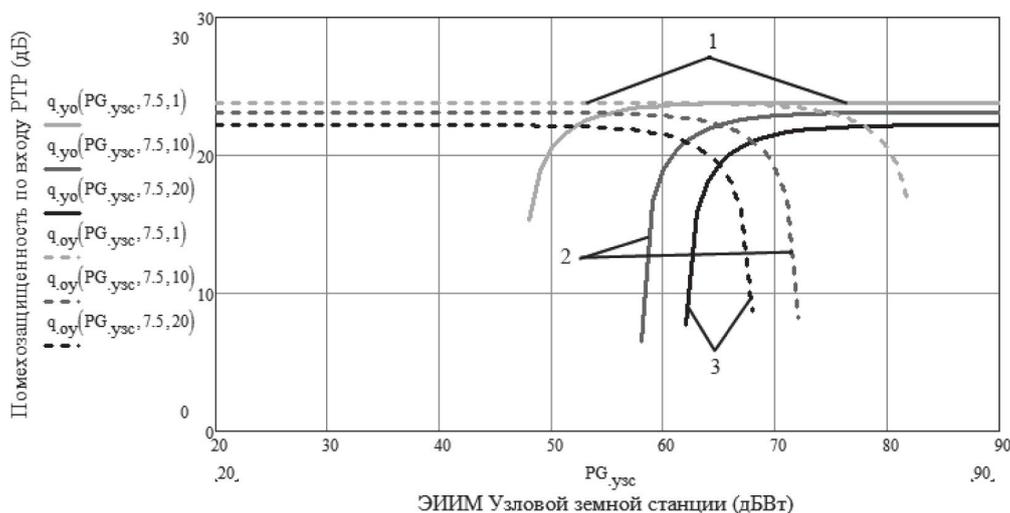


Рис. 5. Зависимость помехозащищенности по входу РТР различного числа микроузловых сетей от ЭИИМ узловых станций

При работе  $N$  одинаковых узловых сетей отношение мощности помехи от других ЗС к мощности УЗС в одном направлении связи вычисляется по формуле:

$$v_{1uzs} = 4N[1 + 4(PG_{озс}/PG_{узс})] - 1. \quad (2)$$

Соответствующее отношение мощности помехи других ЗС к мощности какой-либо ОЗС вычисляется по формуле:

$$v_{1озс} = N[4 + (PG_{узс}/PG_{озс})] - 1. \quad (3)$$

Возможное изменение мощности УЗС без значительного изменения ПЗ ограничивается слева влиянием шумов РТР и сигналов ОЗС, как помех, а справа – за счет влияния сигналов других направлений связи УЗС. Как видно из представленного ри-

сунка, с ростом числа узловых сетей сокращается область допустимого изменения мощности УЗС, т.е. требуется более точная регулировка мощности ЗС.

На рис. 6 показаны аналогичные зависимости при изменении мощности оконечных ЗС. При этом ЭИИМ УЗС выбрана в соответствии с рис. 5 равной 65 дБВт. Как видно из рис. 5, при этом значении обеспечивается максимально возможная ПЗ при любом числе микроузловых сетей.

Значения ЭИИМ ОЗС ограничиваются справа влиянием сигналов ОЗС, как помех, а слева – влиянием шумов РТР и сигналов УЗС, как помех. Если значение мощности УЗС увеличить, то мощность ОЗС надо также увеличивать.

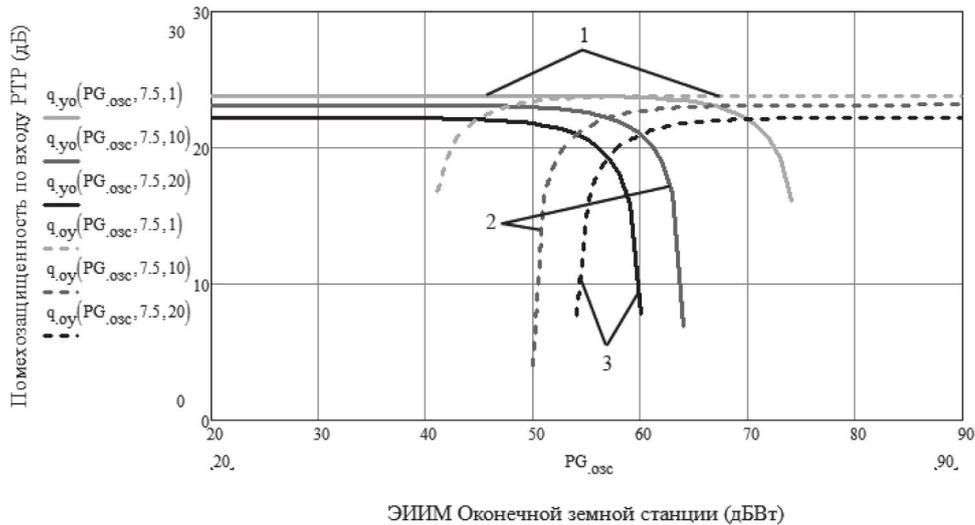


Рис. 6. Зависимость помехозащищенности по входу РТР различного числа микроузловых сетей от ЭИИМ оконечных станций

На рис. 7 приведены аналогичные рис. 6 кривые, рассчитанные при ЭИИМ УЗС 90 дБВт. Из рисунка наглядно видно смещение границ регулирования вправо.

Таким образом, в качестве критерия оптимизации мощности станций микроузловой сети при

установленном числе узловых сетей и скорости передачи информации может быть выбран минимум суммарной мощности ЗС при заданной степени уменьшения относительной помехозащищенности от достигаемой в случае максимальной мощности ЗС в обоих направлениях.

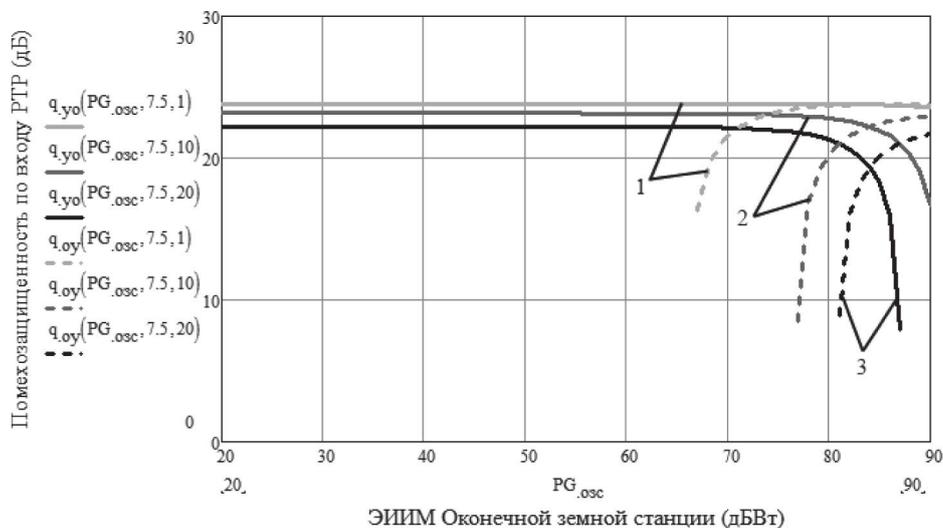


Рис. 7. Зависимость помехозащищенности по входу РТР нескольких микроузловых сетей от ЭИИМ оконечных станций

При заданных требованиях по помехозащищенности регулирование мощности какой-либо ЗС влияет на скорость передачи информации направлений связи, работающих в стволе.

На рис. 8 показаны результаты расчета возможной скорости передачи информации станциями микроузловой сети в направлении УЗС–ОЗС (сплошные кривые) и ОЗС–УЗС (пунктирные кривые) при

требуемой помехозащищенности по входу РТР 10 дБ. Кривые 1 рассчитаны для одной микроузловой сети, кривые 2 – для  $N = 10$ , кривые 3 – для  $N = 100$ .

Аналогичный вид имеют кривые и при регулировании мощности ОЗС. Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что в качестве критерия оптимизации мощности станций микроузловой сети при установленном числе узловых сетей и поме-

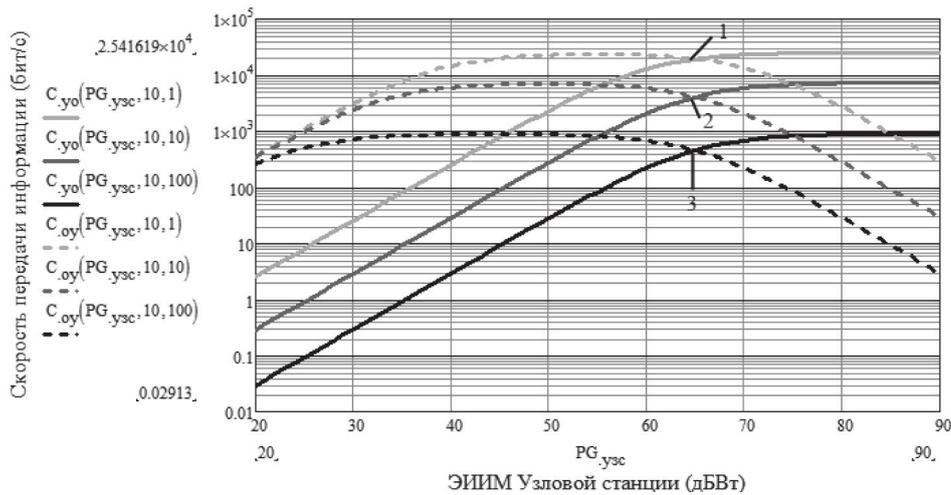


Рис. 8. Зависимость скорости передачи в направлениях УЗС–ОЗС и ОЗС–УЗС в микроузловых сетях от ЭИИМ УЗС

хозащищенности по входу РТР может быть выбран минимум суммарной мощности ЗС при заданной степени уменьшения относительной скорости передачи информации в обоих направлениях от достигаемой скорости в случае максимальной мощности ЗС.

В случае, когда помеха действует не только на вход РТР, но и на вход ЗС, для сохранения ПЗ по входу РТР этого направления связи необходимо уменьшать скорость передачи (рис. 4). Однако в некоторых случаях снижение скорости передачи в данном направлении недопустимо [7, 8]. Тогда, для сохранения скорости передачи в этом направлении, возможно перераспределить мощность УЗС таким образом, чтобы обеспечить в нем необходимую скорость передачи.

Рассмотрим работу в стволе с прямой РТР одной узловой сети с 4-мя ОЗС. Пусть одно из направлений связи подавляется помехой, воздействующей на

вход этой ОЗС. Предположим, что мощность УЗС делится на две части в соответствии с коэффициентом  $0 < p < 1$ . Часть мощности, равной  $PG_p$ , отводится для передачи сигнала в подавляемом направлении связи, а оставшаяся часть делится на три других направления поровну. Тогда в подавляемом направлении связи отношение мощности помехи от других станций сети к мощности сигнала УЗС, выделяемой для этого направления, будет равно:

$$v_{ин} = p^{-1} [1 + 4(PG_{озс}/PG_{узс})] - 1. \quad (4)$$

Соответствующее отношение в неподавляемом направлении связи вычисляется по формуле:

$$v_{ин} = p^{-1} [4 + (PG_{узс}/PG_{озс})] - 1. \quad (5)$$

На рис. 9 показаны зависимости пропускной способности от коэффициента деления мощности для случая превышения мощности помехи на входе ЗС над мощностью РТР на 10 дБ.

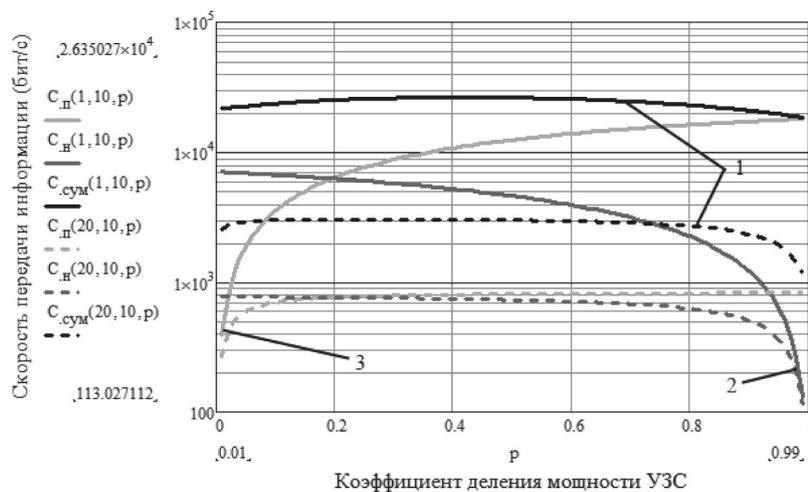


Рис. 9. Зависимость скорости передачи информации в микроузловой сети от коэффициента перераспределения мощности УЗС

Сплошные кривые рассчитаны для коэффициента ПЗ по входу РТР 1 дБ, а пунктирные – 20 дБ. Кривые 1 показывают суммарную пропускную способность узловой сети, 2 – пропускную способность одного из 3-х не подавляемых направлений связи, 3 – пропускную способность подавляемого направления.

Как видно из рис. 9, с увеличением мощности сигнала в подавляемом направлении растет пропускная способность этого направления. Однако при высоких требованиях на ПЗ по входу РТР после определенных значений  $p$  этот рост незначителен. Поэтому дальнейшее увеличение мощности сигнала в этом направлении необходимо только тогда, когда требуется увеличение абсолютных значений ПЗ. Наконец, рассмотрим последний вариант работы станций через прямой ствол, когда сигналы ЗС узловой сети занимают часть полосы ствола, а в другой части могут работать другие ЗС или присутствовать помеха. Очевидно, что в данном случае полоса сигналов станций сети должна быть меньше ширины полосы ствола.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что при работе средств спутниковой связи через РТР в режиме прямой ретрансляции сигналов регулировка мощности ЗС позволяет уменьшить энергетические затраты при незначительном уменьшении относительной помехозащищенности или скорости передачи информации.

В качестве критерия оптимизации энергетических затрат при заданной помехозащищенности направлений можно выбрать критерий минимума суммарной мощности ЗС при установленном проценте снижения скорости передачи информации относительно максимальной скорости, достигаемой при максимальных значениях мощности передающих устройств. При оптимизации энергетических затрат при заданной скорости передачи информации в качестве критерия можно выбрать критерий минимума суммарной мощности ЗС при установленном проценте снижения относительной помехозащищенности относительно максимальных значений помехозащиты, достигаемых при максимальных мощностях передатчиков земных станций.

#### Список литературы

1. *Артюшенко В.М.* Современные направления развития корпоративных сетей спутниковой связи [Текст] / В.М. Артюшенко, Т.С. Аббасова, Б.А. Кучеров // Двойные технологии. – 2014. – № 3 (68). – С. 67–72.
2. *Спутниковые системы связи и вещания.* Ежегодник 1997/1998. Научно-техническое, справочно-

аналитическое издание. – М.: Предприятие редакции журнала «Радиотехника», 1997. – 592 с.

3. *Артюшенко В.М.* Адаптивная регулировка мощности, скорости и помехозащищенности наземных станций системы спутниковой связи [Текст] / В.М. Артюшенко, Б.А. Кучеров // Высокие технологии, фундаментальные исследования, инновации: сб. статей XVII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике». 22–23 мая 2014 года, Санкт-Петербург, Россия / Научные редакторы А.П. Кудинов, М.А. Кудинов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 12–15.

4. *Артюшенко В.М.* Повышение оперативности бесконфликтного управления группировкой космических аппаратов в условиях ресурсных ограничений [Текст] / В.М. Артюшенко, Б.А. Кучеров // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9, № 3. – С. 59–66.

5. *Людвиг В.А.* Оптимальное управление скоростью передачи информации в нестационарных радиоперелиниях / В.А. Людвиг, А.М. Чуднов // Радиотехника. – 1982. – Т. 25, № 4. – С. 83–84.

6. *Morgan W.L.* Business Earth Station For Telecommunication / W. L. Morgan, D. Rouffet // WILEY Series in Telecommunication. – 1988. – 234 с.

7. *Артюшенко В.М.* Информатизация управления группировкой космических аппаратов [Текст] / В.М. Артюшенко, Б.А. Кучеров // Прикладная информатика. – 2013. – № 6 (48). – С. 6–14.

8. *Кучеров Б.А.* Состояние и перспективы развития основных направлений информатизации распределения средств управления космическими аппаратами [Текст] / Б.А. Кучеров // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10, № 2. – С. 54–61.

#### References

1. *Artjushenko V.M.* Sovremennye napravlenija razvitija korporativnyh setej sputnikovoj svjazi [Tekst] / V.M. Artjushenko, T.S. Abbasova, B.A. Kuchеров // Dvojnye tehnologii. – 2014. – № 3 (68). – S. 67–72.
2. *Sputnikovye sistemy svjazi i veshhanija.* Ezhegodnik 1997/1998. Nauchno-tehnicheskoe, spravochno-analiticheskoe izdanie. – M.: Predpriyatje redakcii zhurnala «Radiotehnika», 1997. – 592 s.
3. *Artjushenko V.M.* Adaptivnaja regulirovka moshhnosti, skorosti i pomehozashhishhennosti nazemnyh stancij sistemy sputnikovoj svjazi [Tekst] / V.M. Artjushenko, B.A. Kuchеров // Vysokie tehnologii, fundamental'nye issledovanija, innovacii: sb. statej XVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii

«Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya, razrabotka i primeneniye vysokih tehnologiy v promyshlennosti i jekonomike». 22–23 maja 2014 goda, Sankt-Peterburg, Rossija / Nauchnye redaktory A.P. Kudinov, M.A. Kudinov. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2014. – S. 12–15.

4. *Artjushenko V.M.* Povyshenie operativnosti beskonfliktного upravlenija gruppirovkoj kosmicheskikh apparatov v uslovijah resursnyh ogranichenij [Tekst] / V.M. Artjushenko, B.A. Kuchеров // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – T. 9, № 3. – S. 59–66.

5. *Ljudvig V.A.* Optimal'noe upravlenie skorost'ju peredachi informacii v nestacionarnyh radiolinijah /

V.A. Ljudvig, A.M. Chudnov // Radiojelektronika. – 1982. – T. 25, № 4. – S. 83–84.

6. *Morgan W.L.* Business Earth Station For Telecommunication / W.L. Morgan, D. Rouffet // WILEY Series in Telecommunication. – 1988. – 234 s.

7. *Artjushenko V.M.* Informatizacija upravlenija gruppirovkoj kosmicheskikh apparatov [Tekst] / V.M. Artjushenko, B. A. Kuchеров // Prikladnaja informatika. – 2013. – № 6 (48). – S. 6-14.

8. *Kuchеров B.A.* Sostojanie i perspektivy razvitija osnovnyh napravlenij informatizacii raspredelenija sredstv upravlenija kosmicheskimi apparatami [Tekst] / B. A. Kuchеров // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2014. – T. 10, № 2. – S. 54–61.



**Ефанов В.Н.**  
**Efanov V.N.**

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



**Кутабов А.Н.**  
**Kitabov A.N.**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Информационно-измерительная техника» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа



**Нугаев Р.Р.**  
**Nugaev R.R.**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа

УДК 004.896

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИАГНОСТИКИ ПОГРУЖНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПО СТАНДАРТУ IDEF1X

В статье рассмотрены вопросы проектирования базы данных, полученных в процессе диагностики погружного оборудования. Проведен анализ условий, позволяющих создать интегрированную информационную среду применительно ко всем уровням иерархии современной нефтяной компании. Рассмотрены основные аспекты структурного моделирования с применением SADT-методологии. Показано, что в качестве инструментального средства при синтезе информационной системы диагностики погружного оборудования целесообразно использовать IDEF1X-технологии, которая является производным стандартом указанной методологии. Приводится описание информационной модели рассматриваемой предметной области диагностики. На основе полученной информационной модели формулируются необходимые

и достаточные требования к внутренней структуре базы данных результатов диагностики погружного оборудования. Показано, что модель, полученная с использованием IDEF1X-технологии, позволяет привести схему данных в соответствие с требованиями третьей нормальной формы к реляционным базам данных. Тем самым открывается возможность для проектирования базы данных результатов диагностики погружного оборудования в среде MS Access. В качестве иллюстрации такого подхода описаны процессы создания схемы данных и организации оптимальных связей между ее элементами. Приведены примеры реализации необходимых запросов на выборку данных, которые предназначены для получения целостного объема структурированной информации, а также подробно описаны все экранные формы базы данных, реализующие взаимодействие оператора с информационной системой.

*Ключевые слова:* погружное оборудование, диагностика, информационная модель, IDEF1X-технология, база данных, схема базы данных, таблица, сущность, запрос, форма.

## **DATABASE DESIGN OF DIAGNOSTIC RESULTS OF SUBMERSIBLE EQUIPMENT BASED ON THE INFORMATION MODEL BY IDEF1X**

The article discusses the design of the database obtained in the process of diagnosis of submersible equipment. The analysis of the conditions that create an integrated information environment for all levels of the hierarchy of modern oil company. The basic aspects of structural modeling using SADT-methodology. It is shown that as a tool in the synthesis of the information system diagnostics submersible equipment appropriate to use IDEF1X-technology, which is a derivative of said standard methodology. The description of the information model of the subject area of diagnostics. On the basis of the information model formulates the necessary and sufficient requirements for the internal database structure of the diagnostic results of submersible equipment. It is shown that the model obtained using IDEF1X-technology allows to bring the scheme in line with the data requirements of the third normal form relational databases. This opens the possibility to design a database of diagnostic results submersible equipment among MS Access. As an illustration of this approach are described processes for creating data schema and organization of optimal relations between its elements. The examples of the necessary collection queries that are designed to provide a holistic scope of structured information, and details all screen forms of the database implements the interaction of the operator with the information system.

*Key words:* submersible equipment, diagnostics, information model, IDEF1X-technology, database, database schema, table, essence, a request form.

Создание интегрированной системы управления техническим состоянием погружного оборудования в условиях многоуровневой иерархии нефтяных компаний требует разработки объединенной информационной среды процесса диагностики. В первую очередь это касается данных о фактическом состоянии оборудования, которые должны быть доступны на всех заинтересованных уровнях иерархии нефтяных компаний с соблюдением необходимого и достаточного объема получаемой информации и приемлемого уровня конфиденциальности. К числу таких данных относятся основные технологические параметры, эксплуатационные показатели и результаты контроля, полученные в ходе диагностических процедур. Решение этой задачи требует углубленной проработки вопросов, направленных на структуризацию и оптимизацию потоков информации, в том числе, вопросов моделирования информационных систем.

Применение методологии SADT при создании интегрированной системы управления техническим состоянием погружного оборудования позволяет

определить основные функции системы, разработать системный проект [1, 2, 3, 4], выявить взаимосвязи между отдельными частями всей системы. В рамках методологии SADT разработан ряд производных стандартов, таких как IDEF, предназначенных для построения отдельных специфических моделей, например, функциональных и информационных моделей [5, 6]. В работах [7, 8] показана эффективность SADT-методологии при построении функциональных моделей системы диагностики погружного оборудования, в данной работе указанная методология используется при создании информационной модели по стандарту IDEF1X.

В настоящий время используются разнообразные технологии анализа информационных систем. Предпочтение, которое мы отдаем IDEF1X-технологии, связано с тем, что с ее помощью можно выявить основные информационные потоки в системе, в результате чего становится возможным проектирование различного рода баз данных, отвечающих требованиям третьей нормальной формы. Информационные модели на основе данной технологии по-

зволяют создавать избыточные и целостные базы данных, которые являются ключевым компонентом будущей информационной системы процесса диагностики [9].

Информационная модель исследуемой предметной области в рамках SADT-методологии и IDEF1X-технологии представляет собой совокупность сущностей и атрибутов, что является прообразом базы

данных в третьей нормальной форме [10].

На рис. 1 изображена информационная модель, которая служит прообразом базы данных обработанной информации. В ней содержится вся информация об объекте, включая его технические и эксплуатационные характеристики, а также данные и результаты проводимых испытаний и т. д.

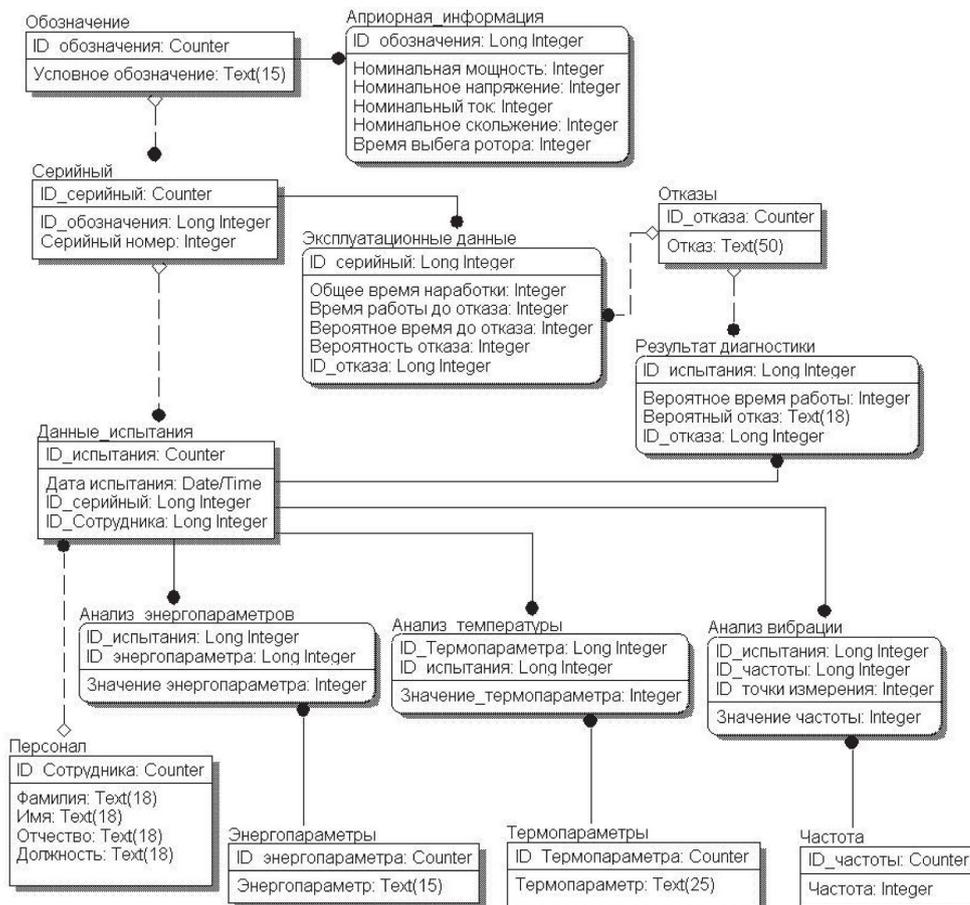


Рис. 1. Информационная модель базы данных обработанной информации

Модель включает 14 сущностей:

- 1) обозначение;
- 2) серийный;
- 3) априорная информация;
- 4) эксплуатационные данные;
- 5) данные испытания;
- 6) анализ энергопараметров;
- 7) анализ температуры;
- 8) анализ вибрации;
- 9) энергопараметры;
- 10) термопараметры;
- 11) частота;
- 12) персонал;
- 13) результат диагностики;
- 14) отказы.

В данной модели 8 сущностей относятся к

сущностям-родителям: «обозначение», «данные испытания», «персонал», «отказы», «частота», «термопараметры», «энергопараметры», «серийный», а 6 сущностей – к сущностям-потомкам: «эксплуатационные данные», «априорная информация», «анализ вибрации», «анализ температуры», «анализ энергопараметров» и «результат диагностики».

#### Исследовательский прототип базы данных результатов диагностики погружного оборудования

Проведенный анализ существующих систем управления базами данных (СУБД), таких как MS SQL Server, MS Access, Oracle, IBM DB2, My SQL Front, позволил остановить наш выбор на СУБД MS Access в качестве основы для разработки базы данных результатов диагностики.

Приложение MS Access [11, 12, 13] является реляционной СУБД, которая поддерживает все средства и возможности по обработке данных, свойственные реляционным моделям. При этом информация, которую необходимо хранить в соответствующих базах данных, может быть представлена в практически любом формате. Выбор MS Access также обусловлен ее доступностью как в частных, так и в коммерческих целях. Это позволяет считать выбранную СУБД наиболее приемлемым вариантом для синтеза исследовательского прототипа базы данных результатов диагностики.

Создание таблиц ведется в соответствии с предложенной информационной моделью. С учетом того, что из рассмотрения исключена сущность «пер-

сонал», в проектируемой базе данных содержится тринадцать таблиц: «обозначение», «серийный», «априорная информация», «эксплуатационные данные», «данные испытания», «отказы», «диагноз», «анализ вибрации», «анализ температуры», «анализ энергопараметров», «частота», «термопараметры» и «энергопараметры». Схема данных представлена на рис. 2. Стоит отметить, что данный прототип создавался на примере одного из представителей рассматриваемого оборудования – погружного электродвигателя (ПЭД), поскольку данный объект наиболее полно охватывает весь спектр диагностических процедур, проводимых при анализе работоспособности погружного оборудования.

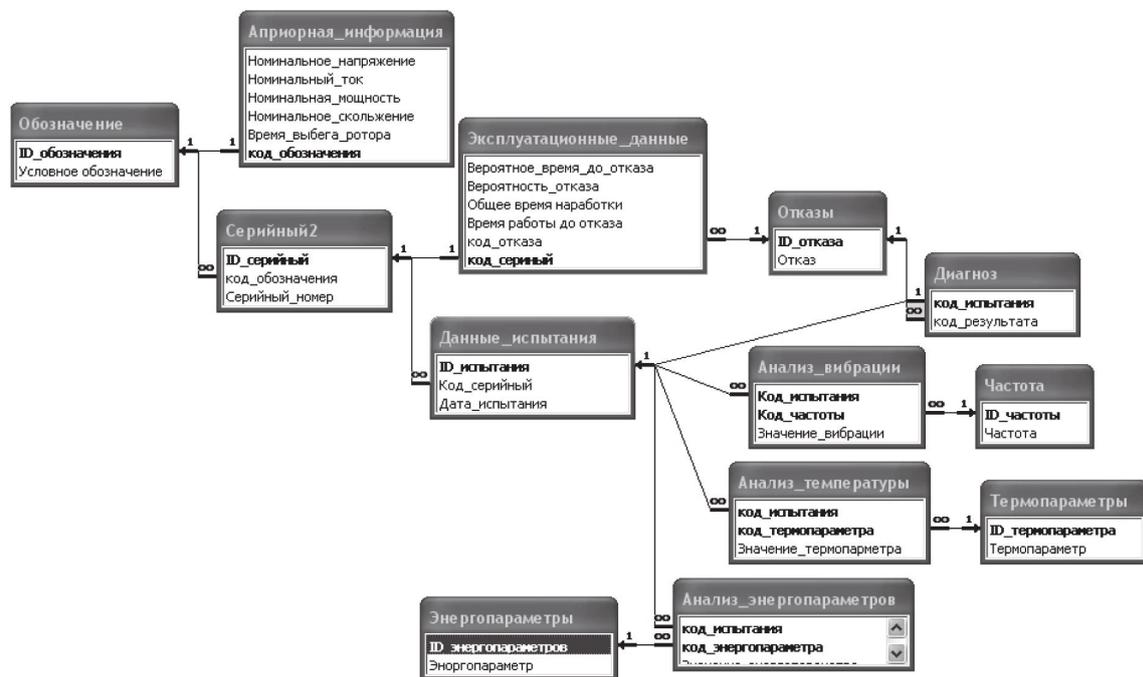


Рис. 2. Схема данных

В таблице «обозначение» хранится список марок (видов) оборудования, каждой из которых присвоен свой идентификационный номер (тип данных – «счетчик»). В таблице «априорная информация» хранятся технические характеристики двигателя: номинальное напряжение, номинальный ток, номинальная мощность, время выбега ротора, скольжение. Каждая строка данной таблицы однозначно связана с таблицей «обозначение».

Таблица «серийный» содержит данные по каждому экземпляру ПЭД: серийный номер, код обозначения и ID испытания (порядковый номер), которое является ключевым полем. Данная таблица связана с таблицами «обозначение» и «эксплуатационные данные». Последняя таблица содержит данные «со-

скважины», такие как последний отказ, время наработки до отказа, общее время наработки и т. д.

Таблица «данные испытания» содержит однозначный идентификатор испытания (ID испытания), дату испытания и код серийного номера испытуемого двигателя. Она является основой для следующих трех таблиц.

Таблица «анализ вибрации» содержит значения вибрации на каждой частоте, для каждого испытания каждого двигателя. Значения частот указаны в таблице «частота». Таблица «анализ температуры» содержит значение термопараметра для каждого испытания каждого двигателя. Аналогично взаимодействуют таблицы «анализ энергопараметров» и «энергопараметры». Результат испытания заносится

в таблицы «диагнозы», наименование неисправности берется из таблицы «отказы».

После создания и заполнения таблиц реализуются необходимые запросы на выборку данных, которые предназначены для получения необходимого и целостного объема структурированной информации.

Запрос «эксплуатационные данные» выполняет выборку двигателей по номеру. Поля данного запроса содержатся в таблицах «обозначение», «серийный», «эксплуатационные данные», «отказы» и представляют пользователю эксплуатационные данные по выбранному экземпляру. Схема такого запроса в режиме конструктора представлена на рис. 3.

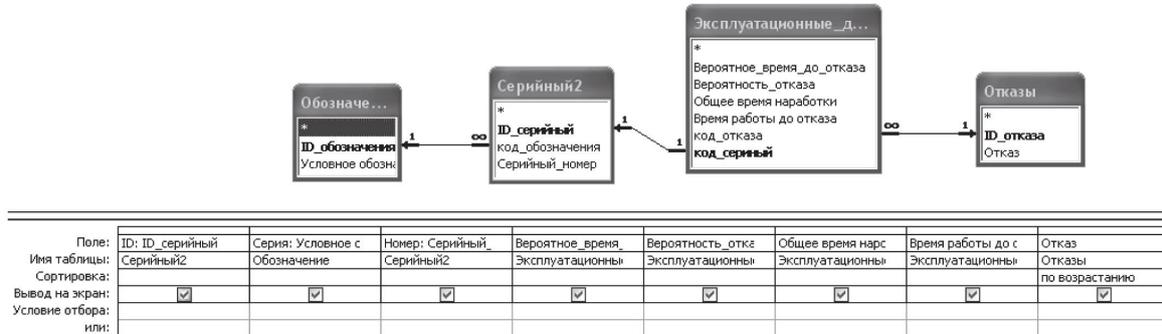


Рис. 3. Запрос эксплуатационных данных в режиме конструктора

Запрос «вибрационные испытания» выполняет выборку двигателя по номеру. Поля данного запроса содержатся в таблицах «обозначение», «серийный», «данные испытаний», «анализ вибрации», «частота».

Запрос предоставляет данные пользователю по вибрационным испытаниям каждого двигателя. Схема данного запроса в режиме конструктора представлена на рис. 4.



Рис. 4. Запрос вибрационных испытаний в режиме конструктора

Запрос «температурные испытания» направлен на выборку экземпляра с предоставлением данных по температурным испытаниям каждого двигателя.

Поля данного запроса содержатся в таблицах «обозначение», «серийный», «данные испытаний», «анализ температуры», «термопараметры» (рис. 5).



Рис. 5. Запрос температурных испытаний в режиме конструктора

Запрос «энергоиспытания» производит выборку двигателя с предоставлением информации о результатах анализа энергетических параметров. Поля данного запроса содержатся в таблицах «обозначение», «серийный», «данные испытаний», «анализ энергопараметров», «энергопараметры». Его схема представлена на рис. 6.

Следующие два запроса производят выборку списка двигателей, которые не удовлетворяют критериям работоспособности по одному или нескольким параметрам. Запрос «выборка (термо)» произ-

водит выборку всех двигателей, которые не удовлетворяют одному из следующих критериев: время работы, время простоя, скорость нарастания, тепловая нагруженность. При этом критерий «скорость нарастания» характеризует скорость повышения температуры оборудования в условиях эксплуатации. Критерий «тепловая нагруженность» характеризует общее состояние двигателя по температурным параметрам и представляет собой процент от максимально допустимой рабочей температуры. Схема запроса представлена на рис. 7.

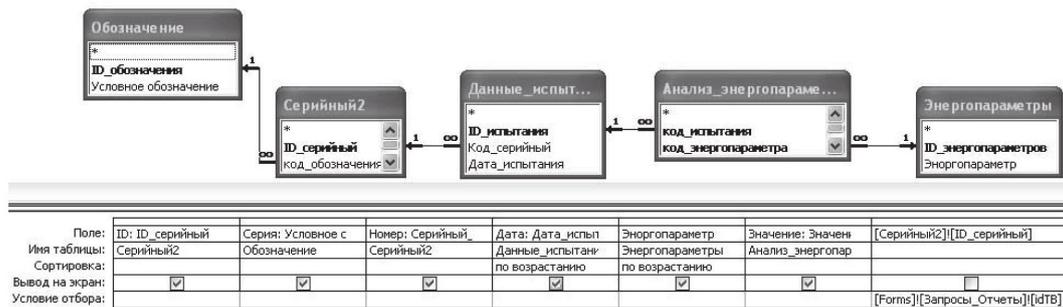


Рис. 6. Запрос энергоиспытаний в режиме конструктора

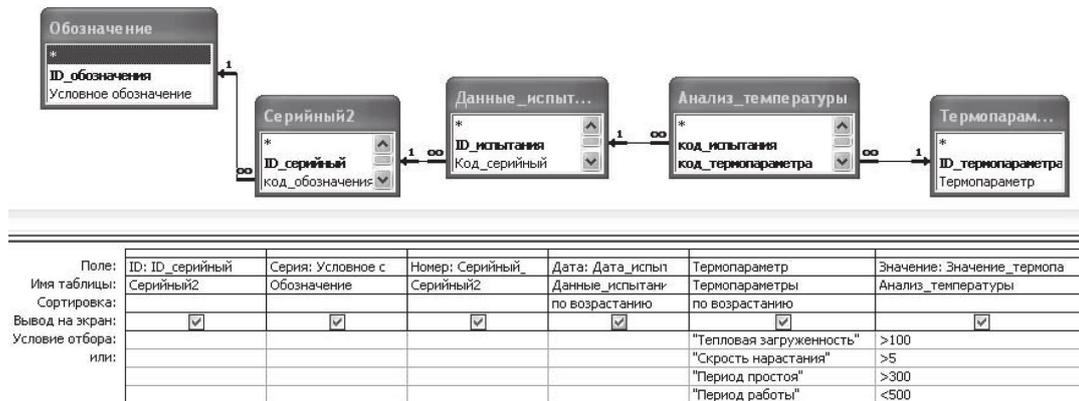


Рис. 7. Запрос выборки (термо) в режиме конструктора

Запрос «выборка (энерго)» производит выборку всех двигателей, работа которых не удовлетворяет по одному или нескольким критериям (дисбаланс напряжений, дисбаланс токов, потери). Данный запрос в режиме конструктора представлен на рис. 8.

На основе описанных запросов были разработаны экранные формы, необходимые для удобного и целостного представления информации.

Формы используются для эффективного и интуитивно понятного процесса ввода, редактирования и представления информации, хранящейся в базе данных. В рамках данной работы создано более 15 форм различного назначения. Часть этих форм предназначена для просмотра информации в удобном для пользователя виде, другие – для последова-

тельного ввода новой информации, остальные – для навигации по различным формам.

Главной оконной формой является форма «запросы отчеты», которая представляет собой стартовую страницу, через которую пользователь может работать с информацией. Данная форма представлена на рис. 9.

Форма состоит из двух частей: список двигателей (поле со списком) и три группы кнопок. Пользователь перед началом работы выбирает необходимый экземпляр двигателя и с помощью кнопок, которые ссылаются на подчиненные формы или запросы, открывает соответствующие формы для представления или редактирования информации.

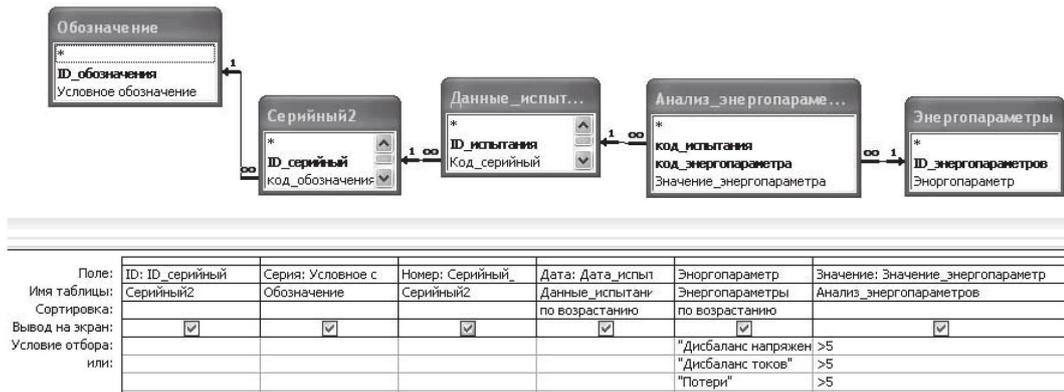


Рис. 8. Запрос выборки (энерго) в режиме конструктора

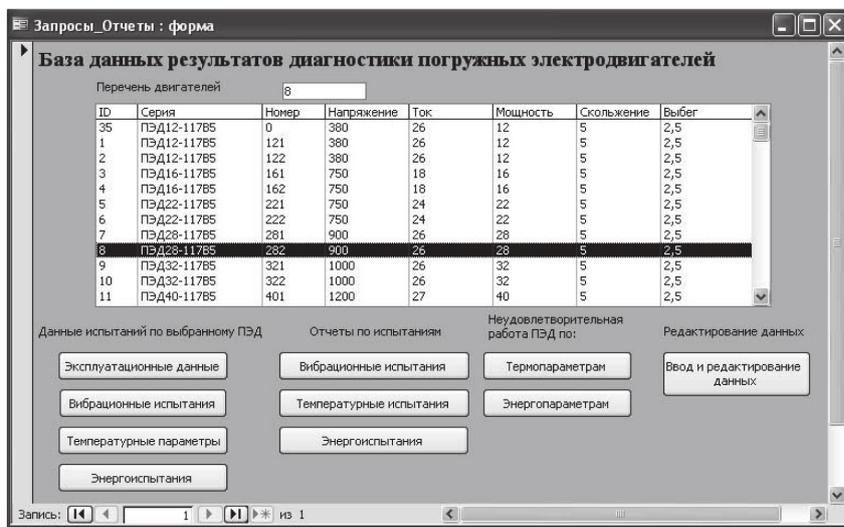


Рис. 9. Форма «запросы отчеты»

Первая группа кнопок «данные испытания по выбранному ПЭД» позволяет просматривать информацию по анализу вибрации, температуры, энергопараметров, а также эксплуатационным данным.

Вторая группа кнопок «отчеты по испытаниям» формирует отчет по заданному испытанию выбранного ПЭД.

Третья группа кнопок «неудовлетворительная работа ПЭД» запускает выполнение запросов «выборка (термо)» или «выборка (энерго)» при нажатии

соответствующей кнопки.

Кнопка «редактирование данных» ссылается на другую кнопочную форму (форма для ввода (кнопки)).

Последовательно рассмотрим функции всех кнопок данной формы. Кнопка «эксплуатационные данные» открывает подчиненную форму «экс\_дан\_запрос», которая предоставляет пользователю эксплуатационную информацию по выбранному образцу. Данная форма представлена на рис. 10.

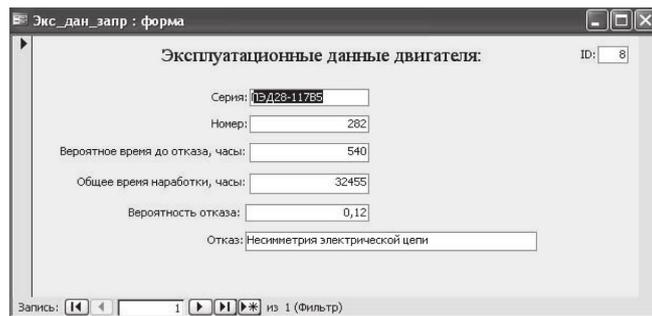


Рис. 10. Форма представления эксплуатационных данных

По нажатию кнопки «вибрационные испытания» открывается форма «анализ вибрации запрос» (основана на запросе «вибрационные испытания»). На данной форме (рис. 11) представлена информация по спектральному распределению сигнала в табличной форме, а по нажатию кнопки «показать спектральное представление» открыва-

вается сводная диаграмма (гистограмма) этих же данных (рис. 12).

При нажатии кнопки «температурные испытания» открывается форма «темп\_исп\_запр». На данной форме представляется в виде списка информация по температурным параметрам. Данная форма представлена на рис. 13.

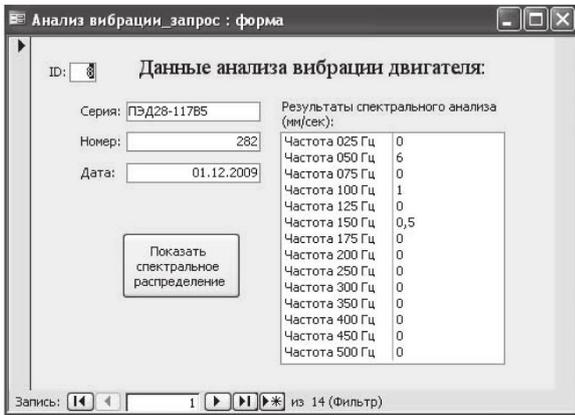


Рис. 11. Форма анализа вибрации



Рис. 12. Сводная диаграмма вибрации

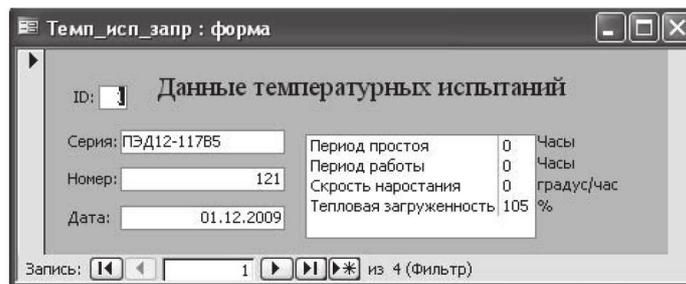


Рис. 13. Форма анализа температуры

Кнопка «Энергоиспытания» обеспечивает переход к подчиненной форме «Энергоиспытания запрос». Ее работа аналогична предыдущей форме.

Кнопки третьей группы запускают выполнение соответствующих запросов. Результатом нажатия кнопки «неудовлетворительная работа ПЭД по «термопараметрам» является выполнение запроса, экранная форма которого представлена на рис. 14.

Кнопки третьей группы запускают выполнение

ID	Серия	Номер	Дата	Термопараметр	Значение
1	ПЭД12-117В5	121	01.12.2009	Тепловая нагрузка	105
5	ПЭД22-117В5	221	05.12.2009	Скорость нарастания	7
6	ПЭД22-117В5	222	06.12.2009	Период простоя	500

Рис. 14. Результат выполнения запроса «Выборка (термо)»

Результатом нажатия кнопки «неудовлетворительная работа ПЭД по «энергопараметрам» является выполнение запроса, экранная форма которого представлена на рис. 15.

ID	Серия	Номер	Дата	Энергопараметр	Значение
7	ПЭД28-117В5	281	01.12.2009	Дисбаланс токов	8
10	ПЭД32-117В5	322	05.12.2009	Дисбаланс напряжений	9

Рис. 15. Результат выполнения запроса «Выборка (энерго)»

При нажатии кнопки «редактирование данных» открывается одноименная кнопочная форма, представленная на рис. 16.

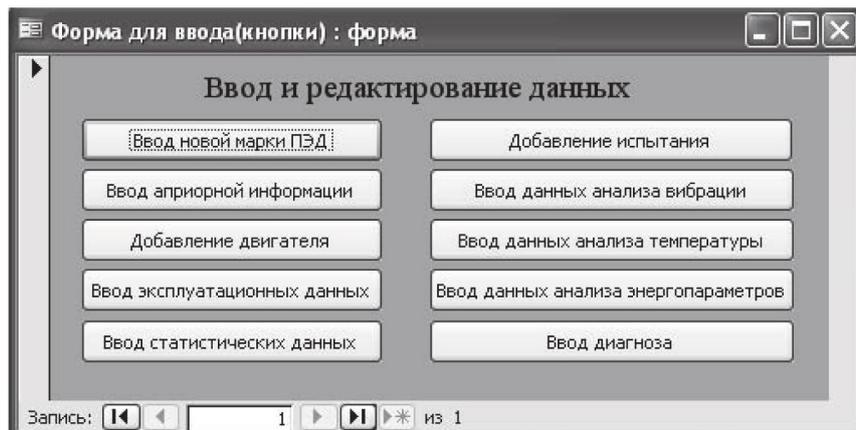


Рис. 16. Кнопочная форма ввода и редактирования данных

Данная форма обеспечивает открытие соответствующей подчиненной формы. Это позволяет последовательно вводить данные и обеспечивать целостность записей. Все данные формы являются простыми и интуитивно понятными. Данное обстоятельство обеспечивает дружественный интерфейс даже для обслуживающего персонала отдела эксплуатации погружного оборудования, не имеющего достаточного уровня подготовки в области компьютерных технологий.

Описанные выше формы позволяют быстро и эффективно манипулировать информацией, хранящейся в базе данных.

Описанная база данных является лишь частью информационного пространства системы диагностики погружного оборудования, но она позволяет выполнять основные функции, связанные с хранением данных анализа по большинству параметров, производить выборку необходимых данных как по группе объектов, так и по конкретному образцу. Кроме того, в ней реализован удобный, наглядный и интуитивно понятный интерфейс пользователя, с которым может разобраться оператор, не имеющий соответствующей подготовки в сфере современных компьютерных технологий. С помощью удобной стартовой формы и обилия сервисных кнопок обеспечивается максимально возможное разделение функций каждой формы с целью структуризации выводимой информации, чтобы сосредоточить внимание оператора лишь на решаемой задаче.

#### Выводы

Разработана и реализована база данных результатов диагностики погружного оборудования. В условиях существующей иерархии нефтяных предприятий разработана единого инструмента по предо-

ставлению данных пользователям различного ранга является актуальной задачей. Наиболее адекватным решением данной задачи является создание единого информационного пространства для потребителей всех уровней, начиная с отдела диагностики и заканчивая управляющей компанией. Основой данного пространства служит база данных, созданная с помощью доступного и интуитивно понятного программного обеспечения, в качестве которого нами была выбрана СУБД MS Access. Следует отметить, что создание базы данных на более дорогих и сложных СУБД на начальном этапе разработки информационной системы является неоправданным, т. к. отсутствуют окончательные требования к разрабатываемой системе. В то же время СУБД MS Access позволяет решать задачи без привязки к конечному облику разрабатываемой системы, выявлять характерные черты данной предметной области и формировать требования для дальнейшего развития системы в целом.

#### Список литературы

1. Куликов Г.Г. Автоматизированное проектирование информационно-управляющих систем. Системное моделирование предметной области: учебное пособие / Г.Г. Куликов, А.Н. Набатов, А.В. Речкалов; УГАТУ. – Уфа: УГАТУ, 1998. – 104 с.
2. Антонов А.В. Системный анализ: учебник для вузов / А.В. Антонов. – М.: Высшая школа, 2004. – 454 с.
3. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ: учеб. пособие. – К.: МАУП, 2003. – 368 с.
4. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ: [учебное пособие по специальности «Государственное и муниципальное управление»] / Ф.П. Та-

расенко. – Москва: КноРус, 2010. – 219 с.

5. *Вендров А.М.* CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 176 с.: ил.

6. *Федоров Н.В.* Проектирование информационных систем на основе современных CASE-технологий: учебное пособие / Н.В. Федоров; Московский государственный индустриальный университет (МГИУ). – 2-е изд., стер. – Москва: Изд-во МГИУ, 2008. – 279 с.

7. *Китабов А.Н.* Информационно-измерительная система диагностики погружного электродвигателя // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15. – № 1 (41). – С. 153–164.

8. *Синтез* структуры системы диагностики технического состояния погружного электрооборудования на основе IDEF-технологии / В.Н. Ефанов, А.Н. Китабов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 4. – С. 69–75.

9. *Черемных С.В.* Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии: практикум / С.В. Черемных, И.О. Семенов, В.С. Ручкин. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 192 с.

10. *Маклаков С.В.* ВРwin и ERwin. CASE-средства разработки информационных систем. – 2-изд., испр. и доп. – М.: ДИАЛОГ – МИФИ, 2001. – 304 с.

11. *Бекаревиц Ю.Б.* Самоучитель Microsoft Access 2003 / Ю.Б. Бекаревиц, Н.В. Пушкина. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 727 с.

12. *Кузнецов А.А.* Microsoft Access 2003. Русская версия. Учебный курс. – СПб.: Питер; Киев: Издательский дом BHV, 2006. – 365 с.

13. *Харитонов И.А.* Office Access 2003: самоучитель / И.А. Харитонов. – СПб.: Питер, 2004. – 464 с.

#### References

1. *Kulikov G.G.* Avtomatizirovannoe proektirovanie informacionno-upravljajushhih sistem. Sistemnoe modelirovanie predmetnoj oblasti: Uchebnoe posobie / G.G. Kulikov, A.N. Nabatov, A.V. Rechkalov; UGATU.

– Ufa: UGATU, 1998. – 104 с.

2. *Antonov A.V.* Sistemnyj analiz: uchebnik dlja vuzov / A.V. Antonov. – М.: Vysshaja shkola, 2004. – 454 с.

3. *Surmin Ju.P.* Teorija sistem i sistemnyj analiz: ucheb. posobie. – К.: MAUP, 2003. – 368 с.

4. *Tarassenko F.P.* Prikladnoj sistemnyj analiz: [uchebnoe posobie po special'nosti «Gosudarstvennoe i municipal'noe upravlenie»] / F. P. Tarassenko. – Москва: KnoРус, 2010. – 219 с.

5. *Vendrov A.M.* CASE-tehnologii. Sovremennye metody i sredstva proektirovanija informacionnyh sistem. – М.: Finansy i statistika, 1998. – 176 с.: ил.

6. *Fedorov N.V.* Proektirovanie informacionnyh sistem na osnove sovremennyh CASE-tehnologij: uchebnoe posobie / N.V. Fedorov; Moskovskij gosudarstvennyj industrial'nyj universitet (MGIU). – 2-e izd., ster. – Москва: Izd-vo MGIU, 2008. – 279 с.

7. *Kitabov A.N.* Informacionno-izmeritel'naja sistema diagnostiki pogruzhnogo jelektrodvigatelja // Vestnik UGATU. – 2011. – Т. 15. – № 1 (41). – С. 153–164.

8. *Sintez* struktury sistemy diagnostiki tehničeskogo sostojanija pogruzhnogo jelektrooborudovanija na osnove IDEF-tehnologii / V.N. Efanov, A.N. Kitabov // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – Т. 9. – № 4. – С. 69–75.

9. *Cheremnyh S.V.* Modelirovanie i analiz sistem. IDEF-tehnologii: praktikum / S.V. Cheremnyh, I.O. Semenov, V. S. Ruchkin. – М.: Finansy i statistika, 2005. – 192 с.

10. *Maklakov S.V.* ВРwin i ERwin. CASE-sredstva razrabotki informacionnyh sistem. – 2-izd., ispr. i dop. – М.: DIALOG – MIFI, 2001. – 304 с.

11. *Bekarevich Ju.B.* Samouchitel' Microsoft Access 2003 / Ju.B. Bekarevich, N.V. Pushkina. – СПб.: BHV-Peterburg, 2004. – 727 с.

12. *Kuznecov A.A.* Microsoft Access 2003. Russkaja versija. Uchebnyj kurs. – СПб.: Piter; Kiev: Izdatel'skij dom BHV, 2006. – 365 с.

13. *Haritonova I.A.* Office Access 2003: samouchitel' / I.A. Haritonova. – СПб.: Piter, 2004. – 464 с.



*Гордеев Э.Н.*

*Gordeev E.N.*

*доктор технических наук, профессор  
кафедры «Информационная безопасность»  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, г. Москва*

УДК 519.854

## ОБ УСТОЙЧИВОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ПРОЦЕССОВ

Разработанный в статьях [1–8] аппарат исследования устойчивости решений оптимизационных задач может быть применен к оценкам адекватности моделирования там, где математические модели базируются, кроме всего прочего, и на задачах дискретной оптимизации. Типичным примером такого класса моделей являются модели процессов в компьютерных сетях и сетях связи. В работе рассматривается методология применения теории устойчивости к таким моделям. Отличительной особенностью процесса моделирования является зависимость параметров моделей от времени, а разработанная теория устойчивости решений дискретных экстремальных задач тесно связана с решением параметрических задач, в которых радиус устойчивости может выражаться через длины отрезков изменения параметра, которым, например, может являться время. основополагающие результаты теории устойчивости дискретных экстремальных задач были получены в 1970-е и 1980-е годы (например, в работах из [1–8]), а эта тематика тогда не привлекала внимания зарубежных исследователей. Однако в последние 10–15 лет появилось много статей, так или иначе связанных с устойчивостью, в которых полученные ранее результаты просто «не замечаются». Поэтому одна из целей данной публикации наряду с указанием возможной области прикладного применения теории устойчивости обратить внимание и на полученные ранее результаты. В работе приведены те из них, которые могут быть использованы для проверки адекватности математических моделей некоторых процессов. На примере показана возможность такого применения и те выводы, которые позволяет сделать теория устойчивости. Однако особенностью такого подхода является зависимость от искусства моделирования, а это приводит к тому, что интерпретация выводов носит эвристический характер.

*Ключевые слова:* дискретная оптимизация, радиус устойчивости, параметрические задачи оптимизации, математическое моделирование, маршрутизация, сети и системы связи, компьютерные сети.

## ON THE STABILITY OF THE SIMULATION OF SOME PROCESSES

Developed in [1–8] methods for studying the stability of solutions of optimization problems can be applied to estimate the adequacy of modeling where mathematical models are based, inter alia, on discrete optimization problems. A typical example of this class of models are models of processes in computer networks and communication networks. In this paper the methodology of applying the theory of stability in such models. A distinctive feature of the modeling process is the dependence of the model parameters from time to time, and developed the theory of the stability of solutions of discrete optimization problems is closely related to the parametric solution of problems in which the stability radius can be expressed through the length of the segments of the parameter, which, for example, may be the time. Fundamental results in the theory of stability of discrete optimization problems have been obtained in the 1970s and 1980s (for example, in the works of [1–8]), and this subject did not attract the attention of foreign researchers. However, in the last 10–15 years, there are many articles, one way or another connected with the theory of stability, in which the previously obtained results are simply "not seen." Therefore, one of the purposes of this publication, along with an indication of the possible range of applications of the theory of stability to draw attention to the previously obtained results. The paper presents the ones that can

be used to test the adequacy of mathematical models of some processes. On an example of the possibility of such use and the conclusions that allows you to make the theory of stability. However, the feature of this approach is the dependence of art simulations and this leads to the conclusions that the interpretation of a heuristic nature.

*Key words:* discrete optimization, radius of stability, parametric optimization problem, mathematical modeling, routing, network communication systems, computer networks.

### Введение

В работах [1–7] рассматривались различные подходы к исследованию устойчивости в задачах дискретной оптимизации. Суть их состоит в следующем.

Рассматривается класс задач дискретной оптимизации, который описывается следующей моделью. Пусть  $E = \{e_1, \dots, e_m\}$  – некоторое множество,  $D_m = \{\tau_1, \dots, \tau_q\}$   $q > 1$  – система подмножеств множества  $E$ , называемых траекториями.

Элементам из  $E$  приписаны веса  $w(e_1) = a_1, \dots, w(e_m) = a_m$ . И пусть вектор  $A = (a_1, \dots, a_m)$  берется из  $R^m$ . На каждой траектории определяется функционал  $\tau(A)$  – длина траектории при взвешивании  $A$ . В случае линейного функционала:

$$\tau(A) = \sum_{e_i \in \tau} a_i.$$

Под дискретной оптимизационной задачей мы будем понимать тройку  $(E, D_m, A)$  с определенным на ней типом функционала. Пара  $(E, D_m)$  определяет «комбинаторику» задачи, поэтому, если эта пара и функционал фиксированы, а варьируется лишь вектор  $A = (a_1, \dots, a_m)$  в  $R^m$ , то получающуюся при этом индивидуальную задачу будем обозначать через  $Pr_A$ .

Решениями задачи называются траектории, доставляющие минимум функционалу (оптимальные траектории). В указанную схему укладываются все задачи так называемой комбинаторной оптимизации, в частности, все оптимизационные задачи на графах.

Позже, например, в работах [8, 9], этот подход к анализу устойчивости был перенесен на задачи вычислительной геометрии. С его помощью были проведены новые качественные исследования решений таких задач.

Множество номеров оптимальных траекторий задачи при взвешивании  $A$  обозначим через  $\varphi(A)$ , а длину оптимальной траектории через  $m(A)$ . Через  $S_\Delta(A)$  обозначим открытый шар в  $R^m$  с центром в  $A$  и радиусом  $\Delta$ .

Пусть  $R_0 = \{A: A \in R^m, |\varphi(A)|=q\}$  и в пространстве  $R^m$  задана норма. Назовем задачу  $Pr_A \varepsilon$  – устойчивой, если для любого  $B \in R^m$ ,  $\|B\| < \varepsilon$  выполняется условие:

$$\varphi(A+B) \subseteq \varphi(A). \quad (1)$$

Радиус устойчивости задачи  $Pr_A$ ,  $A \in R_0$  полагаем по определению равным нулю, в противном случае радиусом устойчивости назовем *sup*  $\varepsilon$ , где *sup* берется по всем  $\varepsilon$ , для которых  $Pr_A$  является  $\varepsilon$ -устойчивой.

Обозначим радиус устойчивости задачи  $Pr_A$  через  $\rho(A)$ .

Вышеупомянутый вектор  $B$  будем называть *возмущающим вектором* или *возмущением*.

Обоснование, подробный анализ введенных определений, а также исследование устойчивости многих известных оптимизационных задач как с линейным, так и с минимаксным функционалом при различных типах норм в  $R^m$  можно найти, например, в [1–9].

Таким образом, радиус устойчивости задает предел возмущений элементов весового вектора задачи  $Pr_A$ , при которых не расширяется множество оптимальных решений.

### Некоторые результаты и выводы теории устойчивости

Основными результатами теории устойчивости являются:

**Получение формул для радиуса устойчивости.** При этом изучались не только задачи с произвольной парой  $(E, D_m)$ , но и конкретные комбинаторные особенности оптимизационных задач: задачи на матроидах, на пересечении матроидов, потоковые задачи, диаграммы Вороного, размещение препятствий на плоскости и т. д. Рассматривались также разные виды функционалов: задачи на максимум или минимум, задачи на узкие места, а также ряд нетипичных «вырожденных случаев». Тип возмущений исходных данных задается через вид нормы (метрики) в пространстве  $R^m$ . Наиболее естественную практическую интерпретацию имеет чебышевская метрика (возмущения параметров независимы друг от друга), а также метрика  $l_1$ . Однако с теоретической точки зрения исследовались широкие классы метрик. Например, если метрика чебышевская, функционал линейный и задача на минимум, то показано, что

$$\rho(A) = \min_{j \in \varphi(A)} \max_{i \in \varphi(A)} |\tau_i(A) - \tau_j(A)| / (|\tau_i| + |\tau_j| - 2|\tau_i \cap \tau_j|), \quad (2)$$

а величина  $r_{ij}(A) = |\tau_i(A) - \tau_j(A)| / (|\tau_i| + |\tau_j| - 2|\tau_i \cap \tau_j|)$  обладает тем свойством, что при добавлении ее ко всем элементам  $\tau_i$  и вычитании из всех элементов  $\tau_j$  длины этих траекторий сравниваются. При этом мы считаем, что все элементы вектора (матрицы)  $A$  возмущаются независимо. Там же, в частности, показано, что для любой пары  $\tau_i$  и  $\tau_j$  оптимальной и неоптимальной траекторий возмущения элементов на величины, меньшие  $r_{ij}(A)$ , не может привести к выравниванию длин. Эта формула – достаточно простой случай. В других метриках и с учетом комбинаторики задачи формулы выглядят не столь понятно, но они получены.

**Построение алгоритмов вычисления радиуса устойчивости.** Практический интерес представляет не сама формула, а способ и трудоемкость ее вычисления. При этом напрашивается вопрос сравнения трудоемкости алгоритма решения самой задачи и вычисления ее радиуса устойчивости. Такие исследования были проведены для широкого класса задач дискретной оптимизации. В частности, было показано, что ряд результатов, например, [10–15], могут рассматриваться как следствие или формулировка в других терминах результатов теории устойчивости.

**Качественные исследования свойств задач дискретной оптимизации.** Результаты теории устойчивости в ряде случаев могут быть использованы для решения обратных задач, для табулирования решений множества задач, а также в задачах защиты информации и робототехники.

Рассмотрим сначала некоторые результаты, которые приведены в виде теорем в работах [1–9] либо являются прямыми следствиями утверждений из этих статей.

**Утверждение 1.** Если норма возмущающего вектора  $\|B\|$  не меньше радиуса устойчивости, а ошибка в исходных данных может быть не меньше  $\|B\|$ , то решать оптимизационную задачу или задачу вычислительной геометрии бессмысленно, т. е. в реальности оптимальным может быть любое допустимое решение.

**Утверждение 2.** Для любой массовой дискретной оптимизационной задачи, которая укладывается в предложенную выше постановку, можно показать, что «почти все» индивидуальные задачи имеют единственную оптимальную траекторию, поэтому необходимость рассмотрения всего множества  $\varphi(A)$ , которая присутствует в формулах и алгоритмах для радиуса устойчивости, не является большим препятствием с алгоритмической точки зрения. В [16] для ряда задач в явном виде получены оценки вероятности единственности решения.

**Утверждение 3.** Теоретически пространство за-

дач может быть покрыто шарами устойчивости. Но мощность такого покрытия (двойная экспонента от размерности задачи) делает его практически непригодным. В то же время определенный практический интерес представляет гибридный алгоритм, когда наряду с решением задачи находится и ее радиус устойчивости. Это позволяет автоматически получать решения континуума задач из шара устойчивости исходной задачи. Как показали численные эксперименты с задачей коммивояжера, для «реальных» матриц это работает, а для случайных малоинтересно, что понятно в свете следующего утверждения.

**Утверждение 4.** Если анализировать ситуацию со значением радиуса устойчивости с вероятностной точки зрения, то радиус устойчивости «почти всегда» положителен, т. е. задача устойчива. Однако значение его, по-видимому, почти всегда мало в сравнении с минимальным значением веса параметра задачи.

**Интерпретация результатов теории устойчивости для оценки адекватности моделирования**

Результаты теории устойчивости применялись для решения ряда прикладных задач, в частности, в робототехнике (см. [17]) и телекоммуникациях (см. [18]). Остановимся подробнее на втором случае, который позволяет эффективно применить аппарат исследования устойчивости.

Задача моделирования сетей возникает как при проектировании сетей связи и компьютерных сетей, так и при обосновании вариантов их модернизации. При этом моделирование осуществляется либо «вручную» путем соотнесения параметров каналов связи, характеристик сетевых устройств и потребностей пользователей сети, либо с помощью коммерческого специализированного ПО, которое позволяет моделировать сетевые и вычислительные устройства, каналы связи, а также динамические сценарии нагрузок на сеть.

В процессе моделирования в качестве подзадач естественным образом возникают оптимизационные задачи на графах при моделировании структуры сети, потоковые задачи при моделировании функций маршрутизации и динамических нагрузок. Более того, как показано в [18], к общей схеме оптимизационной задачи может быть сведена модель сети в целом. Модель представляет собой множество параметрических (зависящих от времени) задач на узкие места  $Z_k = (E, D_m, A)_k$ , в которых экстремумы решений  $\tau_k(t, A) = w_k$  соответствуют пиковым нагрузкам на сеть. Возникновение таких нагрузок приводит либо к «падению» сети, либо к непредсказуемым последствиям в ее работе.

Данный подход позволяет получить критерий

адекватности проекта сети ее задачам.

**Критерий.** Пусть  $\Delta$  – некоторая константа. Если экстремумы решений  $\tau_k(t, A)$  вышеупомянутых задач на узкие места отличаются от пиковых значений менее чем на  $\Delta$  (минимумы в большую сторону, а максимумы в меньшую), то спроектированная сеть будет работать непредсказуемо.

Конечно, это эвристический критерий, т. к. искусство моделирования не поддается формализации. На первый взгляд, он выглядит достаточно тривиально, но при его выводе использованы многие вышеприведенные результаты теории устойчивости и выявлен ряд подводных камней процесса моделирования.

Математические формулировки этих подводных камней приведены в [16], а здесь мы приведем практический смысл ряда утверждений.

Сразу подчеркнем, что эти утверждения относятся не к любой наперед заданной сети и ее модели (т. е. некоторой индивидуальной оптимизационной задаче, используемой в модели, а предполагают возможность решения массовой задачи).

Обозначим через  $A$  множество технических характеристик сети (устройств и каналов), участвующих в модели ( $\varepsilon$ -возмущением характеристики сети назовем возмущение элемента  $A$ , например, увеличение пропускной способности канала, производительности сетевого устройства и т. п.). Под заданием  $S$  будем понимать задание исходных данных нагрузок на сеть в некоторый промежуток времени, а под сценарием  $Z$  – снятие ее характеристик в процессе работы в данное время. Именно с последним связаны решения оптимизационных задач в модели сети.

**Утверждение.** Пусть фиксировано  $\Delta > 0$ . Существует пара  $S, Z$  такая, что для любого  $\varepsilon > 0$  найдется такое  $\varepsilon$ -возмущение вектора  $A$ , что множество узких мест исходного сценария было пустым для любого  $t$ , а множество узких мест возмущенного сценария уже пустым не будет.

При этом данное изменение касается не отдельного момента времени, а некоторого промежутка.

**Утверждение.** Пусть фиксировано  $\Delta > 0$ . Существует пара  $S, Z$  такая, что для любого  $\varepsilon > 0$  найдется такое  $\varepsilon$ -возмущение вектора  $A$ , что множество узких мест исходного сценария не содержится в множестве узких мест возмущенного.

То есть очевидно локальное улучшение сети со сложной топологией и разнородными устройствами может привести к ее глобальному ухудшению.

**Утверждение.** Длина траектории  $\tau_k(t, A)$  как функция времени может быть разрывной функцией.

Пример такой функции легко моделируется. Таким образом, смысл подобного утверждения в том,

что сколь угодно малое изменение одного параметра задачи может привести к скачку значения другого параметра. При этом в сети эти параметры могут описывать каналы, устройства или задания, никак не связанные между собой с прикладной или содержательной точки зрения.

Мы привели только самые серьезные опасения эффективности моделирования сетевых процессов с точки зрения теории устойчивости. Конечно, для простых сетей никакая теория устойчивости не нужна. То же самое можно сказать для сетей, построенных с большим запасом. Здесь вместо значений радиуса устойчивости достаточно использовать его простые оценки. Если параметр  $\Delta$  в них укладывается, то это дает возможность сделать эвристический вывод о благополучной эксплуатации сети.

Однако в сетях со сложной топологией и большим количеством устройств надо быть очень осторожным при выборе стратегий реконструкции или модернизации. Надо понимать, что все они носят исключительно эвристический характер, т. е. любой довод «за» теоретически может быть разрушен путем построения «контрпримера».

#### Список литературы

1. Гордеев Э.Н. Исследование устойчивости задачи о кратчайшем остове в метрике  $\Pi$  [Текст] / Э.Н. Гордеев // Выч. мат. и мат. физ. – 1999. – Т. 39. – С. 770–778.
2. Гордеев Э.Н. Общий подход к исследованию устойчивости решений в задачах дискретной оптимизации [Текст] / Э.Н. Гордеев, В.К. Леонтьев // Выч. мат. и мат. физ. – 1996. – Т. 36. – С. 66–72.
3. Леонтьев В.К. Устойчивость в линейных дискретных задачах. – В кн.: Проблемы кибернетики [Текст] / В.К. Леонтьев. – М.: Наука, 1979. – Вып. 35. – С. 169–185.
4. Леонтьев В.К. Качественное исследование траекторных задач [Текст] / Э.Н. Гордеев, В.К. Леонтьев // Кибернетика. – 1986. – № 5. – С. 82–90.
5. Леонтьев В.К. Устойчивость решений в дискретных экстремальных задачах / Диссертация на соискание уч. ст. д. ф.-м. н. [Текст] / В.К. Леонтьев. – М.: ВЦ РАН, 1981.
6. Гордеев Э.Н. Алгоритмы полиномиальной сложности для вычисления радиуса устойчивости в двух классах траекторных задач // [Текст] / Э.Н. Гордеев // Выч. мат. и мат. физ. – 1987. – Т. 27. – № 7. – С. 984–992.
7. Гордеев Э.Н. Устойчивость решений в задаче о кратчайшем пути на графе // [Текст] / Э.Н. Гордеев // Дискретная математика. – 1989. – Т. 1. – № 3. – С. 39–46.

8. Гордеев Э.Н. Об устойчивости решений в задачах вычислительной геометрии [Текст] / Э.Н. Гордеев // Тезисы докладов Международной научной конференции «Интеллектуальная обработка информации». – Крымская академия наук, 1996. – С. 8.
9. Вялый М.Н. Об устойчивости диаграммы Вороного [Текст] / М.Н. Вялый, Э.Н. Гордеев, С.П. Тарасов // Выч. мат. и мат. физ. – 1996. – Т. 36. – № 3. – С. 405–414.
10. Tarjan R.E. Sensitivity analysis of minimum spanning trees and shortest paths trees [Text] / R.E. Tarjan // Inf. Proc. Letters. – 1982. – Vol. 14. – № 1. – P. 30–31.
11. Fredericson G.N. Increasing the weight of minimum spanning trees [Text] / G.N. Fredericson, R. Solis-Oba // Proc. 7-th Annual ACM-SIAM Symp. on Discrete Algorithms. – Amsterdam. – 1996. – P. 539–546.
12. Fredericson G.N., Solis-Oba R. Efficient Algorithms for Robustness in Matroid Optimization [Text] / G.N. Fredericson, R. Solis-Oba // Proc. 8-th Annual ACM-SIAM Symp. on Discrete Algorithms. – Amsterdam. – 1997. – P. 659–668.
13. Cheng E. A faster algorithm for computing the strength of a network [Text] / E. Cheng, W.H. Cunningham // Inf. Proc. Letters. – 1994. – Vol. 49. – P. 209–212.
14. Cunningham W.H. Testing membership in matroid polyhedral [Text] / W.H. Cunningham // J. Comb. Theory. – 1984. – 36. – P. 161–188.
15. Gallo G. A fast parametric maximum flow algorithm and application [Text] / G. Gallo, M.D. Grigoriadis, R.E. Tarjan // SIAM J. Comput. – 1989. – 18. – P. 30–55.
16. Гордеев Э.Н. О единственности решения некоторых комбинаторных задач выбора [Текст] / Э.Н. Гордеев, Л.И. Липкин // Методы дискретного анализа: сборник трудов. – Новосибирск, 1989. – Вып. 49. – С. 13–31.
17. Артеменко В.И. Метод формирования оптимальных программных траекторий роботоманипулятора [Текст] / В.И. Артеменко, Э.Н. Гордеев, Ю.И. Журавлев и др. // Кибернетика и системный анализ. – 1986. – № 5. – С. 84–107.
18. Гордеев Э.Н. Об адекватности моделирования процессов в сетях [Текст] / Э.Н. Гордеев // Электросвязь. – 1999. – № 8. – С. 16–20.
2. Gordeev Je.N. Obshhij podhod k issledovaniju ustojchivosti reshenij v zadachah diskretnoj optimizacii [Tekst] / Je.N. Gordeev, V.K. Leont'ev // Vych. mat. i mat. fiz. – 1996. – Т. 36 – S. 66–72.
3. Leont'ev V.K. Ustojchivost' v linejnyh diskretnyh zadachah. - V kn.: Problemy kibernetiki [Tekst] / V.K. Leont'ev. – M.: Nauka, 1979. – Vyp. 35. – S. 169–185.
4. Leont'ev V.K. Kachestvennoe issledovanie traektornyh zadach [Tekst] / Je.N. Gordeev, V.K. Leont'ev // Kibernetika. – 1986. – № 5. – S. 82–90.
5. Leont'ev V.K. Ustojchivost' reshenij v diskretnyh jekstremal'nyh zadachah: Dissertacija na soiskanie uch. st. d.f.-m.n. [Tekst] / V.K. Leont'ev. – M.: VC RAN, – 1981.
6. Gordeev Je.N. Algoritmy polinomial'noj slozhnosti dlja vychislenija radiusa ustojchivosti v dvuh klassah traektornyh zadach // [Tekst] / Je.N. Gordeev // Vych. mat. i mat. fiz. – 1987. – Т. 27. – № 7. – S. 984–992.
7. Gordeev Je.N. Ustojchivost' reshenij v zadache o kratchajshem puti na grafe // [Tekst] / Je.N. Gordeev // Diskretnaja matematika. – 1989. – Т. 1. – № 3. – S. 39–46.
8. Gordeev Je.N. Ob ustojchivosti reshenij v zadachah vychislitel'noj geometrii [Tekst] / Je.N. Gordeev // Tezisy dokladov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Intel'ktual'naja obrabotka informacii». – Krymskaja Akademija Nauk, 1996. – S. 8.
9. Vjalyj M.N. Ob ustojchivosti diagrammy Voronogo [Tekst] / M.N. Vjalyj, Je.N. Gordeev, S.P. Tarasov // Vych. mat. i mat. fiz. – 1996. – Т. 36. – № 3. – S. 405–414.
10. Tarjan R.E. Sensitivity analysis of minimum spanning trees and shortest paths trees [Text] / R.E. Tarjan // Inf. Proc. Letters. – 1982. – Vol. 14. – № 1. – P. 30–31.
11. Fredericson G.N. Increasing the weight of minimum spanning trees [Text] / G.N. Fredericson, R. Solis-Oba // Proc. 7-th Annual ACM-SIAM Symp. on Discrete Algorithms. – Amsterdam. – 1996. – P. 539–546.
12. Fredericson G.N., Solis-Oba R. Efficient Algorithms for Robustness in Matroid Optimization [Text] / G.N. Fredericson, R. Solis-Oba // Proc. 8-th Annual ACM-SIAM Symp. on Discrete Algorithms. – Amsterdam. – 1997. – P. 659–668.
13. Cheng E. A faster algorithm for computing the strength of a network [Text] / E. Cheng, W.H. Cunningham // Inf. Proc. Letters. – 1994. – Vol. 49. – P. 209–212.
14. Cunningham W.H. Testing membership in matroid polyhedral [Text] / W.H. Cunningham // J. Comb. Theory. – 1984. – 36. – P. 161–188.

#### References

1. Gordeev Je.N. Issledovanie ustojchivosti zadachi o kratchajshem ostove v metrike  $l_1$  [Tekst] / Je.N. Gordeev // Vych. mat. i mat. fiz. – 1999. – Т. 39. – S. 770–778.

15. Gallo G. A fast parametric maximum flow algorithm and application [Text] / G. Gallo, M.D. Grigoriadis, R.E.Tarjan // SIAM J. Comput. – 1989. – 18. – P. 30–55.

16. Gordeev Je.N. O edinstvennosti reshenija nekotoryh kombinatornyh zadach vybora [Tekst] / Je.N. Gordeev, L.I. Lipkin //Metody diskretnogo analiza: sbornik trudov. – Novosibirsk, 1989. – Vyp. 49 – S. 13–31.

17. Artemenko V.I. Metod formirovaniya optimal'nyh programmnyh traektorij robota-manipuljatora [Tekst] / V.I. Artemenko, Je.N. Gordeev, Ju.I. Zhuravlev i dr. // Kibernetika i sistemnyj analiz. – 1986. – № 5. – S. 84–107.

18. Gordeev Je.N. Ob adekvatnosti modelirovaniya processov v setjah [Tekst] / Je.N. Gordeev // Jelektrosvjaz'. – 1999. – № 8. – S. 16–20.



**Сухинец Ж.А.**  
**Sukhinets Zh.A.**

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



**Сухинец А.В.**  
**Sukhinets A.V.**

*студент  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа*

УДК 621.317

## **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТА-КОД ДЛЯ ЧАСТОТНЫХ ДАТЧИКОВ**

В статье рассмотрен способ построения функционального преобразователя частоты синусоидальных сигналов для частотных датчиков с использованием принципа ФАПЧ, реализуемого электронно-управляемым фазовращателем. Преобразователь позволяет решить актуальную задачу обеспечения высокой точности, быстродействия и универсальности измерения без дополнительных преобразований в физических параметрах измеряемых величин и может использоваться в системах контроля и управления технологическими процессами. Использование частотных датчиков для измерения различных физических величин получили большое распространение в системах автоматического регулирования, измерения, контроля и дистанционной передачи информации. Преобразование измеряемой величины в пропорциональную ей частоту, совмещает простоту и универсальность, свойственную аналоговым устройствам, с точностью и помехоустойчивостью, характерными для датчиков с кодовым выходом. Кроме того, с энергетической точки зрения самым тяжелым участком измерительного канала является участок от выхода частотного датчика до входа усилительно-преобразующей аппаратуры. Мощность же даже низкодобротных РС-датчиков на три-четыре порядка превышает мощности реостатных, индуктивных, тензорезистивных, амплитудных преобразователей, что предопределяет их нечувствительность паразитным э.д.с., переходным сопротивлениям и взаимным влияниям каналов в информационно-измерительных системах. Однако нелинейные зависимости выходной частоты датчиков от физических параметров не позволяют использовать стандартные схемы частотомеров в системах измерения и регулирования. Использование варикапов в качестве управляемых напряжением чувствительных безынерционных емкостей в фазовращателях цепной трехполосной структуры типа РС позволяет получить новые характеристики управления, не достигаемые в подобных схемах с линейными элементами, а именно: увеличение диапазонов регулирования в

системах автоматической подстройки частоты.

Способ преобразования частоты реализуется использованием фазовой автоподстройки номинальной частоты аналогового сигнала с применением электронно-управляемого фазовращателя, что повышает точность, т. к. отсутствует частотная расстройка между измеряемым и уравновешенным сигналами в момент измерения, и быстродействие, а также устраняет методическую погрешность измерения.

*Ключевые слова:* номинальная частота, частотный датчик, функция преобразования, фазовращатель, варикап, преобразователь частота-код, квазирезонанс, микроконтроллер.

## FUNCTIONAL CONVERSION FREQUENCY-CODE FOR FREQUENCY SENSORS

The article presents a method of constructing functional frequency sinusoidal signal converter for frequency sensors using phase-locked loop, which is realized by electronically-controlled phase shifter. Frequency indicator allows solving actual tasks of high accuracy, high-speed performance and versatility measurement without additional conversions in measuring values physical parameters and can be used for working in control systems and technological processes managing. Use of frequency sensors in measuring values physical parameters became widespread in automatic control systems, measurement and remote transmission of information. Converting the measured frequency proportional to its frequency combines simplicity and versatility, which is characteristic of analog devices with accuracy and noise immunity, which are typical for the sensors with output code. Furthermore, the most complicated area of the measuring channel is the area from the output frequency of the sensor to the entrance of the amplifying equipment from an energy point of view. The power of low-quality RC-sensors is for three – four orders of magnitude greater than the power rheostat, inductive, tensoresistive and amplitude converters that predetermine their insensitivity to parasitic EMF, transfer resistances and crosstalk in information and measuring systems. However, nonlinear dependence of the output frequency of the physical parameters of the sensors does not allow the use of standard frequency meter circuit in measurement and control systems. The use of variable-capacitance diodes as voltage controlled voltage freewheeling capacity in phase shifter chain tripolar structure provides new characteristics of the control, which were not achieved in such schemes with linear elements, specifically increasing of ranges regulation systems of automatic frequency.

The method of frequency conversion is implemented by using phase-locked nominal frequency of the analog signal with the use of electronically controlled phase shifter, which increases the accuracy and speed, because of the lack of frequency detuning between the measured and balanced signals at the time of measurement, and also eliminates the systematic error of measurement.

*Key words:* nominal frequency, frequency sensor, conversion function, phase shifter, variable-capacitance diode, frequency-code converter, quasisonance, microcontroller.

Использование частотных датчиков для измерения неэлектрических величин (температуры, давления, уровня, концентрации веществ и т. д.) получило наибольшее распространение. Преобразование измеряемой величины в пропорциональную ей частоту совмещает простоту и универсальность [1], свойственную аналоговым устройствам, с точностью и помехоустойчивостью, присущими для датчиков с кодовым выходом. Кроме того, с энергетической точки зрения самым тяжелым участком измерительного канала является участок от выхода датчика до входа усилительно-преобразующей аппаратуры. Мощность же даже низкодобротных RC-датчиков на три-четыре порядка превышает мощности реостатных, индуктивных, тензорезистивных, пьезоэлектрических амплитудных преобразователей, что предопределяет их нечувствительность паразитным э.д.с., переходным сопротивлениям и взаимным влияниям каналов в информационно-измерительных

системах. Однако нелинейные зависимости выходной частоты датчиков от физических параметров не позволяют использовать стандартные схемы частотомеров в системах измерения и регулирования.

Другая особенность частотных преобразователей заключается в том, что при изменении измеряемого параметра от нулевого значения до максимума, например, уровня, деформации и т. п., выходная частота изменяется в некотором диапазоне.

Так, выходная частота  $f$  струйно-акустического датчика температуры газов ГТД при изменениях абсолютной температуры  $\Theta = 293 \div 1650 \text{ K}$  изменяется [2] от 13200 до 31200 Гц по закону

$$f_n = nb\sqrt{\theta},$$

где  $n$  – номер гармоники;  $b$  – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров датчика.

Причем для измерения используется лишь первая гармоника полигармонического сигнала.

Естественно, что в таких случаях необходимы

специализированные функциональные частотомеры или преобразователи частота-код номинальных значений, т. е. работающие в требуемом диапазоне частот.

В [3] предложен частотомер номинальных значений, в котором импульсы измеряемой частоты после усилителя-формирователя и заполнения цифрового счетчика до определенного числа, соответствующего номинальному значению, управляют через триггер открытием ключа на время отношения номинальной частоты к измеряемой. За это же время реверсивный счетчик из начального заданного перед измерением значения отсчета, равного удвоенному произведению номинальной частоты на отношение опорной частоты к номинальной, вычитают импульсы опорной частоты, поступающие на него от генератора импульсов, и формирует показание, пропорциональное измеряемой частоте.

Его недостатками являются сложность схемы, малый диапазон измерений, большая методическая погрешность измерения и невозможность представления результатов измерения в физических единицах измеряемого параметра.

В [4] предложен способ измерения отклонений частоты от номинального значения, основанный на подсчете числа периодов образцовой частоты в течение одного периода измеряемой частоты убывающим итогом от начального значения, пропорционального номинальной величине периода сигнала измеряемой частоты, в котором для упрощения процесса измерения меняют индикацию состояния счетчика на инверсную при получении нуля и продолжают подсчет импульсов убывающим итогом до конца периода. Этот способ, реализованный в цифровом измерителе отклонения измеряемой частоты от номинальной [5], имеет существенные недостатки, которыми являются низкие быстродействие и точность, сложность, большое количество операций по обработке синусоидальных сигналов и необходимость использования дополнительного устройства вычитания из текущего значения частоты ее начального значения, соответствующего нулевому значению измеряемого параметра. В [6] предложена схема развертывающего преобразователя с фиксированным приращением фазы сигнала преобразуемой частоты, у которой имеются погрешности: квантования, методическая, зависящая от емкости счетчика и значений измеряемой частоты, а также переменное время нелинейного преобразования.

Задачей исследования является разработка функционального преобразователя частота-код (ФПЧК) повышенной точности и быстродействия для преобразования параметров от аналоговых дат-

чиков с частотным выходом в физические единицы с использованием минимального набора стандартных функциональных узлов, что обеспечит высокую надежность.

Поставленная задача решается осуществлением способа непосредственного преобразования измеряемой частоты синусоидального сигнала датчика  $f_x$  в код с использованием (рис. 1) электронно-управляемого функциональным генератором развертки (ФГР) фазовращателя, соединенного с первым входом индикатора равенства фаз (ИРФ), на второй вход которого поступает преобразуемая частота напрямую. Для расширения диапазона измерения в качестве электронно-управляемого фазовращателя (ЭУФ) предложена цепная трехполосная структура (ЦТС), состоящая из  $n/2$   $RC$ -звеньев, где роль емкостей  $C$  выполняют варикапы [7], практически безынерционные элементы [8]. Однако, до сих пор попытки использовать нелинейные элементы в этих целях ограничивались малыми диапазонами измерений [9, 10]. Применение ЦТС и способа развертывающего преобразования позволило расширить возможности использования нелинейных элементов в этих целях. Электронно-управляемый фазовращатель (ЭУФ), соединенный с первым входом ИРФ, осуществляет перестройку частоты квазирезонанса ЭУФ до равенства фаз с частотой, поступающей непосредственно на второй вход компаратора, под управляющим воздействием ФГР, запускаемого одновибратором (ОВ). ИРФ при равенстве фаз через ключ (Кл) фиксирует напряжение развертки ФГР, которое с помощью АЦП преобразуется в код. Микроконтроллер (МК), программу которого снабжают градуировочными характеристиками различных типов датчиков, управляет формой напряжения развертки ФГР. Например, для рассмотренного струйно-акустического датчика температуры зависимость  $u_p$  развертывающего напряжения ФГР по первой гармонике от времени  $t$  будет

$$u_p(t) = \sqrt{\theta}.$$

Таким образом, одним из основных узлов ФПЧК является ЭУФ,  $n$ -плечая схема которого приведена на рис. 2.

Формулы для расчетов числа звеньев  $n/2$ , коэффициента  $k_n$  и частот квазирезонанса  $f_0$  из [11] справедливы и для проектирования ЭУФ:

$$f_0 = \frac{k_n}{2\pi RC_B} \sqrt{\frac{U_B}{U_p + \varphi_k}},$$

где  $C_B$ ,  $U_B$  – емкость и напряжение смещения варикапа, соответствующие верхней частоте перестройки;  $U_p$  – напряжение развертки;  $\varphi_k$  – контактная разность

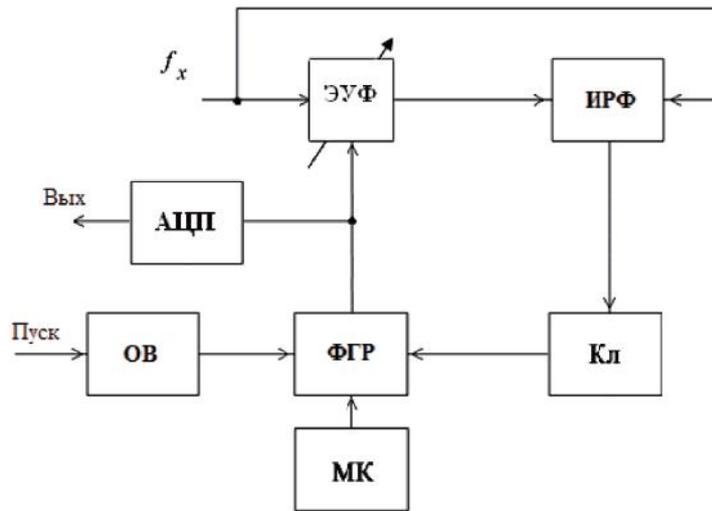


Рис. 1. Структурная схема функционального преобразователя частота-код

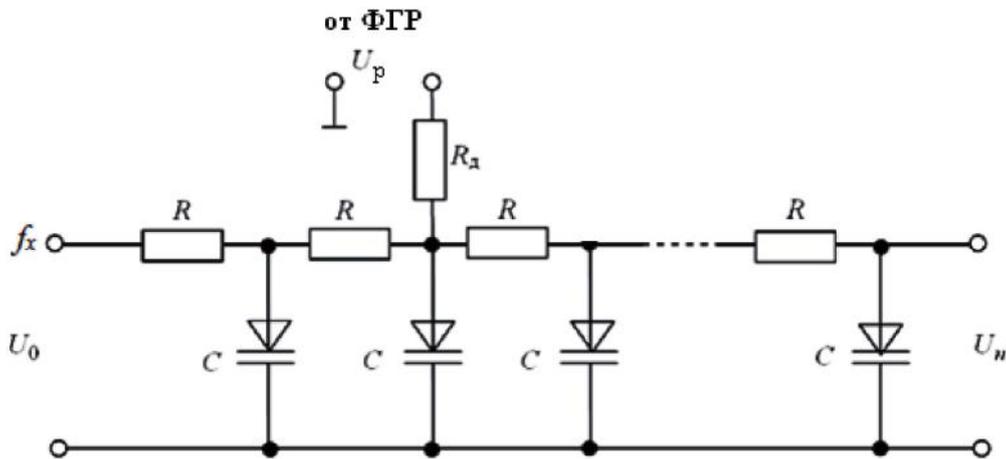


Рис. 2. Электронно-управляемый фазовращатель

потенциалов  $p$ - $n$  перехода, лежащая в пределах 0,4–0,7 В.

Коэффициент  $k_n$  находится из выражения

$$\sum_{i=0,1,\dots}^p (-1)^i k_n^{2i+1} C_{0,5n+1+2i}^{2+4i} = 0,$$

где  $C_{0,5n+1+2i}^{2+4i}$  – сочетания из  $2+4i$  элементов по  $0,5n+1+2i$  элемента;  $p = 0,25n - 1$  – для четных  $0,5n$ ;  $p = 0,25(n + 2) - 1$  – для нечетных  $0,5n$ .

Зная диапазон изменения выходной частоты датчика  $\Delta f$ , равный  $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ , выбираем из [11] соответствующее значение коэффициента  $k_n$ .

По результатам исследования влияния изменения емкостей ЭУФ (рис. 2) с числом плеч  $n = 20$ , состоящего из варикапов КВ102 и сопротивлений 100 кОм под действием развертывающего напряже-

ния от 4 до 11 В на частоту квазирезонанса [12] была получена зависимость ее изменения (рис. 3) в пределах от 12,5 до 20 кГц.

Представляет интерес использования в качестве ЭУФ искусственных линий в виде интегрально выполненных преобразователей с распределенными параметрами [13].

Способ преобразования номинальной частоты реализуется использованием принципа фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) аналогового сигнала с применением ЭУФ, что повышает точность, т. к. отсутствует частотная расстройка между измеряемым и уравновешенным сигналами в момент измерения, и быстродействие, а также устраняет [14] методическую погрешность измерения.

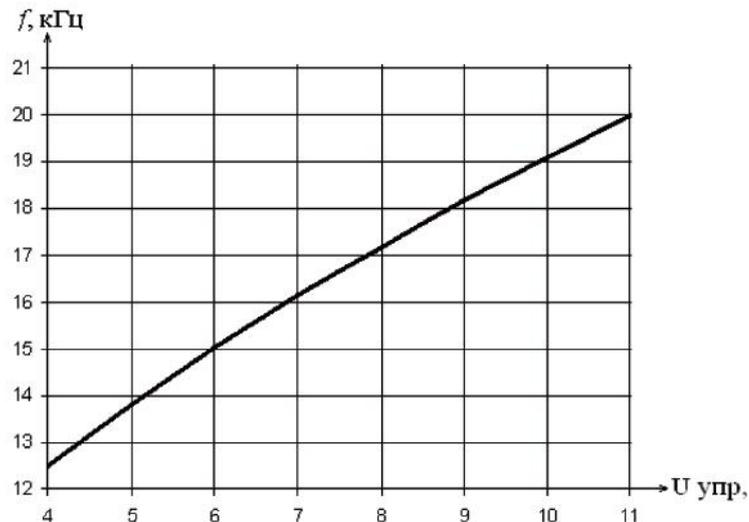


Рис. 3. Зависимость частоты квазирезонанса от управляющего напряжения для двадцатиплечевой схемы фазовращателя

Таким образом, предложенная схема функционального преобразователя частота-код для синусоидальных сигналов частотных датчиков с использованием принципа ФАПЧ, реализуемого электронно-управляемым фазовращателем, обеспечивает высокую надежность, точность, быстродействие и универсальность применения преобразователя без дополнительных вычислительных операций и преобразований физических параметров измеряемых величин. Кроме того, ЭУФ одновременно обеспечивает фильтрацию информативной частоты, обеспечивая его настройку на первую гармонику полигармонического сигнала, что дополнительно увеличивает точность преобразования.

#### Список литературы

1. *Новицкий П.В.* Цифровые приборы с частотными датчиками [Текст] / П.В. Новицкий, В.Г. Кнорринг, В.С. Гутников. – Л.: Энергия, 1970. – 424 с.
2. *Гулин А.И.* Быстродействующий измеритель температуры газов в газотурбинном двигателе [Текст] / А.И. Гулин // Авиакосмическое приборостроение. – 2012. – № 9 – С. 10–14.
3. *Шляндин В.М.* Цифровые измерительные устройства [Текст] / В.М. Шляндин. – М.: Высшая школа, 1981. – 335 с.
4. *А.с. СССР № 336612, G01R23/10* от 21.04.1972. Способ измерения отклонений частоты от номинального значения [Текст] / А.Г. Рыжевский, Ю.А. Смагин, Э.К. Шахов, В.М. Шляндин. – Опубл. 19.10.1972. – Бюл. № 14.
5. *А.с. СССР № 300833, G01R17/00* от 07.04.1971. Цифровой измеритель отклонения измеряемой частоты от номинальной [Текст] / Е.П. Осадчий, А.Г. Рыжевский, Ю.А. Смагин и др. – Опубл. 10.06.1971. – Бюл. № 13.
6. *Мартьяшин А.И.* Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения [Текст] / А.И. Мартьяшин, Э.К. Шахов, В.М. Шляндин. – М.: Энергия, 1976. – 392 с.
7. *Берман Л.С.* Введение в физику варикапов [Текст] / Л.С. Берман. – Л.: Наука, 1968. – 180 с.
8. *Гулин А.И.* Функциональный частотомер номинальных значений синусоидальных сигналов для частотных датчиков [Текст] / А.И. Гулин, Ж.А. Сухинец // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2012. – № 9. – С. 33–37.
9. *Калашников Н.И.* Применение RC-фазовращателей для измерения малых фазовых сдвигов методом компенсации [Текст] / Н.И. Калашников, Л.А. Синицкий // Приборы и техника эксперимента. – 1975. – № 4. – С. 97–98.
10. *Вострокнутов Н.Н.* Теория погрешности цифровых измерительных устройств с нелинейной номинальной функцией преобразования [Текст] / Н.Н. Вострокнутов // Измерительная техника. – 1991. – № 6. – С. 3–5.
11. *Гулин А.И.* Проектирование многозвенных RC-генераторов [Текст] / А.И. Гулин // Известия вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 56. – № 3. – С. 14–18.
12. *Свидетельство* об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012661380 от 13.12.2012. Исследование влияния разбросов параметров многозвенных RC-элементов на частоту квазирезонанса [Текст] / Ж.А. Сухинец, А.В. Сухинец // Фед. служба по интеллект. собственности (Роспатент). – М., 2012.
13. *Gulin A.I.* Investigation of errors in simulation of devices with distributed parameters [Text] / A.I.

Gulin, Zh.A. Sukhinets // *Radioelectronics and Communications Systems*. – 2012. – Vol. 55, № 5. – P. 233–237.

14. *Радиоприемные устройства* [Текст] / Под ред. А. П. Жуковского. – М.: Высшая школа, 1989. – 344 с.

#### References

1. *Novickij P.V.* Cifrovye pribory s chastotnymi datchikami [Tekst] / P.V. Novickij, V.G. Knorring, V.S. Gutnikov. – L.: Jenergija, 1970. – 424 s.

2. *Gulin A.I.* Bystrodejstvujushhij izmeritel' temperatury gazov v gazoturbinnom dvigatele [Tekst] / A.I. Gulin // *Aviakosmicheskoe priborostroenie*. – 2012. – № 9 – S. 10–14.

3. *Shljandin V.M.* Cifrovye izmeritel'nye ustrojstva [Tekst] / V.M. Shljandin. – M.: Vysshaja shkola, 1981. – 335 s.

4. *A.s. SSSR № 336612, G01R23/10 ot 21.04.1972.* Sposob izmerenija otklonenij chastoty ot nominal'nogo znachenija [Tekst] / A.G. Ryzhevskij, Ju.A. Smagin, Je.K. Shahov, V.M. Shljandin. – Opubl. 19.10.1972. – Bjul. № 14.

5. *A.s. SSSR № 300833, G01R17/00 ot 07.04.1971.* Cifrovij izmeritel' otklonenija izmerjaemoj chastoty ot nominal'noj [Tekst] / E.P. Osadchij, A.G. Ryzhevskij, Ju.A. Smagin i dr. – Opubl. 10.06.1971. – Bjul. № 13.

6. *Martjashin A.I.* Preobrazovateli jelektricheskikh parametrov dlja sistem kontrolja i izmerenija [Tekst] / A.I. Martjashin, Je.K. Shahov, V.M. Shljandin. – M.: Jenergija, 1976. – 392 s.

7. *Berman L.S.* Vvedenie v fiziku varikapov

[Tekst] / L.S. Berman. – L.: Nauka, 1968. – 180 s.

8. *Gulin A.I.* Funkcional'nyj chastotomer nominal'nyh znachenij sinusoidal'nyh signalov dlja chastotnyh datchikov [Tekst] / A.I. Gulin, Zh.A. Suhinec // *Pribory i sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika*. – 2012. – № 9. – S. 33–37.

9. *Kalashnikov N.I.* Primenenie RC-fazovrashhatelej dlja izmerenija malyh fazovyh sdvigov metodom kompensacii [Tekst] / N.I. Kalashnikov, L.A. Sinickij // *Pribory i tehnika jeksperimenta*. – 1975. – № 4. – S. 97–98.

10. *Vostroknutov N.N.* Teorija pogreshnosti cifrovyyh izmeritel'nyh ustrojstv s nelinejnoj nominal'noj funkciej preobrazovanija [Tekst] / N.N. Vostroknutov // *Izmeritel'naja tehnika*. – 1991. – № 6. – S. 3–5.

11. *Gulin A.I.* Proektirovanie mnogozvennyh RC-generatorov [Tekst] / A.I. Gulin // *Izvestija vuzov. Priborostroenie*. – 2012. – T. 56. – № 3. – S. 14–18.

12. *Svidetel'stvo ob oficial'noj registracii programy dlja JeVM № 2012661380 ot 13.12.2012.* Issledovanie vlijanija razbrosov parametrov mnogozvennyh RC-jelementov na chastotu kvazirezonsansa [Tekst] / Zh.A. Suhinec, A.V. Suhinec // *Fed. sluzhba po intellekt. sobstvennosti (Rospatent)*. – M., 2012.

13. *Gulin A.I.* Investigation of errors in simulation of devices with distributed parameters [Text] / A.I. Gulin, Zh.A. Sukhinets // *Radioelectronics and Communications Systems*. – 2012. – Vol. 55, № 5. – P. 233–237.

14. *Radiopriemnye ustrojstva* [Tekst] / Pod red. A.P. Zhukovskogo. – M.: Vysshaja shkola, 1989. – 344 s.

# МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES



**Доломатов М.Ю.**

**Dolomatov M.Yu.**

*кандидат технических наук, доктор химических наук,  
профессор кафедры «Физика», заведующий научно-  
исследовательской лабораторией «Физика электронных  
процессов и наноматериалов» ФГБОУ ВПО «Уфимский  
государственный университет экономики и сервиса»,  
Россия, г. Уфа*

УДК 535.333,539.19

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ПРИМЕРАХ НЕКОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ СПЕКТРОСКОПИИ

Для естествознания XX–XXI веков характерна попытка создания законченной картины мироздания. При этом ученые исходят из теоретических моделей, полученных из данных эксперимента или наблюдений. На пути построения законченных картин физических явлений существуют объективные трудности, связанные с математической интерпретацией данных экспериментов и наблюдений. Рассмотрена проблема достаточности и полноты экспериментальной информации и объективных ограничений, которые препятствуют пониманию гипотез и построению теорий. Фундаментальной причиной невозможности создания завершенной картины явлений является некорректность по Адамару – Тихонову задач редукции к идеальному наблюдателю или идеальному прибору. Эта задача сводится к общему уравнению.

$$F(t, X) = L^{-1}G(t, X),$$

где  $F(t, X)$  – реальный физический закон, дифференциальная форма его представления (Платоновский эйдос);  $X$  – множество переменных параметров эксперимента;  $t$  – время;  $G(t, X)$  – массив ограниченной экспериментальной информации о явлении, которую мы можем измерить или наблюдать;  $L$  – оператор, отражающий или переводящий в случае эксперимента идеальную форму закона в регистрируемую физическую величину. Он характеризует действие прибора или средств наблюдения на объект или объекта на аппаратуру измерения.

Рассмотрена ситуация, когда разные средства эксперимента (наблюдения)  $L$  и разные явления  $F(t, X)$  приводят к одному и тому же наблюдаемому результату  $G(t, X)$  в пределах допустимой точности  $\pm\delta$ . Это означает, что один и тот же результат, наблюдаемый исследователем, может быть интерпретирован разными гипотезами и теориями. Приведенные положения обоснованы примерами из различных направлений физических экспериментов в области приложений спектроскопии к астрофизике и квантовой механике.

*Ключевые слова:* теория эксперимента, некорректные задачи, спектры, красное смещение, атомы, принцип неопределенности.

## METHODOLOGICAL PROBLEM OF SIMULATION AND INTERPRETATION DATA PHYSICAL RESEARCHES ON EXAMPLES ILL-POSED PROBLEM OF SPEKTROSKOPY

The natural science XX–XXI centuries are characterize finished picture of the universe the creation. With all this a scientists going theoretical modeles finded from the experiments and observations. Objective the limitation exist connected with mathematical interpretation data of the experiments and observations on the path to finished pictures of the physical phenomenon.

Problem had consider adequacy fullness experimental objective impede which impede understanding hypothesis and building theory. The ill-posed problem on by Adamar – Tihonov is fundamental reason impossibility creation finished pictures of a natural phenomenon for tasks of reduction to ideal device or ideal observer. This problem reduce to general equation  $F(t, X) = L^{-1} G(t, X)$ , where  $F(t, X)$  is a real physical law in differential form (eides of Platon);  $X$  – set of variable;  $G(t, X)$  – limited array of experimental data which can be measure or to observe;  $L$  – operator, reflective or converting, for experiment ideal form law in registered physical value. This operator characterizes an interdependence of device or a conditions of observation (experiment) on the objec. The situation is considered when different of device an experiment (an observations)  $L$  for various of phenomena  $F(t, X)$  was observed equal results  $G(t, X)$  within possible accuracy  $\pm\delta$ .

This means that same the result by observed researcher can be interpreted different by hypotheses and theories.

Expound notions are corroborated the examples from different branches of physical experiments in the field of the spectroscopy, the astrophysicists and quantum mechanical.

*Key word:* theory of experiment, ill-posed problem, spectrum, red shift, quantum mechanica, uncertainty principle.

**Положение о том, что мир в действительности таков, каким он представляется человеку, произвольно и неверно. А потому и все выводы из этого положения, основанного на данных внешних чувств одного из существ мира, человека, не содержат в себе ничего реального и не могут удовлетворить серьезной любознательности [1]. Л. Н. Толстой.**

Для естествознания XX–XXI веков характерна попытка построения единой картины явлений исходя из теоретических моделей, построенных на данных эксперимента или наблюдений [2]. Поэтому целесообразно рассмотреть вопрос о достаточности и полноте экспериментальной информации и о объективных ограничениях, которые препятствуют интерпретации гипотез и построению научных теорий. Следует подчеркнуть, что на подобные ограничения человеческих знаний указывали еще античные философы-скептики. Например, Секст Эмпирик и Энесидем [3]. Платон учил, что объект, воспринимаемый сознанием, не соответствует его идеальной сущности – эйдосам, которые представляют собой идеальные основы объектов [3]. При анализе знаний полезно обратиться к идеям Э. Гуссерля [4], который провозглашает вторичность логики по сравнению с феноменологией, цель которой открыть фундаментальные сущности, или феномены, и идеальные законы по-

знания. Методологические и философские основы теорий в XX веке подробно разработаны Куном, Поппером, Локатосом и др. [5]. В данной работе мы ограничимся математическими и физическими аспектами проблемы применительно к вопросам теории и практики эксперимента. Целью работы является анализ ряда ограничений, которые приводят к так называемой некорректности физических задач. Из теории известно, что математическая модель эксперимента сводится к задаче редукции к идеальному прибору (наблюдателю). Эта модель выражается в виде интегрального уравнения, в частности сводится к уравнению Вольтерра 1-го рода [8–10]:

$$\iint_{\Omega} V(t, X) F(t, X) dt dx_1 \dots dx_n = G(t, X), \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $X$  – вектор измеряемых величин;  $V(t, X)$  – ядро интегрального уравнения, которое зависит от взаимодействия средства наблюдения или измерения со сложной системой, то есть от экспериментальной аппаратуры, для сложных систем она не всегда определена;  $F(t, X)$  – реальный физический закон (чистая сущность, феномен, эйдос), дифференциальная форма его представления, для статистических явлений это закон распределения случайных величин, определяющий вид искомой функции распределения изучаемого свойства – физической характеристики системы во времени;  $G(t, X)$  – массив ограниченной экспериментальной информации

о явлении, которую мы измеряем или наблюдаем, то есть реальное проявление закона.

Уравнение (1) можно представить в следующем операторном виде

$$LF(t, X) = G(t, X), \quad (2)$$

где  $L$  – оператор, отражающий или переводящий, в случае эксперимента, идеальную форму закона в регистрируемую физическую величину.

Решение уравнения (2) имеет вид:

$$F(t, X) = L^{-1}G(t, X). \quad (3)$$

В соответствии с правилами вычислительной математики и математической физики задачу определения монотонно ограниченных функций  $g$  по  $f$  называют корректно поставленной на паре пространств  $(G, F)$ , если:

- 1) для каждого  $f \in F$  существует решение  $g \in G$ ;
- 2) это решение однозначно;
- 3) задача устойчива в пространствах  $(G, F)$ , т. е. при малом изменении  $f$  в пространстве  $F$  мало меняется  $g$  в пространстве  $G$ .

Задачи, не удовлетворяющие перечисленным выше трем условиям, называют задачами некорректными по Адамару – Тихонову [8].

Задачи, в которых оператор  $L$  неограничен на множестве и множество возможных решений  $L F(t, X)$  не является компактом, названы существенно некорректными. Для них Тихонов выдвинул идею построения регуляризирующего оператора  $V$ , в некотором смысле близкого к  $L^{-1}$ , область значений которого при отображении из  $G$  в  $F$  допускала бы согласование с правой частью уравнения (3), известной приближенно. При этом оператор должен содержать параметр регуляризации  $\alpha$ , зависящий от точности исходной информации.

В дальнейшем мы будем рассматривать эти модели не в математическом, а в методологическом аспекте. Возникает вопрос, насколько корректны физические задачи с точки зрения условий 1–3.

Рассмотрим случай, когда разные средства эксперимента (наблюдения)  $L$  и разные явления  $F(t, X)$ . Иными словами, множество операторов и функционалов создают в сознании экспериментатора (наблюдателя) одну и ту же картину наблюдаемого явления –  $G(t, X)$  в пределах допустимой точности  $\pm\delta$ . Это означает, что один и тот же результат, наблюдаемый исследователем, может быть образован разными путями. Рассмотрим пример из астрофизики. Одной из фундаментальных свойств Вселенной является явление красного смещения в спектрах галактик, открытое Хабблом в 1929 г., по данным наблюдений сдвигов спектральных линий атомов в спектрах галактик. Это смещение спектров космических объектов в красную область  $G(t, X)$  можно представить множеством эф-

фектов [12–15]. Еще в 1974 г. в работе О.А. Мельникова, В.С. Попова была приведена классификация гипотез о красном смещении в спектрах галактик [12]. Авторы выделяли две группы гипотез. Первая группа гипотез связана с масштабом всей Метагалактики. К этой группе относятся: обычное явление Доплера; изменение фундаментальных физических постоянных, в том числе скорости света; изменение структуры пространства и времени. Вторая группа гипотез связана с локальными свойствами материи: рассеяние излучения (в том числе изменение с расстоянием показателя преломления межгалактической среды), гравитационные взаимодействия фотона с электронами и элементарными частицами.

Предполагают, что космологическое красное смещение галактик происходит благодаря потерям энергии при прохождении света сквозь холодную межгалактическую среду. Например, в работе А.И. Лаптухова [15] на основе решения нелинейных уравнений Максвелла показано, что недоплеровский механизм красного смещения галактических фотонов на основе рассеяния Томсона согласуется с данными наблюдений и не требует ускоренного расширения галактик. В последние годы подтверждены данные Р. Сантিলли, объясняющие красное смещение так называемым изотопическим красным смещением (IRS), не связанным с рассеянием излучения. Таким образом, картина расширяющейся с момента большого взрыва Вселенной построена на одной из множества гипотез. Невозможно построить теорию, а тем более законченную картину явления, исходя из элементарного ограниченного набора экспериментальной информации. В огромной степени это касается не только физики, но и химии, в еще большей степени биологии.

Рассмотрим еще один вариант логических заключений из уравнений (2) и (3), когда разные операторы  $L$  действуют на один и тот же объект и дают различную картину эксперимента. Пример этого корпускулярно-волнового дуализма, когда электрон проходит через дифракционную решетку кристалла, как волна, но движется в электронно-лучевой трубке, как частица. Волновые свойства электрона были изучены в 1927 г. в опытах К. Девидсона и Л. Джеммера по дифракции электрона на монокристаллах никеля. Не исключено, что дуализм – это не единственное уникальное свойство электронов. Для сложных систем характерна множественность явлений. Принцип дополнительности следует из многовариантности процессов в сложных системах. Этот принцип впервые был введен в квантовую механику Н. Бором. Согласно этому принципу электрон не может быть изучен методами исследования, характерными только для волн или только

для частиц, поскольку является объектом, имеющим корпускулярно-волновые свойства [16]. К сожалению, о более сложных системах из объектов, имеющих совокупность различных и не всегда изученных свойств, часто судят по одному-двум экспериментальным фактам. Как уже отмечалось, в современной космологии, например, картина происхождения такой сверхсложной системы, как Вселенная, строится на реликтовом радиоизлучении атома водорода и красном смещении спектров Галактик, которой приписывается исключительно релятивистский эффект Доплера.

Из уравнений 2 и 3 следует, что всегда можно подобрать пару  $L$  и  $G$ . Наконец, чтобы создать одинаковый образ явления  $F$ , можно построить значительное количество моделей. С одной стороны, это показывает ограниченность мышления, с другой стороны, не следует забывать, что природа многовариантна и редко один и тот же результат может быть достигнут одинаковым путем. И таких пар множество, значит существует множество равноценных теорий, которые интерпретируют одно и то же явление. В заключение остановимся на некоторых аспектах квантовой теории. Данные, полученные различными путями, свидетельствуют о некорректности моделей квантовой механики.

Рассмотрим примеры. Как известно, о строении атомов и молекул, а также составе космических объектов мы судим по их спектрам, то есть распределению интенсивности поглощаемого или испускаемого излучения. Процесс регистрации спектра детектором излучения можно описать с помощью уравнения Фредгольма первого рода [10]:

$$\int_0^{\infty} K(x,y) \cdot Z(y) dy = f(x), \quad (4)$$

где  $K(x,y)$  – ядро интегрального уравнения – совокупность приборных функций детектора (отклик детектора на поток монохроматического электромагнитного излучения),  $Z(y)$  – распределение падающего или испускаемого излучения по энергии,  $f(x)$  – экспериментально наблюдаемый спектр. Так как источники излучения испускают фотоны в широком диапазоне частот, отклик прибора состоит из значительного числа функций и может быть представлен матрицей.

Другой пример – феноменологическое рассмотрение движения электронов в квантовой механике. Оно возможно с использованием интегральной формы обыкновенного дифференциального уравнения Шредингера, которое сводится к задаче Коши при заданной начальной одноэлектронной волновой функции, описывающей взаимодействие электронов. Эта функция нестационарная и имеет вид:

$$\psi = \psi_0(\vec{r}_1, t_1). \quad (5)$$

Как известно, в интегральной Фейнмановской форме уравнение (3) имеет вид интегрального уравнения Фредгольма первого рода [17]:

$$\psi(\vec{r}_2, t_2) = \int K(\vec{r}_2, t_2; \vec{r}_1, t_1) \psi(\vec{r}_1, t_1) d\vec{r}_1. \quad (6)$$

Решением уравнения (6) при начальных условиях (5) является функция Грина:

$$K(\vec{r}_2, t_2; \vec{r}_1, t_1) = \delta(\vec{r}_2 - \vec{r}_1). \quad (7)$$

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

$$\sum \psi_n(\vec{r}_1) \psi_n(\vec{r}_2) = \delta(\vec{r}_2, \vec{r}_1). \quad (8)$$

Полученные недавно экспериментальные результаты по взаимному влиянию первого, второго и третьего потенциалов ионизации свидетельствуют о том, что электроны, находящиеся на разных атомных или молекулярных орбиталях, влияют друг на друга и их движение скоррелировано и взаимозависимо, поэтому правила (7, 8) нарушаются [18–19]. Более того, любой электрон может находиться на любой орбитали.

Кроме того, нарушение принципа ортогональности означает, что задача решения интегрального уравнения (4) некорректна по Адамару – Тихонову и имеет бесконечное множество решений, которые открывают дальнейшие пути для полуэмпирических и неэмпирических расчетов атомных и молекулярных систем. В заключение отметим математические проблемы некорректности, проблемы квантовой теории молекул, которые заключаются в неточности и громоздкости численных вычислений вследствие несовершенства теории. Квантовая механика точно построена для стационарных орбит атома водорода и, при переходе к молекулярным орбиталям возникает необходимость подгонки базисных волновых функций. Квантовая механика молекул неудовлетворительно описывает межмолекулярные взаимодействия и спиновые эффекты.

Последнее означает, что модели квантовой теории, построенные на Банаховых пространствах и алгебре Ли, некорректны изначально и целесообразны попытки применения других математических теорий, например изодуальной математики Сантилли [20].

Принцип неопределенности В. Гейзенберга [21], как известно, распространяется на макрообъекты и в общем виде формулируется как изменение свойств системы в ходе эксперимента или наблюдения. Крайний пример подобной ситуации описан в

романе С. Лема «Солярис», когда система – мыслящий океан – сама стала ставить эксперименты над космонавтами – экспериментаторами. Очевидно, в сложных системах следует учитывать принцип Ле-Шателье – Брауна, согласно которому любое внешнее воздействие на систему рождает противодействие со стороны самой системы. Именно игнорирование этих принципов является причиной массовых неудач экспериментов психологов и социологов. Кроме того, говоря о вероятности, мы подразумеваем неизменность внешних условий, в которых происходит событие. Изменение условий эксперимента, как известно [22], изменяет вероятность события. Если мы бросаем стальную монетку над поверхностью из железного сплава, то вероятность орла или решки равна 0,5. Теперь намагнитим одну из сторон или изменим. Монета будет падать в основном на намагниченную сторону. То же самое будет происходить при изменении формы монеты.

#### **Многовариантность сложных систем.**

Одно и то же состояние системы может быть достигнуто несколькими путями одновременно. Многовариантность эволюции эквивалентна множеству решений. Например, одна и та же молекула может быть получена несколькими реакциями. Одна и та же элементарная частица может быть получена в нескольких различных процессах. Современное состояние Вселенной может быть получено как сумма неоднородных, возникших в разное время процессов, совсем необязательно в ходе большего взрыва в одно и то же время и в одном месте.

Принцип дополненности следует из многовариантности процессов в сложных системах. Этот принцип впервые был введен в квантовую механику Н. Бором. Согласно этому принципу, электрон не может быть изучен методами исследования, характерными только для волн или только для частиц, поскольку является объектом, имеющим корпускулярно-волновые свойства. К сожалению, о более сложных системах из объектов, имеющих совокупность различных и не всегда изученных свойств, часто судят по одному-двум экспериментальным фактам. Отсюда решение задач типа (1)–(3) обречено на неоднозначность, неединственность.

#### **Заключение**

Таким образом, некорректные интегральные задачи физики означают многовариантность развития материи и, как следствие, многовариантность процесса познания. В физике так же, как в математике, необходимо вводить множество физик, так как однозначный подход противоречит принципам дополненности, многовариантности и эмерджент-

ности сложных систем. В заключение отметим, что принципиальная невозможность построения универсальной теории следует из теорем австрийского математика Курта Геделя [23], согласно которым система аксиом не может быть одновременно полной и непротиворечивой. Первая теорема Геделя гласит: если формализованная теория, не уступающая по сложности арифметике, непротиворечива, то в ней всегда найдется такое логическое утверждение, которое нельзя ни доказать, ни опровергнуть. Согласно второй теореме Геделя: если указанная теория непротиворечива, то не существует доказательства ее непротиворечивости приведенными средствами, отображаемыми в этой теории. Идеи Геделя далеко выходят за пределы арифметики. В общем случае состоятельность и полноту какой-либо логической системы можно установить, погружая исходную систему в систему более развернутую. Для обоснования непротиворечивости такой теории необходима теория, располагающая более совершенными средствами доказательств. Таким образом, Гедель показал, что при этом проблема состоятельности и полноты становится более сложной из-за усложнения логического языка. Низший иерархический уровень систем можно изучить, рассматривая систему на высшем уровне. Чтобы понять функцию частей системы, нужно знать о функции всей системы в целом. Теорема Геделя оказала влияние не только на теорию познания, но и теорию искусственного интеллекта. А. Тьюринг подтвердил, что нет способа определить, работает ли компьютерная программа, кроме как испытать ее на практике. Согласно теореме Геделя в рамках вычислительного процесса на ЭВМ мы не узнаем о том, как вычислить последующее значение в вычислительном алгоритме, поэтому требуется вмешательство программиста, чтобы выйти за пределы компьютера. Но выводы для теории систем еще более фундаментальные: для того, чтобы изучить процессы в системе  $S_i$ , необходимо перейти в систему более высокого иерархического уровня  $S_{i+1}$ , то есть в надсистему. Низший иерархический уровень систем можно изучить, рассматривая систему на высшем уровне. Чтобы построить теорию для Вселенной, необходимо перейти в систему более высокого уровня. Это означает принципиальную невозможность построения универсальной научной теории. Тем не менее в физике такие попытки продолжаются, например, попытки построения единой теории всех взаимодействий, теории происхождения Вселенной. На это затрачиваются огромные материальные и интеллектуальные ресурсы современной физики.

Отметим, что следствия из теоремы Геделя не

противоречат взглядам К. Поппера о фальсификации научных теорий. Современная наука недостаточно рассматривает эти трудные аспекты познания, так как основана на эго- и антропоцентрических концепциях и верит в неограниченные возможности человеческого разума.

Таким образом, кроме субъективных логических ограничений, связанных с антропоцентризмом и естественными границами человеческого интеллекта, существуют объективные пределы, связанные с некорректностью математических моделей явлений в сложных системах. Несомненно, что выход из создавшегося положения дают феноменологические полумпирические модели явлений.

#### Список литературы

1. Толстой Л.Н. Предисловие к статье Эдуарда Карпентера «Современная наука» [Текст] / Л.Н. Толстой: полное собрание сочинений в 90 томах. – М.: Государственное издательство художественной литературы. – 1954. – Т. 31. – С. 87–95.
2. *Философский энциклопедический словарь* [Текст] / под ред. Е.Ф. Губского, Г.В. Кораблёвой, В.А. Лутченко. – М. ИНФРА-М, 2001. – 576 с.
3. *Эмпирик* Секст. Собрание сочинений [Текст] / Секст Эмпирик. – М.: Наука, 1967. – Т. 2. – 165 с.
4. Гуссерль Э. Собрание сочинений. – Т. 1. [Текст] / Э. Гуссерль. – М.: Гнозис, 1994. – 370 с.
5. Поппер К. Логика и рост научного знания [Текст] / К. Поппер. – М.: Прогресс, 1983. – 255 с.
6. Кун Т. Структура научных революций [Текст] / Т. Кун; пер. с англ. И.З. Налетова; общая ред. и послесловие С.Р. Микулинского и Л.А. Марковой. – М.: Прогресс, 1975. – 178 с.
7. Капица П.Л. Эксперимент. Теория. Практика [Текст] / П.Л. Капица – М.: Наука, 1985. – 165 с.
8. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач [Текст] / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин – М.: Наука, 1979. – 285 с.
9. Гончарский А.В. Численные методы решения обратных задач астрофизики [Текст] / А.В. Гончарский, А.М. Черепашук, А.Г. Ягола. – М.: Наука, 1978. – 335 с.
10. Иванов В.К. Теория линейных некорректных задач и ее приложения [Текст] / В.К. Иванов, В.В. Васин, В.П. Танана. – М.: Наука, 1978. – 208 с.
11. Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным [Текст] / В.Н. Вапник. – М.: Наука, 1979. – 447 с.
12. Мельников О.А. Недоплеровские объяснения красного смещения в спектрах далеких галактик [Текст] / О.А. Мельников, В.С. Попов / Сборник «Некоторые вопросы физики космоса» в 2 т. – М.: ВАГО АН СССР, 1974. – Т. 2. – С. 9–32.
13. Santilli R.M. Experimental Confirmation of the IsoRedShift at Sun at Sunset and Sunrise with Consequential Absence of Universe Expansion and Related Conjectures [Electronic resource] / R.M. Santilli, G. West, G. Amato // Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering. – 2012. – Vol. 12. – № 165. – URL: <http://www.santilli-foundation.org/docs/Confirmation-sun-IRS.pdf>.
14. Ahmar H. Additional experimental confirmations of Santilli's IsoRedShift and the consequential expected absence of universe expansion [Electronic resource] / H. Ahmar, G. Amato, J.V. Kadeisvili, J. Manuel, G. West, O. Zogorodnia // Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering. – 2013. – Vol. 13. – № 321. – URL: <http://www.santilli-foundation.org/docs/IRS-confirmations-212.pdf>.
15. Лантухов А.И. К расчету структуры электромагнитного поля фотонов в рамках теории неточечных частиц. – Науч. сессия-конф. секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (23–27 ноября 2009 г., ИТЭФ им. А.И. Алиханова, Москва) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [matras.iter.ru/npd2k09/1/ponbol/ofv/lap-iter.ppt](mailto:matras.iter.ru/npd2k09/1/ponbol/ofv/lap-iter.ppt) (дата обращения 30.08.2014).
16. Ландау Л.Д. Квантовая механика (нерелятивистская теория) [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц; изд. 6-е, испр. – М.: Физматлит, 2004. – 800 с.
17. Dolomatov M.Yu. 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. – Vol. 4. – № 3. – P. 152–156.
18. Dolomatov M.Yu. Specific quantum interaction in the molecules and nanoparticles of organic semiconductors [Text] / M.Yu. Dolomatov, N.Kh. Paymurzina, K.F. Latypov, G.R. Mukaeva // The 14th edition of Trends in Nanotechnology International Conference, 09-13.09.2013, Seville, Spain [Electronic resource]. – URL: <http://www.tntconf.org/2013/Abstracts/> (дата обращения 30.08.2014).
19. Dolomatov M.Yu. 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. – Vol. 3. – P. 183–199.
20. Santilli R.M. Foundations of Theoretical Mechanics: 2 vol. [Text] / R.M. Santilli. – New York: Springer-Verlag Heidelberg, 1978.
21. Гейзенберг В. Физика и философия. Часть и целое [Текст] / В. Гейзенберг. – М.: Наука, 1989. – 400 с.
22. Борель Э. Вероятность и достоверность

[Текст] / Э. Борель. – М.: Наука. 1969. – 110 с.

23. Успенский В.А. Теорема Геделя о неполноте. Популярные лекции по математике [Текст] / В.А. Успенский. – М.: Наука, 1982. – 110 с.

#### References

1. Tolstoj L.N. Predislovie k stat'e Jeduarda Karpentera «Sovremennaja nauka» [Текст] / L.N. Tolstoj: polnoe sobranie sochinenij v 90 tomah. – М.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo hudozhestvennoj literatury. – 1954. – Т. 31. – С. 87–95.

2. *Filosofskij jenciklopedicheskiy slovar'* [Текст] / pod red. E.F.Gubskogo, G.V. Korabl'jovoj, V.A. Lutchenko. – М.: INFRA-M, 2001. – 576 s.

3. *Jempirik* Sekst. Sobranie sochinenij [Текст] / Sekst Jempirik. – М.: Nauka, 1967. – Т. 2. – 165 s.

4. *Gusserl' Je.* Sobranie sochinenij. – Т.1. [Текст] / Je. Gusserl'. – М.: Gnozis, 1994. – 370 s.

5. *Popper K.* Logika i rost nauchnogo znaniya [Текст] / K. Popper. – М.: Progress, 1983. – 255 s.

6. *Kun T.* Struktura nauchnyh revoljucij [Текст] / T. Kun; per. s angl. I.Z. Naletova; obshhaja red. i posleslovie S.R. Mikulinskogo i L.A. Markovoj. – М.: Progress, 1975. – 178 s.

7. *Kapica P.L.* Jeksperiment. Teorija. Praktika. [Текст] / P.L. Kapica – М.: Nauka, 1985. – 165 s.

8. *Tihonov A.N.* Metody reshenija nekorrektnykh zadach [Текст] / A.N. Tihonov, V.Ja. Arsenin – М.: Nauka, 1979. – 285 s.

9. *Goncharskij A.V.* Chislennye metody reshenija obratnykh zadach astrofiziki [Текст] / A.V. Goncharskij, A.M. Cherepashuk, A.G. Jagola. – М.: Nauka, 1978. – 335 s.

10. *Ivanov V.K.* Teorija linejnykh nekorrektnykh zadach i ee prilozhenija [Текст] / V.K. Ivanov, V.V. Vasin, V.P. Tanana. – М.: Nauka, 1978. – 208 s.

11. *Vapnik V.N.* Vosstanovlenie zavisimostej po jempiricheskim dannym [Текст] / V.N. Vapnik. – М.: Nauka, 1979. – 447 s.

12. *Mel'nikov O.A.* Nedoplerovskie ob'jasnenija krasnogo smeshhenija v spektrah daljokih galaktik [Текст] / O.A. Mel'nikov, V.S. Popov / Sbornik «Nekotorye voprosy fiziki kosmosa»: v 2 t. – М.: VAGO AN SSSR, 1974. – Т. 2. – С. 9–32.

13. *Santilli R.M.* Experimental Confirmation of the IsoRedShift at Sun at Sunset and Sunrise with Consequential Absence of Universe Expansion and Related Conjectures [Electronic resource] / R.M. Santilli, G. West, G. Amato // Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering. – 2012. – Vol. 12. – №

165. – URL: <http://www.santilli-foundation.org/docs/Confirmation-sun-IRS.pdf>

14. *Ahmar H.* Additional experimental confirmations of Santilli's IsoRedShift and the consequential expected absence of universe expansion [Electronic resource] / H. Ahmar, G. Amato, J. V. Kadeisvili, J. Manuel, G. West, O. Zogorodnia // Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering. – 2013. – Vol. 13. – № 321. – URL: <http://www.santilli-foundation.org/docs/IRS-confirmations-212.pdf>.

15. *Laptuhov A.I.* K raschjotu struktury jelektromagnitnogo polja fotonov v ramkah teorii netochechnykh chastic // Nauch. sessija-konf. sekcii JaF OFN RAN «Fizika fundamental'nyh vzaimodejstvij» (23-27 nojabrja 2009 g., ITJeF im. A.I. Alihanova, Moskva) [Elektronnyj resurs]. – URL: [matras.itep.ru/npd2k09/1/ponbol/ofv/lap-itep.ppt](http://matras.itep.ru/npd2k09/1/ponbol/ofv/lap-itep.ppt) (data obrashhenija 30.08.2014).

16. *Landau L.D.* Kvantovaja mehanika (nerelativistskaja teorija) [Текст] / L.D. Landau, E.M. Lifshic; izd. 6-e, ispr. – М.: Fizmatlit, 2004. – 800 s.

17. *Dolomatov M.Yu.* 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. – Vol. 4. – № 3. – P. 152–156.

18. *Dolomatov M.Yu.* Specific quantum interaction in the molecules and nanoparticles of organic semiconductors [Text] / M.Yu. Dolomatov, N.Kh. Paymurzina, K.F. Latypov, G.R. Mukaeva // The 14th edition of Trends in Nanotechnology International Conference, 09-13.09.2013, Seville, Spain [Electronic resource]. – URL: <http://www.tntconf.org/2013/Abstracts/> (data obrashhenija 30.08.2014).

19. *Dolomatov M.Yu.* 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. – Vol. 3. – S. 183–199.

20. *Santilli R.M.* Foundations of Theoretical Mechanics: 2 vol. [Text] / R.M. Santilli. – New York: Springer-Verlag Heidelberg, 1978.

21. *Gejzenberg V.* Fizika i filosofija. Chast' i celoe [Текст] / V. Gejzenberg. – М.: Nauka, 1989. – 400 s.

22. *Borel' Je.* Verojatnost' i dostovernost' [Текст] / Je. Borel'. – М.: Nauka. 1969. – 110 s.

23. *Uspenskij V.A.* Teorema Gedelja o nepolnote. Populjarnye lekcii po matematike [Текст] / V.A. Uspenskij. – М.: Nauka, 1982. – 110 s.



**Ураксеев М.А.**  
**Urakseev M.A.**

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



**Закурдаева Т.А.**  
**Zakurdaeva T.A.**

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

УДК 621.383.8 + 535.8

## **СОВРЕМЕННЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ НАПРЯЖЕНИЯ И НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ**

В связи с возросшими требованиями к быстрдействию пожаро- и взрывобезопасности, надежности, массогабаритным показателям датчиков физических величин, используемых в системах управления, актуальными являются волоконно-оптические датчики. Среди них важное место занимают датчики электрического напряжения и напряженности электрического поля, основанные на электрооптическом эффекте Поггеля. В последнее время они находят широкое применение в электроэнергетике, металлургии, стекольной промышленности, приборостроении и других отраслях. Рассмотрены некоторые из разработанных волоконно-оптических датчиков электрического напряжения и напряженности электрического поля. В настоящее время разработкой волоконно-оптических датчиков электрического тока напряжения и напряженности магнитного и электрического поля занимается целый ряд компаний, среди которых следует отметить канадскую компанию NxtPhase T&D Corporation, шведскую фирму PowerSense, американские фирмы OptiSense Network, Inc., Airak, Inc., FieldMetrics, Inc. (FMI), шведско-швейцарскую компанию ABB.

В России разработкой и исследованием подобных датчиков и измерительных систем занимается ООО «Уникальные волоконные приборы». Аналогичные исследования проводятся в Уфимском государственном авиационном техническом университете, Уфимском государственном университете экономики и сервиса, Дальневосточном государственном университете путей сообщения, Саратовском государственном техническом университете и ряде других организаций России.

Впервые оптические измерительные трансформаторы напряжения были продемонстрированы зарубежными компаниями в 2006 г. в Москве на Международной выставке «Электроэнергетика-2006» и произвели настоящий фурор, т. к. обычно используемые магнитные трансформаторы тока и напряжения в высоковольтных сетях имеют массу до 1 тонны, а оптические трансформаторы на порядок и более меньшую массу.

*Ключевые слова:* линейный электрооптический эффект, ячейка Поггеля, датчики электрического напряжения и напряженности, электрооптика, двойное лучепреломление.

### **ADVANCED FIBER-OPTIC VOLTAGE SENSOR AND ELECTRIC FIELD AT THE ELECTRO-OPTICAL EFFECT**

Due to the increased performance requirements fire and explosion safety, reliability, overall dimensions

of physical quantity sensors used in control systems that are relevant are fiber optic sensors. Among them the important place occupied by the sensors of electric voltage and electric field strength based on the electrooptical effect parcels. They are widely used in electric power, metallurgy, glass industry, instrumentation and other industries. Considered some of the developed fiber-optic sensors electric voltage and electric field strength. At present the development of fiber-optic sensors, electrical current voltage, and magnetic and electric fields emanate from a variety of companies, including canadian company NxtPhase T&D Corporation, the Swedish firm PowerSense, the American firm OptiSense Network, Inc., Airak, Inc., FieldMetrics, Inc. (FMI), the Swedish-Swiss company ABB.

In Russia the investigation and development of such sensors and measuring systems the company LLC «Unique fiber devices». Similar studies conducted in the Ufa state aviation Technical University, Ufa state University of Economics and service, far Eastern state transport University, Saratov state technical University and other organizations in Russia.

First optical measuring voltage transformers were demonstrated by foreign companies in 2006 in Moscow at the international exhibition «Power industry – 2006» and made a splash, because the commonly used magnetic transformers of current and voltage in high-voltage networks have a weight up to 1 ton, and optical transformers less weight and more.

*Key words:* linear electro-optic effect, Pockels cell, voltage sensors and tension Electrooptics birefringence.

В связи с возросшими требованиями к быстродействию пожаро- и взрывобезопасности, надежности, массогабаритным показателям датчиков физических величин, используемых в системах управления, актуальными являются волоконно-оптические датчики. Среди них важное место занимают датчики электрического напряжения и напряженности электрического поля, основанные на электрооптическом эффекте Поккельса. В последнее время они находят широкое применение в электроэнергетике, металлургии, стекольной промышленности, приборостроении и других отраслях. Это во многом объясняется рядом присущих им достоинств [1–4]:

- Широкий динамический диапазон измерений (напряжения до сотен кВ).
- Высокая линейность.
- Широкий частотный диапазон, позволяющий анализировать гармоники напряжения и тока непосредственно в высоковольтной цепи.
- Отсутствие влияния нагрузки вторичных цепей и потерь в них.
- Высокая устойчивость оптоволоконных информационных каналов к внешним электромагнитным помехам.
- Небольшие массо-габаритные показатели.
- Первичный оптический преобразователь может быть удален от блока электроники на 450–900 м и более.

Ниже рассмотрены некоторые из разработанных волоконно-оптических датчиков электрического напряжения и напряженности электрического поля.

Действие их основано на линейном электрооптическом эффекте Поккельса. Эффект Поккельса

использует двойное лучепреломление в оптических средах электрооптических кристаллов при наложении постоянного или переменного электрического поля (рис. 1). При этом световая мощность, оцениваемая фотодиодом, включенным последовательно к оптической системе элемент Поккельса – анализатор, выражается как [2].

$$P = P_o (1 + \sin \pi U / U\pi), \quad (1)$$

где  $P_o$  – мощность света на входе элемента Поккельса;  $U$  – измеряемое напряжение, подаваемое на электроды элемента Поккельса;  $U\pi$  – полуволновое напряжение.

На рисунке 1 приведена функциональная схема оптического измерительного трансформатора напряжения [1]. Она включает в себя источник и приемник оптического излучения, усилитель, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), элемент Поккельса, содержащий два электрода, между которыми размещен электрооптический кристалл. Выходной сигнал трансформатора выдается в аналоговом и цифровом виде. Для отображения измеряемого напряжения цифровой сигнал может быть подан на жидкокристаллический индикатор.

Впервые такие трансформаторы были продемонстрированы зарубежными компаниями в 2006 г. в Москве на Международной выставке «Электроэнергетика-2006» и произвели настоящий фурор, т. к. используемые обычно магнитные трансформаторы тока и напряжения в высоковольтных сетях имеют массу до 1 тонны, а оптические трансформаторы на порядок и более меньшую массу.

В настоящее время разработкой волоконно-оптических датчиков электрического тока напряжения и напряженности магнитного и электриче-

ского поля занимается целый ряд компаний, среди которых следует отметить канадскую компанию NxtPhase T&D Corporation [5], шведскую фирму PowerSense [7], американские фирмы OptiSense Network [8], Inc., Airak, Inc., FieldMetrics, Inc. (FMI), шведско-швейцарскую компанию ABB [6].

В России разработкой и исследованием подобных датчиков и измерительных систем занимается ООО «Уникальные волоконные приборы» [5]. Аналогичные исследования проводятся в Уфимском го-

сударственном авиационном техническом университете, Уфимском государственном университете экономики и сервиса [9], Дальневосточном государственном университете путей сообщения [10], Саратовском государственном техническом университете и ряде других организаций России.

В таблице приведена сопоставительная оценка характеристик волоконно-оптических датчиков напряжения, разработанных известными зарубежными компаниями [5].

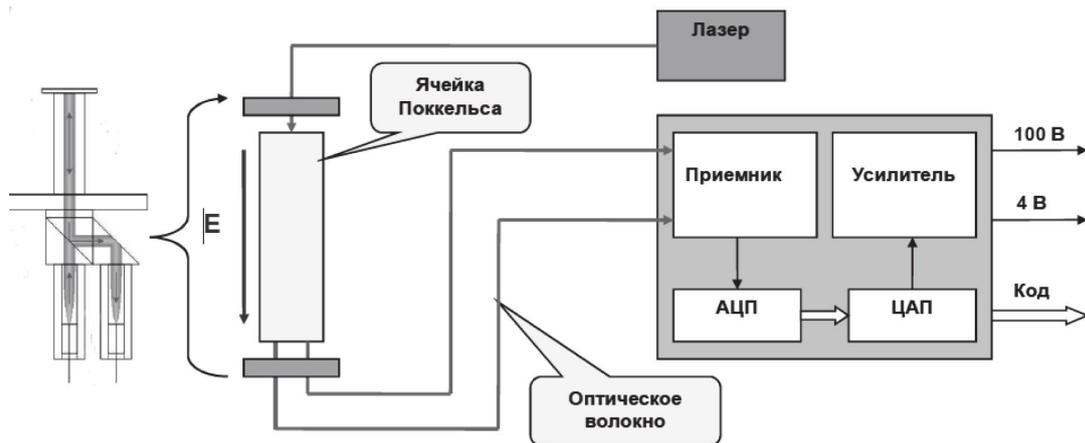


Рис. 1. Функциональная схема оптического измерительного трансформатора напряжения

### Сопоставительная оценка характеристик волоконно-оптических датчиков напряжения зарубежных компаний

Характеристика	NxtPhase	PowerSense	OptiSense	FieldMetrics	ABB
Номин. напряжения, кА	121-550	35	138	115-550	0.003-5
Класс точности, %	0,2/3	0,2	0.3	0,2	1(5)
Рабочая частота, Гц	10/3000	-	-	-	50/60
Частотная полоса, Гц	0,1-6000	-	5-5000	-	6-5000
Масса, кг	132-650	2,5	68	50-186	0,17
Диапазон рабочих температур, °С	-40...+50	-40...+50	-40...+70	-5...+40	0...+50

С более подробным изложением номенклатуры выпускаемых датчиков можно ознакомиться на сайтах зарубежных компаний [3, 5, 6, 7, 8].

Ниже приведены структурные схемы некоторых из разработок в области волоконно-оптических датчиков напряжения.

На рисунке 2 приведен электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха – Цендера [10]. Он содержит разделитель 1 светового потока на два пучка света, соединитель 2 разделенных пучков света, электрооптические элементы 3,

электроды 4 и отражающие элементы 5. На поверхность электрооптических элементов 3 нанесены электроды 4 в виде напыления металла. Электроды 4 подключены к источнику управляющего напряжения (не показано). Электрооптические элементы выполнены в виде упрощенных призм из монокристаллического материала, обладающего линейным электрооптическим эффектом, например, ниобата лития, титаната бария и др. Основание и две боковые грани каждой из призм расположены в параллельных плоскостях, при этом основания призм мо-

гут представлять собой, например, прямоугольную, или равнобедренную, или тупоугольную трапеции, или прямоугольник, или параллелограмм. Боковые грани призм содержат просветленные области для входа и выхода разделенных пучков света и снабже-

ны отражающими элементами 5. Отражающие элементы могут являться частью электрооптических элементов и представляют собой отполированные грани кристалла, от которых свет отражается в условиях эффекта полного внутреннего отражения.

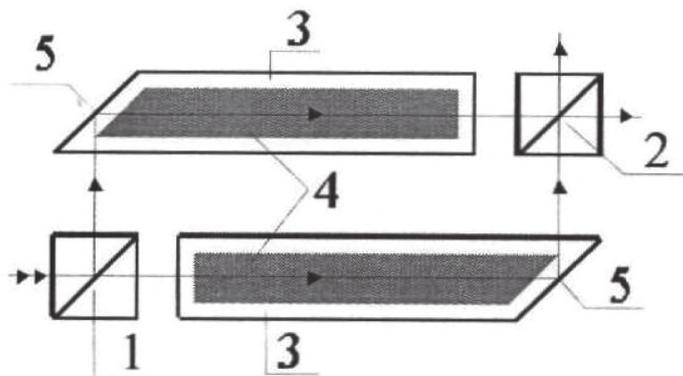


Рис. 2. Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха – Цендера

На рисунке 3 показан многопроходный электрооптический фазовый модулятор [9]. На схеме обозначены: 1 – входящий световой пучок; 2 – электрооптический кристалл; 3 – профилированные стороны, обеспечивающие многократное отражение световой волны в пределах электрооптического кристалла; 4 – выходной световой пучок; 5 – управ-

ляющие электроды, подключенные к разноименным полюсам источника напряжения; 6 – источник напряжения.

Устройство работает следующим образом. Световой пучок 1 вводится в электрооптический кристалл 2 и попадает на одну из отражающих профилированных сторон 3.

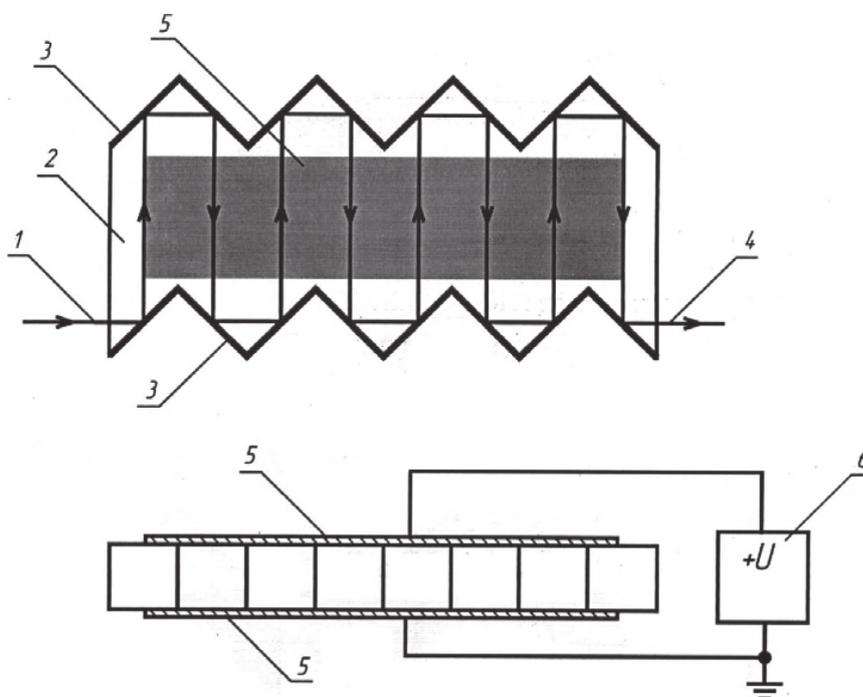


Рис. 3. Многопроходный электрооптический фазовый модулятор

Далее световой пучок отражается от нее и направляется на другую отражающую профилированную сторону, которая затем вновь перенаправляет пучок на первую отражающую сторону, частично смещая световой пучок к выходу устройства. Таким образом, система, состоящая из, по крайней мере, двух отражающих профилированных сторон, с возможностью введения светового пучка в кристалл так, что свет попадает на одну из профилированных сторон, имеющих отражающие треугольные вырезы, обеспечивает многократное прохождение светового пучка в пределах электрооптического кристалла между входом и выходом устройства.

Световой пучок, прошедший электрооптический кристалл 2, приобретает фазовый сдвиг, пропорциональный величине модулирующего напряжения, приложенного к электродам 5, и длине пробега светового луча. Связь между величиной управляющего напряжения и глубиной фазовой модуляции будет определяться геометрией электродов и профилированных сторон, размером, материалом и ориентацией электрооптического кристалла, поляризацией модулируемой световой волны.

На рисунке 4 изображена схема электрооптического модулятора.

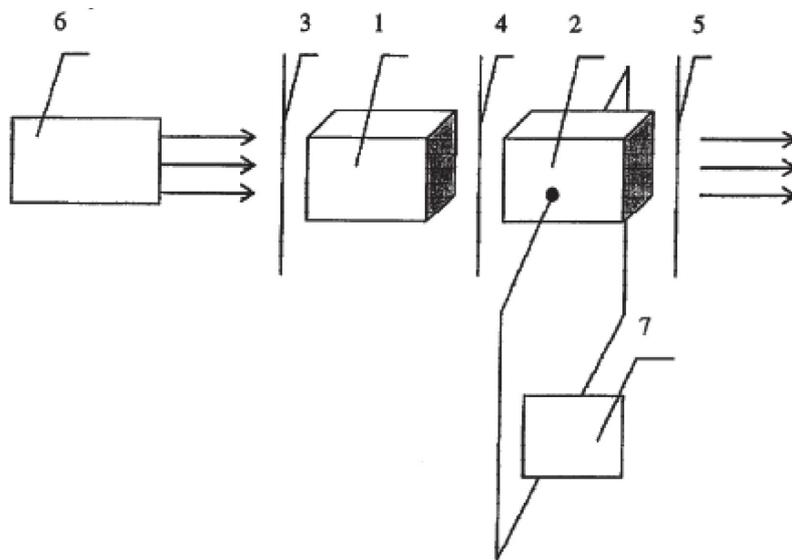


Рис. 4. Электрооптический модулятор

Электрооптический модулятор содержит два идентичных анизотропных электрооптических кристалла 1, 2, поляризатор 3, два анализатора 4, 5, источник некогерентного излучения 6 и генератор управляющего электрического поля 7. Источник некогерентного излучения 6, поляризатор 3, кристалл 1, анализатор 4, кристалл 2, анализатор 5 соединены последовательно оптической связью. Оптические оси кристаллов 1, 2 параллельны друг другу и перпендикулярны направлению распространения излучения, а оси пропускания поляризатора 3 и анализаторов 4, 5 параллельны друг другу и расположены под углом 45 градусов к оптическим осям кристаллов 1, 2. Генератор управляющего электрического поля 7 электрически связан с кристаллом 2, причем напряженность управляющего поля перпендикулярна направлению излучения.

В качестве анизотропных электрооптических кристаллов выбраны кристаллы  $\text{LiNbO}_3$  с длиной  $l=1$  см в направлении распространения света и тол-

щиной  $d=1$  мм вдоль направления управляющего электрического поля.

Электрооптический модулятор работает следующим образом. Излучение от источника 6 некогерентное и содержит лучи всех длин волн в широком спектральном диапазоне (порядка 600 ангстрем). Параллельный пучок некогерентного излучения после прохождения поляризатора 3 распространяется в кристалле 1, в котором каждый луч соответствующей длины волны разбивается на два луча с ортогональными поляризациями, один из которых является обыкновенным, другой – необыкновенным. Благодаря тому, что угол между осью пропускания поляризатора 3 и оптической осью кристалла 1 составляет 45 градусов, амплитуды обыкновенного и необыкновенного лучей на любой длине волны равны между собой. За счет разницы показателей преломления между обыкновенным и необыкновенным лучами на выходе кристалла 1 возникает разность фаз  $\Delta\varphi_0 l$ , определенная для каждой длины волны.

В анализаторе 4 происходит сложение проекций напряженностей обыкновенного и необыкновенного лучей на ось пропускания анализатора 4 и из анализатора 4 выходит результирующий луч. Из-за неодинаковой разности фаз для результирующих лучей разных длин волн интенсивность излучения различна и принимает конкретное значение в диапазоне от максимального значения до нуля. Для излучения с разностью фаз, равной  $\pi$ , интенсивность излучения на выходе анализатора 4 равна нулю, а интенсивность излучения для остальных длин волн принимает промежуточные значения между максимальным значением и нулем.

#### Список литературы

1. *Измерительные* оптические трансформаторы тока и напряжения [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ruscable.ru/doc/analytic/KPD-5/proline.pdf>.
2. *Окоси Т.* Волоконно-оптические датчики [Текст] / Окоси Т. и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
3. URL: <http://www.fieldmetricsinc.com>.
4. *Ураксеев М.А.* Волоконно-оптические датчики для автоматизированных технологических процессов и производств [Текст] / М.А. Ураксеев, Н.А. Авдонина // Приборы и системы. Управление контроль, диагностика. – 2009. – № 4. – С. 29–34.
5. URL: <http://www.nxtphase.com>.
6. URL: <http://www.abb.com>.
7. URL: <http://www.airak.com>.
8. URL: <http://www.sensethepower.com>.
9. *Патент* РФ на изобретение № 2420771 МПК7 G02F1/00. Многопроходный электрооптический фазовый модулятор [Текст] / С.А. Матюнин, Г.И. Леонович, Ю.А. Федотов, В.Д. Паранин; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (RU). – № 2009112130/28. – Заявл. 01.04.2009. – Оpubл. 10.06.2011. – Бюл. № 16.
10. *Патент* РФ на изобретение № 2267802 МПК7 G02F1/00. Электрооптический модулятор [Текст] / В.И. Строганов, Е.В. Толстов, В.В. Криштоп, И.В. Рапопорт, М.Н. Литвинова, А.В. Суй; патентообладатель ГОУ ВПО Дальневосточный государственный университет путей сообщения МПС России (ДВГУПС) (RU). – № 2004116031/28. – Заявл. 25.05.2004. – Оpubл. 10.01.2006. – Бюл. № 1.
11. *Патент* РФ на изобретение № 2405179

МПК7 G02F1/00. Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха – Цендера [Текст] / Д.Р. Древкин, Ю.А. Зюрюкин; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет» (СГТУ) (RU). – № 2009137927/28. – Заявл. 13.10.2009. – Оpubл. 27.11.2010. – Бюл. № 33.

#### References

1. *Izmeritel'nye* opticheskie transformatory toka i naprjazhenija [Elektronnyj resurs]. – URL: <http://www.ruscable.ru/doc/analytic/KPD-5/proline.pdf>.
2. *Okosi T.* Volokonno-opticheskie datchiki [Tekst] / Okosi T. i dr. – L.: Jenergoatomizdat, 1990. – 256 s.
3. URL: <http://www.fieldmetricsinc.com>.
4. *Urakseev M.A.* Volokonno- opticheskie datchiki dlja avtomatizirovannyh tehnologicheskikh processov i proizvodstv [Tekst] / M.A. Urakseev, N.A. Avdonina // Pribory i sistemy. Upravlenie kontrol', diagnostika. – 2009. – № 4. – S. 29–34.
5. URL: <http://www.nxtphase.com>.
6. URL: <http://www.abb.com>.
7. URL: <http://www.airak.com>.
8. URL: <http://www.sensethepower.com>.
9. *Patent RF* na izobretenie № 2420771 МПК7 G02F1/00. Mnogoprohodnyj jelektroopticheskij fazovyy moduljator [Tekst] / S.A. Matjunin, G.I. Leonovich, Ju.A. Fedotov, V.D. Paranin; patentoobladatel' Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Samarskij gosudarstvennyj ajerokosmicheskij universitet imeni akademika S.P. Koroleva» (RU). – №2009112130/28. – Zajavl. 01.04.2009. – Opubl. 10.06.2011. – Bjul. № 16.
10. *Patent RF* na izobretenie №2267802 МПК7 G02F1/00. Jelektroopticheskij moduljator [Tekst] / V.I. Stroganov, E.V. Tolstov, V.V. Krishtop, I.V. Rapoport, M.N. Litvinova, A.V. Sjuj; patentoobladatel' GOU VPO Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija MPS Rossii (DVGUPS) (RU). – № 2004116031/28. – Zajavl. 25.05.2004. – Opubl. 10.01.2006. – Bjul. № 1.
11. *Patent RF* na izobretenie № 2405179 МПК7 G02F1/00. Jelektroopticheskij moduljator po sheme interferometra Maha – Cendera [Tekst] / D.R. Drevko, Ju.A. Zjurjukin; patentoobladatel' Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Saratovskij gosudarstvennyj tehniceskij universitet» (SGTU) (RU). – № 2009137927/28. – Zajavl. 13.10.2009. – Opubl. 27.11.2010. – Bjul. № 33.



**Федосов А.В.**  
**Fedosov A.V.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Промыш-  
ленная безопасность и охрана  
труда» ФГБОУ ВПО «Уфимский  
государственный нефтяной тех-  
нический университет»,  
Россия, г. Уфа



**Серегородцева С.Ю.**  
**Seregorodceva S.Yu.**

магистрант кафедры «Промыш-  
ленная безопасность и охрана  
труда» ФГБОУ ВПО «Уфимский  
государственный нефтяной тех-  
нический университет»,  
Россия, г. Уфа



**Францов Р.А.**  
**Francov R.A.**

магистрант кафедры «Промыш-  
ленная безопасность и охрана  
труда» ФГБОУ ВПО «Уфимский  
государственный нефтяной тех-  
нический университет»,  
Россия, г. Уфа

УДК 66.013.8

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ТРУДА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ ТРУДА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

Поднята проблема применения большого количества оборудования при проведении оценки рабочих мест по условиям труда. Предложено устройство, определяющее фактические уровни факторов условий труда, которое расширяет спектр охватываемых факторов условий труда: температура, шум, освещенность, напряженность электрического поля на рабочих местах промышленных предприятий. Изобретение относится к области контроля параметров условий труда, в частности, к контролю и управлению фактическими уровнями факторов условий труда.

В силу статьи 212 Трудового кодекса Российской Федерации, а также части 2 статьи 4 и части 1 статьи 8 Федерального закона Российской Федерации № 426 «О специальной оценке условий труда» обязанности по организации и финансированию специальной оценки условий труда возлагаются на каждого работодателя. Вследствие чего все предприятия, учреждения и организации должны проводить мероприятия по специальной оценке условий труда.

Для расширения спектра охватываемых факторов условий труда в данной работе рассматривается устройство, определяющее фактические уровни сразу нескольких вредных производственных факторов. Изобретение относится к области контроля параметров условий труда, в частности к контролю и управлению фактическими уровнями факторов условий труда, таких как температура, шум, освещенность и напряженность электрического поля на рабочих местах промышленных предприятий. Также данным устройством предусмотрена экономия потребления электрической энергии за счет активации блоков датчиков и преобразователей сигналов только в режиме передачи, все остальное время элементы находятся в режиме ожидания с минимальным потреблением энергии.

Таким образом, устройство контроля параметров условий труда обеспечивает расширение возможностей измерений при проведении специальной оценки условий труда, уменьшает финансовые затраты на приобретение дополнительных устройств и экономит время проведения измерений вредных производственных факторов.

**Ключевые слова:** охрана труда, условия труда, оценка рабочих мест, опасные производственные факторы, вредные производственные факторы, температура, шум, освещенность, напряженность электрического поля, устройство контроля параметров рабочей среды.

## THE DEVICE FOR RESEARCH OF WORKING CONDITIONS WHEN CARRYING OUT THE SPECIAL ASSESSMENT OF WORKING CONDITIONS AT THE ENTERPRISES

Raised the issue of the use of a large amount of equipment in the assessment of workplaces on working conditions. Provided a device that determines the actual levels of factors of working conditions, which extends the range covered by the factors of working conditions: temperature, noise, light, electric field intensity in the workplace industrial enterprises. The invention relates to the control parameters of working conditions, in particular to the control and management of actual levels of factors of working conditions.

By virtue of Article 212 of the Labor Code of the Russian Federation, as well as part 2 of Article 4 and paragraph 1 of Article 8 of the Federal Law of the Russian Federation № 426 "On the special assessment of working conditions" responsibilities for the organization and financing of a special assessment of working conditions imposed on each employer. In consequence of that all enterprises, institutions and organizations to carry out activities for the special assessment of working conditions.

To widen the spectrum covered by the factors of working conditions in this paper the device to determine the actual levels of several harmful factors. The invention relates to the control parameters of working conditions, in particular to the control and management of actual levels of factors of working conditions, such as temperature, noise, lighting, and electric field strength in the workplace industrial enterprises. Also, this unit provides savings of electrical energy consumption due to activation of sensor units and converters only in transmission mode, all the rest of the elements are in standby mode with minimum power consumption.

Thus, the device parameters control the working conditions provides empowerment measurements during a special assessment of working conditions, reduces the financial costs of acquiring additional devices and saves the time of measurement of harmful factors.

*Key words:* labor protection, working conditions, assessment of workplaces, dangerous production factors, harmful production factors, temperature, noise, lighting, intensity of electric field, device of control of parameters of the working environment.

В настоящее время крупные компании осознают свою ответственность перед обществом и будущими поколениями за сохранение благоприятной экологической среды, а также сохранение жизни и здоровья работников, обеспечение их безопасности. Вопросы охраны труда и промышленной безопасности на предприятиях рассматриваются как основополагающие компоненты работы [1].

В силу статьи 212 Трудового кодекса Российской Федерации, а также части 2 статьи 4 и части 1 статьи 8 Федерального закона Российской Федерации № 426 «О специальной оценке условий труда» обязанности по организации и финансированию специальной оценки условий труда возлагаются на каждого работодателя. Вследствие чего все предприятия, учреждения и организации должны проводить мероприятия по специальной оценке условий труда [2].

При проведении специальной оценки условий труда проверке подлежат все имеющиеся на рабочем месте опасные и вредные производственные факторы. Измерения параметров опасных и вредных производственных факторов, определение показателей тяжести и напряженности трудового процесса осуществляется аккредитованными орга-

низациями [3].

Процедура специальной оценки условий труда включает инструментальное измерение уровня опасных и вредных производственных факторов на рабочих местах. Подвергаются измерению такие опасные и вредные факторы труда, как запыленность, загазованность воздуха рабочей зоны, температура поверхностей оборудования, материалов, температура воздуха рабочей зоны, уровень шума на рабочем месте, уровень вибрации, уровень инфразвуковых колебаний, уровень ультразвука, барометрическое давление в рабочей зоне, влажность воздуха, подвижность воздуха, ионизация воздуха, ионизирующих излучений в рабочей зоне, напряжения в электрической цепи, уровень статического электричества, уровень электромагнитных излучений, напряженность электрического поля, напряженность магнитного поля, освещенность рабочей зоны, пульсация светового потока, уровень ультрафиолетовой радиации, уровень инфракрасной радиации [2].

Для определения конкретного параметра опасного или вредного производственного фактора необходимо свое средство измерения, что увеличивает затраты финансовых средств и времени на

произведение данных процедур.

Для расширения спектра охватываемых факторов условий труда в данной работе рассматривается устройство, определяющее фактические уровни сразу нескольких вредных производственных факторов. Изобретение [4] относится к области контроля параметров условий труда, в частности,

к контролю и управлению фактическими уровнями факторов условий труда, таких как температура, шум, освещенность и напряженность электрического поля на рабочих местах промышленных предприятий. Структурная схема устройства контроля параметров условий труда представлена на рисунке 1.

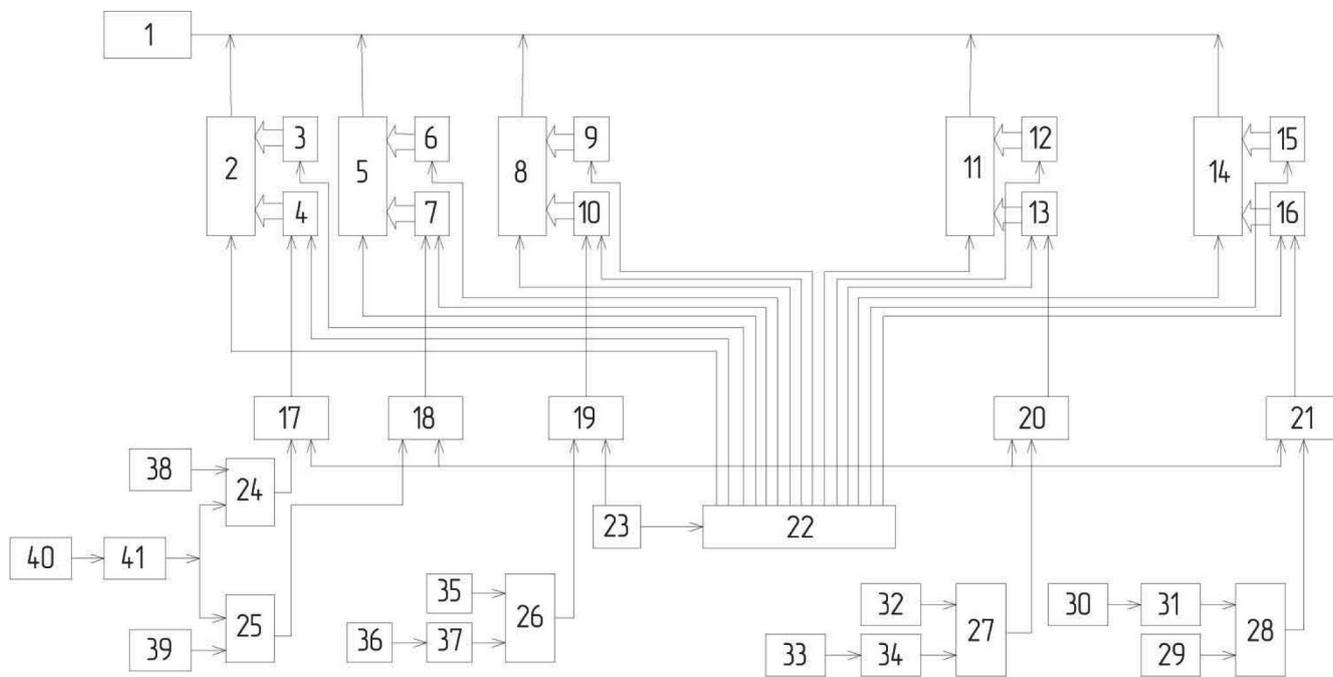


Рис. 1. Структурная схема устройства контроля параметров условий труда

Данное техническое решение расширяет функциональные возможности контроля фактического уровня параметров условий труда при проведении специальной оценки условий труда.

Это достигается тем, что устройство контроля параметров условий труда содержит следующие измерительные блоки. Блок контроля 1, к входу которого присоединены выходы сдвиговых регистров 2, 5, 8, 11, 14. К сдвиговым регистрам подсоединены элементы: к входу сдвигового регистра 2 выход счетчика максимальных значений температуры 4 и выход постоянно запоминающего устройства 3, к входу сдвигового регистра 5 выход счетчика минимальных значений температуры 7 и выход постоянно запоминающего устройства 6, к входу сдвигового регистра 8 выход счетчика максимальных значений напряженности электрического поля 10 и выход постоянно запоминающего устройства 9, к входу сдвигового регистра 11 выход счетчика значений шума 13 и выход постоянно запоминающего устройства 12, к сдвиговому регистру 14 счетчик значений освещенности 16 и постоянно запоминающее устройство 15.

К входам счетчиков значений факторов производственной среды присоединены выходы следующих элементов: к входу счетчика максимальных значений температуры 4 присоединен выход логического элемента максимальных значений температур 17, к счетчику минимальных значений температур 7 логический элемент минимальных значений температур 18, к входу счетчика максимальных значений напряженности электрического поля 10 выход логического элемента максимальных значений напряженности электрического поля 19, к входу счетчика значений шума 13 выход логического элемента значений шума 20, к входу счетчика значений освещенности 16 выход логического элемента значений освещенности 21, которые обеспечивают выталкивание сигнала на счетчик.

Входы счетчика максимальных значений температуры 4, счетчика минимальных значений температуры 7, счетчика максимальных значений напряженности электрического поля 10, счетчика значений шума 13, счетчика значений освещенности 16 соединены проводными линиями с выходом блока управления 22, к входу которого присоеди-

нен генератор сигналов 23.

Логические элементы, входящие в структуру системы 17, 18, 19, 20, 21, объединены между собой, а также к ним присоединены следующие элементы: компаратор 24 имеет выход на вход логического элемента максимальных значений температур 17, компаратор 25 имеет выход на вход логического элемента минимальных значений температур 18, компаратор 26 имеет выход на вход логического элемента максимальных значений напряженности электрического поля 19, компаратор 27 имеет выход на вход логического элемента значений шума 20, компаратор 28 имеет выход на вход логического элемента значений освещенности 21 и на входы логических элементов есть выход генератора 23.

В то же время к входам компараторов присоединены: к входу компаратора 24 выход датчика максимальных значений температуры 38, к входу компаратора 25 выход датчика минимальных значений температуры 39, а также к обоим входам компараторов 24, 25 преобразователь сигнала 41.

Вход компаратора 26 соединен с выходом датчика максимальных значений напряженности электрического поля 35, а также к входу компаратора 26 присоединен преобразователь сигнала 37.

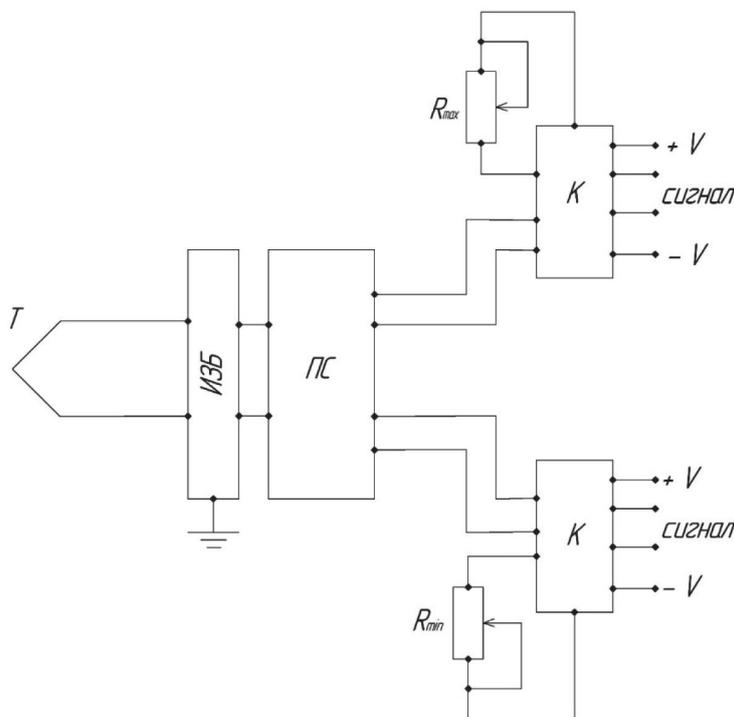
Вход компаратора 27 соединен с выходом датчика предельно допустимого уровня шума 32 и

с входом преобразователя сигнала 34. На вход компаратора 28 есть выходы датчика предельно допустимых уровней освещенности 29 и преобразователя сигнала 31.

Значения фактических уровней факторов производственной среды фиксируются датчиками температуры 40, напряженности электрического поля 36, шума 33, освещенности 30. Сигнал с датчиков передается на преобразователи сигналов. Это обеспечивается соединением выхода датчика температуры 40 с входом преобразователя сигнала 41, выхода датчика напряженности электрического поля 36 с входом преобразователя сигнала 37, выхода датчика шума 33 с входом преобразователя сигнала 34, выхода датчика освещенности 30 с входом преобразователя сигнала 31 [4].

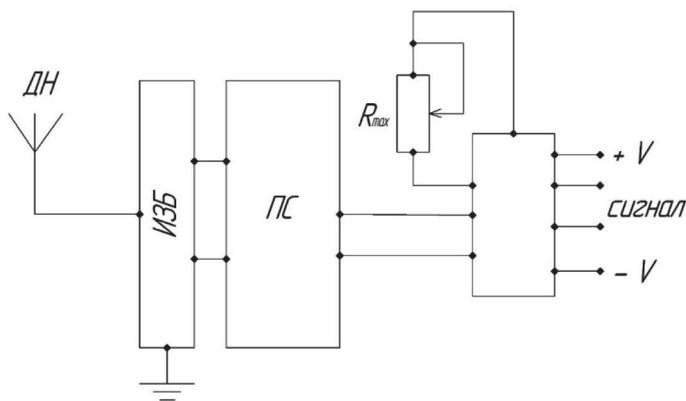
Устройство контроля параметров условий труда работает следующим образом: после подачи питания генератор 23 начинает генерировать электрические сигналы, датчик температуры 40, датчики напряженности электрического поля 36, шума 33, освещенности 30 начинают измерять фактический уровень факторов условий труда.

Принципиальные схемы датчиков температуры, напряженности электрического поля, шума и освещенности представлены на рисунках 2–5.



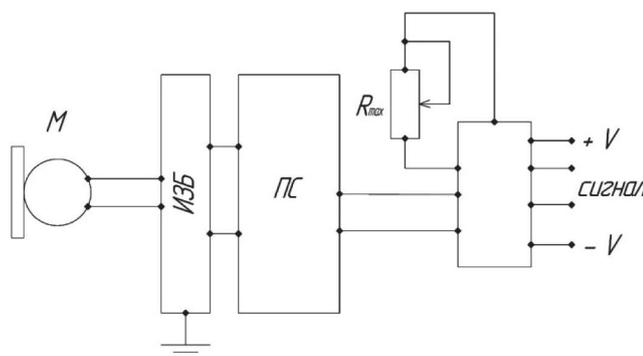
T – термопара; ИЗБ – искрозащищенный барьер; ПС – преобразователь сигнала; Rmax – регулятор максимального значения температуры; Rmin – регулятор минимального значения температуры; К – компаратор.

Рис. 2. Принципиальная схема датчика температуры



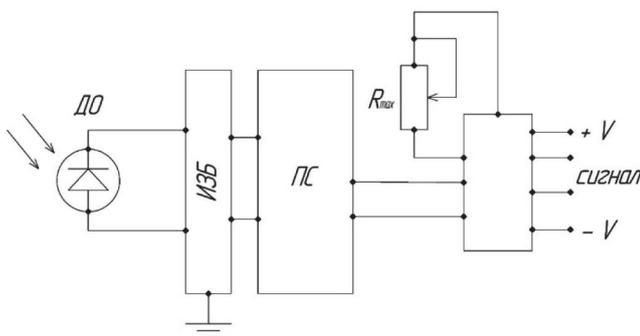
ДН – датчик напряженности электрического поля; ИЗБ – искрозащищенный барьер; ПС – преобразователь сигнала; К – компаратор; Rmax – регулятор максимального значения напряженности электрического поля.

Рис. 3. Принципиальная схема датчика напряженности электрического поля



М – микрофон; ИЗБ – искрозащищенный барьер; ПС – преобразователь сигнала; К – компаратор; Rmax – регулятор максимального значения шума.

Рис. 4. Принципиальная схема датчика шума



ДО – датчик освещенности; ИЗБ – искрозащищенный барьер; ПС – преобразователь сигнала; К – компаратор; Rmax – регулятор максимального значения освещенности.

Рис. 5. Принципиальная схема датчика освещенности

От датчиков вредных производственных факторов измерительная информация поступает на преобразователи сигналов 41, 37, 34, 31. Через определенный интервал времени на выходе преобразователей сигналов с входов датчиков появится цифровой код, соответствующий величине сигнала, считанного с датчиков. В этот момент компараторы 24, 25, 26, 27, 28 сравнивают сигналы, полученные с первичных преобразователей сигнала, и информацию с задатчиков критических значений измеряемых факторов: максимального значения температуры 38, минимального значения температуры 39, максимального значения напряженности электрического поля 35, максимального значения уровней шума 32, минимального значения уровней освещенности 29. В зависимости от результатов сравнения фактического уровня температуры, напряженности электрического поля, шума, освещенности с их критическими значениями, считанными с задатчиков, сигнал передается на логические элементы 17, 18, 19, 20, 21, если фактический уровень фактора находится за пределами экстремальных значений, и не передается, если они находятся в норме. Блок управления 22 после сигнала от генератора 23 обеспечивает последовательность импульсов для управления сдвиговыми регистрами 2, 5, 8, 11, 14, счетчиками 4, 7, 10, 13, 16, постоянно запоминающими устройствами 3, 6, 9, 12, 15. Сигналы, поступающие с логических элементов, считываются счетчиками 4, 7, 10, 13, 16. Полученная информация сохраняется постоянно запоминающими устройствами 3, 6, 9, 12, 15. Данные, сохраненные в постоянно запоминающих устройствах, обрабатываются (масштабирование, фильтрация и др. необходимые преобразования), а затем записываются в сдвиговые регистры 2, 5, 8, 11, 14, которые кодируют данные и передают их по линиям связи в блок контроля 1. После окончания передачи данных сдвиговые регистры переходят в режим ожидания.

Данным устройством предусмотрена экономия потребления электрической энергии за счет активации блоков датчиков и преобразователей сигналов только в режиме передачи, все остальное время элементы находятся в режиме ожидания с минимальным потреблением энергии. Также цифровая передача информационных сигналов обеспечивает исключение погрешностей, вносимых информационными линиями [5].

Таким образом, устройство контроля параметров условий труда обеспечивает расширение возможностей измерений при проведении специальной оценки условий труда, уменьшает финансовые затраты на приобретение дополнительных устройств и экономит время проведения измере-

ний вредных производственных факторов.

#### Список литературы:

1. Бобкова О.В. Охрана труда и техника безопасности. Обеспечение прав работника [Текст] / О.В. Бобкова. – М.: Омега-Л. – 2008. – 290 с.
2. Федеральный закон № 426 от 28.12.2013 «О специальной оценке условий труда» (ред. от 23.06.2014).
3. Федеральный закон № 197 от 30.12.2001 «Трудовой кодекс Российской Федерации» (ред. от 29.12.2010).
4. Пат. 2477876 Рос. Федерация МПК G05D27/02 Устройство контроля параметров условий труда [Текст] / Грязев Михаил Васильевич, Чеботарев Александр Леонидович, Панарин Владимир Михайлович, Дорохина Антонина Евгеньевна, Павпертова Ольга Николаевна, Павпертов Геннадий Владимирович, Телегина Наталья Александровна; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Тулский государственный университет». – № 2012115044/08. – заявл. 16.04.2012. – опубл. 20.03.2013. – 2 с.: ил.
5. Павпертова О.Н. Структура информационно-измерительной системы для контроля факторов производственной среды [Текст] / О.Н. Павпертова // Архив публикаций конференций «Систем безопасности». – 2013. – С. 124–125.

#### References

1. Bobkova O.V. Ohrana truda i tehnika bezopasnosti. Obespechenie prav rabotnika [Tekst] / O.V. Bobkova. – M.: Omega-L. – 2008. – 290 s.
2. Federal'nyj zakon № 426 ot 28.12.2013 «O special'noj ocenke uslovij truda» (red. ot 23.06.2014).
3. Federal'nyj zakon № 197 ot 30.12.2001 «Trudovoj kodeks Rossijskoj Federacii» (red. ot 29.12.2010).
4. Pat. 2477876 Ros. Federacija MPK G05D27/02 Ustrojstvo kontrolja parametrov uslovij truda [Tekst]/ Grjazev Mihail Vasil'evich, Chebotarev Aleksandr Leonidovich, Panarin Vladimir Mihajlovich, Dorohina Antonina Evgen'evna, Pavpertova Ol'ga Nikolaevna, Pavpertov Gennadij Vladimirovich, Telegina Natal'ja Aleksandrovna; zajavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO «Tul'skij gosudarstvennyj universitet». – № 2012115044/08. – zajavl. 16.04.2012. – opubl. 20.03.2013. – 2 s.: il.
5. Pavpertova O.N. Struktura informacionno-izmeritel'noj sistemy dlja kontrolja faktorov proizvodstvennoj sredy [Tekst] / O.N. Pavpertova // Arhiv publikacij konferencij «Sistem bezopasnosti». – 2013. – S. 124–125.



*Мухамадиев А.А.*

*Mukhamadiev A.A.*

*кандидат технических наук, доцент,  
докторант кафедры «Информационно-  
измерительная техника»  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный  
авиационный технический университет»,  
Россия, г. Уфа*

УДК 621.38:669

## **КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО И ТЕХНОСФЕРНОГО МОНИТОРИНГА**

В данной работе рассматривается необходимость обеспечения контроля и измерения температуры с заданными метрологическими характеристиками. Обосновывается необходимость применения дистанционных средств измерения температуры. Рассмотрены методы дистанционного измерения температур тел: яркостный, цветовой, радиационный.

Проводится анализ энергетического оптического преобразователя температуры и оптического преобразователя температуры спектрального отношения. Показано, что недостатками энергетического оптического преобразователя температуры являются: необходимость априорной информации об оптических свойствах поверхности объектов; зависимость точности измерения от геометрии расположения объекта и его формы, состояния окружающей среды и воздействия других объектов. Указано, что подобных недостатков лишен оптический преобразователь спектрального отношения, однако, в силу конструктивных особенностей его показания оказываются завышенными более чем на 10%.

Выявлено, что невысокая точность и низкая функциональность измерения обусловлено тем, что коэффициент излучения объектов либо неизвестен, либо изменяется по неизвестному закону в сверхмалый промежуток времени, либо невозможно сканирование спектра излучения с целью выбора окон прозрачности атмосферы. Приведены данные об ошибках измерения при 1% ошибке установки коэффициента излучения.

Рассмотрены пути решения данной проблемы. Разработана классификация оптических преобразователей температуры с целью выявления методов и средств, обеспечивающих комплексное улучшение характеристик. Предложено создание оптических преобразователей температур на основе акустооптического эффекта.

*Ключевые слова:* температура; измерение; оптический преобразователь температуры; акустооптический преобразователь.

## **CLASSIFICATION OF OPTICAL TRANSDUCERS FOR TEMPERATURE SYSTEMS FOR ENVIRONMENTAL MONITORING AND TECHNOSPHERIC**

In this paper we consider the need for monitoring and measuring the temperature with the set metrological characteristics. The necessity of application of remote temperature measurement instruments. The methods of remote temperature measurement tel: luminance, color, radiation.

The analysis of the energy of the optical transducer temperature and the temperature of the optical transmitter spectral ratio. Acknowledged that the lack of power of the optical transmitter temperature are: the need for a priori information about the optical properties of the object surface; dependence of the accuracy of measurement geometry of the object and its shape, the environment and the impact of other objects. Indicated that these deficiencies deprived optical converter spectral ratio, however, due to the design features of its readings are too high by more than 10%.

Revealed that the low accuracy and low functionality of measurement due to the fact that the emissivity is either unknown or changes to the law in midget unknown period of time, or it is impossible to scan the emission spectrum in order to select the windows of atmospheric transparency. The data on the measurement error of 1%

error installing emissivity. The ways to solve this problem. The classification of optical converters temperature in order to identify the methods and means of ensuring a comprehensive improvement in performance. Suggested the creation of optical converters temperatures based on acousto-optic effect.

*Key words:* temperature; measurement; optical transducer temperature; acousto-optical transducer.

Температура является одной из наиболее распространенных физических величин, требующих измерения и контроля во многих отраслях промышленности и научной деятельности. Постоянное развитие уровня автоматизации и все большее использование высокотемпературных технологических процессов, а также поддержание их качества, приводит к необходимости создания устройств – оптических преобразователей температуры (ОПТ), обеспечивающих контроль и измерение температуры с заданными метрологическими характеристиками. В ряде технологических процессов (высокие температуры, перемещение объекта и т. д.) возникает необходимость применения дистанционных средств измерения температуры.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили три метода дистанционного измерения температур тел: яркостный, использующий для измерения температур тел, изменение с температурой яркости тела в данной длине волны; цветовой, основанный на изменении с температурой распределения энергии внутри данного участка спектра излучения тела; радиационный, использующий зависимость от температуры общего количества энергии, излучаемого телом в широком спектральном интервале. По принципу действия, который определяется параметром теплового излучения, используемым для измерения температуры излучающего тела, ОПТ разделяются на два класса: энергетические и спектрального отношения. Энергетические ОПТ могут быть разделены на следующие три группы: ОПТ полного излучения, ОПТ частичного излучения, монохроматические ОПТ [1].

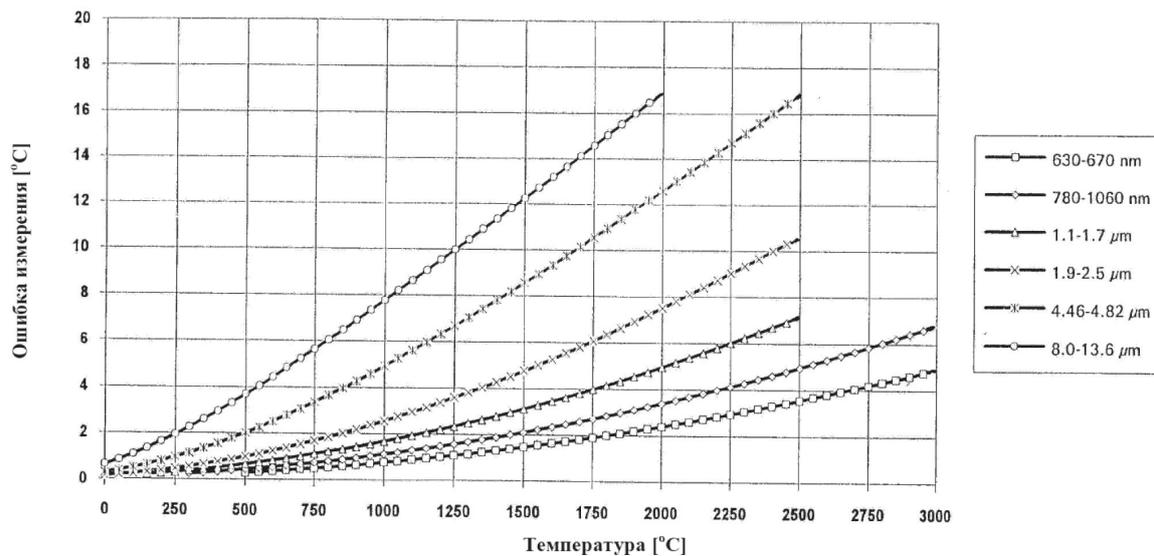
Однако, следует отметить, что результат измерений будет зависеть не только от температуры, но и от оптических свойств и состояния поверхности исследуемого объекта. Для того чтобы измерить температуру объекта, необходимо иметь априорную информацию об оптических свойствах поверхности объектов, а учитывая, что это не всегда возможно (например, изменение фазового состояния при плавлении металлов и их сплавов), следовательно, невозможно узнать истинную температуру с необходимой точностью. Таким образом, не всегда возможно использование энергетических ОПТ. Также у них имеются недостатки, при которых точность измерения зависит: от расстояния до измеряемого объекта, формы объекта, запыленности

и загазованности промежуточной среды, наличия защитных стекол и непрозрачных объектов в поле зрения пирометра, боковых засветок при работе с крупноразмерными объектами, переотражений измеряемым объектом излучения сильно нагретых объектов, расположенных рядом.

Данных недостатков в определенной степени лишены ОПТ спектрального отношения, которые определяют температуру объекта по отношению сигналов от двух приемников, работающих на разных длинах волн. Таким образом, расстояние, форма измеряемого объекта, запыленность, загазованность одинаково влияют на сигналы с обоих приемников, оставляя неизменным их отношение, а отличие значения  $\epsilon$  измеряемого объекта от 1 чаще всего приводит к одинаковому уменьшению сигналов с обоих приемников, поэтому отношение сигналов слабо зависит от  $\epsilon$ , и корректный результат измерения получается без знания  $\epsilon$  объекта.

Однако у данного типа ОПТ имеется и существенный недостаток. Результат их измерения зависит от спектральной зависимости  $\epsilon = f(\lambda)$ , при которой с ростом длины волны спектральная излучательная способность  $\epsilon\lambda$  снижается. В связи с чем сигнал длинноволнового приемника оказывается заниженным по сравнению с коротковолновым. По этой причине показания ОПТ спектрального отношения оказываются завышенными нередко более чем на 10% [2].

Таким образом, невысокая точность и низкая функциональность измерения обусловлена тем, что коэффициент излучения объектов либо неизвестен, либо изменяется по неизвестному закону в сверхмалый промежуток времени, либо невозможно сканирование спектра излучения с целью выбора окон прозрачности атмосферы. Имеющиеся на сегодняшний день способы и средства измерения, основанные на них, не позволяют измерять температуру с высокой точностью и чувствительностью в широком диапазоне измерения. Исходя из вышеизложенного следует, что важной научно-технической проблемой является создание нового класса ОПТ, обладающих характеристиками, позволяющими выполнить сформированные выше требования. Для более наглядного понимания существующей проблемы в плане обеспечения заданной точности вследствие неправильной установки коэффициента излучения, представим рисунок.



Ошибка измерения при 1% ошибке установки коэффициента излучения

Таким образом, необходимы новые направления с целью решения данной проблемы. Одним из концептуальных решений повышения точности является увеличение отношения количества длин волн, т. е. количества измеряемых спектров. В частности, в работе [3] рассматривается конструкция трехспектрального пирометра. Однако несмотря на кажущееся решение проблемы возникает ряд других проблем: усложнение конструкции, усложнение калибровки и т. д.

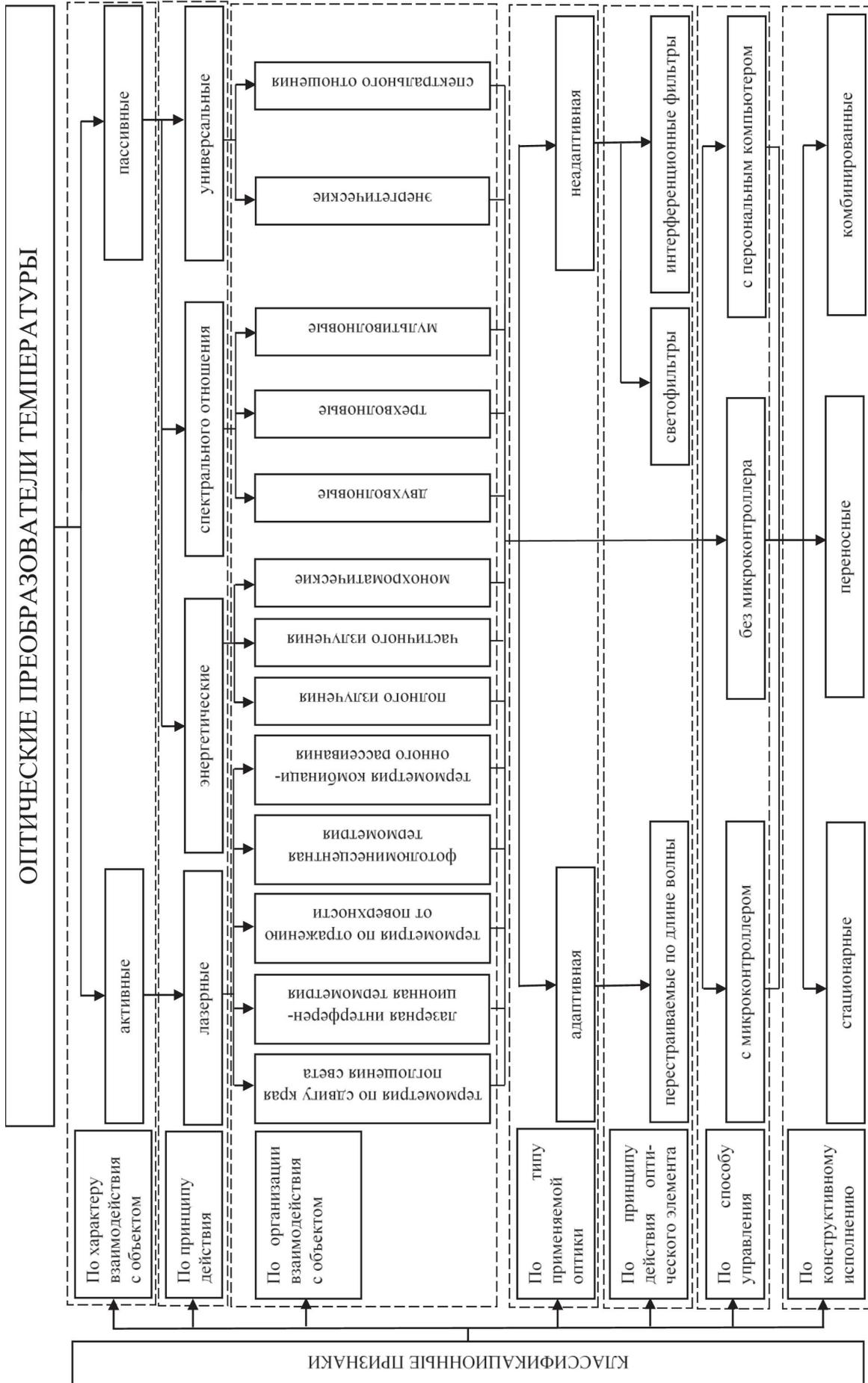
Также в последние годы, значительно возрос интерес к спектральной пирометрии, предназначенной для измерения температуры по оптическим спектрам теплового излучения объектов с возможностью измерения температуры при отсутствии априорных данных об излучательной способности. Процесс измерения заключается в регистрации непрерывного спектра излучения в широком интервале длин волн, последующем сравнении полученного спектра со спектром черного излучателя, определении участков, где эти спектры подобны, и нахождении искомой температуры как параметра распределения интенсивности в спектре. Данный метод в отличие от изложенных выше проводит измерения на большом количестве (сотнях и тысячах) длин волн. Однако для применения данного метода необходима разработка специальных спектрометров для регистрации широкого спектра излучения в области Вина. Таким образом, у данного метода также присутствуют определенные проблемы, которые в ряде случаев являются преобладающими, а именно, высокая стоимость спектрометра, сложность конструкции, сложность обработки сигнала и т. д. [4].

С целью систематизации и последующего анализа рассмотрим вначале все возможные методы измерения физические принципы получения пер-

вичной измерительной информации и не принимая во внимание структуры и алгоритмы обработки информации. Классифицировать методы и средства измерения можно по различным критериям. Обычно основным критерием таких классификаций являются физические эффекты. В данной работе, поскольку целью систематизации является выявление методов и средств, обеспечивающих комплексное улучшение характеристик, автор предлагает следующую схему классификации (рисунок 2).

Проведенный анализ различных способов и средств измерения, основанных на них, показал, что основные ограничения на характеристики вводятся используемыми элементами оптики, которые ограничивают количество длин волн на которых производятся измерения. Для качественного улучшения характеристик необходимо использование адаптивной оптики. Совершенствование структуры и элементной базы, базирующееся на традиционных физических эффектах, не дает значимых результатов. В связи с этим наиболее приемлемо применение элементов на новых физических эффектах. Одним из которых является акустооптический эффект, обладающий большим потенциалом.

Сущность эффекта заключается во взаимодействии электромагнитных волн с акустическими возмущениями, распространяющимися в упругой среде. Из широкого спектра разработанных к настоящему времени акустооптических элементов наибольшее распространение получили акустооптические перестраиваемые фильтры, обладающие большим количеством положительных характеристик. Акустооптические перестраиваемые фильтры (АОПФ) позволяют исследовать спектральный состав электромагнитного излучения по длинам волн в оптическом диапазоне, найти спектральные



характеристики излучателей и объектов, взаимодействующих с излучением. Их перестройка осуществляется путем «сви́пирования» несущей частоты акустической волны. Основное предназначение – выделение из широкого спектра составляющей с узким спектральным диапазоном и перестройка центральной волны этого диапазона в соответствии с управляющим сигналом [5–9].

Применение подобных оптических элементов, по своей сути являющихся адаптивными, значительно расширяет возможности измерения и функции и нивелирует недостатки. В подобном ОПТ появляется возможность управления полосами пропускания АОПФ и выбора таких длин волн, измерения в которых позволят определить значения истинной температуры объекта контроля. АОПФ позволяет не только существенно упростить и повысить надежность оптической части пирометра (вследствие исключения второго канала и решения взаимной юстировки каналов), но и увеличить точность измерений за счет одномоментной температурной стабилизации одного фотоприемника излучения, отсутствия каких-либо движущихся частей, микродвигателей, колеблющихся шторок в оптической части пирометра. Таким образом, создание нового класса ОПТ, основанного на применении адаптивной оптики на основе акустооптического эффекта, позволяет значительно повысить точность измерения температуры.

#### Список литературы

1. *Фаррахов Р.Г.* Оптико-электронные преобразователи температуры для систем контроля технологическими процессами: Научное издание [Текст] / Р.Г. Фаррахов, М.А. Ураксеев, А.А. Мухамадиев. – Уфа: Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 2010. – 105 с.
2. *Фрунзе А.В.* Влияние методических погрешностей пирометра на выбор прибора [Текст] / А.В. Фрунзе // Фотоника. – 2012. – № 3. – С. 46–51.
3. *Шелковой Д.С.* Разработка и исследование принципов построения и схемы оптического трехспектрального пирометра: автореферат диссертации ... кандидата технических наук [Текст] / Шелковой Денис Сергеевич. – Новосибирск, 2010. – 158 с.
4. *Магунов А.Н.* Спектральная пирометрия: особенности, преимущества, ограничения [Текст] / А.Н. Магунов // Фотоника. – 2012. – № 1. – С. 40–45.
5. *Мухамадиев А.А.* Математическая модель акустооптического пирометра [Текст] / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов // Датчики и системы. – 2012. – № 2. – С. 28–30.
6. *Мухамадиев А.А.* Статическая характеристика, чувствительность и разрешающая способность акустооптического пирометра [Текст] / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов // Датчики и системы. – 2011. – № 11. – С. 41–43.
7. *Мухамадиев А.А.* Акустооптический преобразователь температуры / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов [Текст] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2011. – № 1. – С. 26–28.
8. *Фаррахов Р.Г.* Универсальный пирометр для измерения высоких температур / Р.Г. Фаррахов, А.А. Мухамадиев [Текст] // Датчики и системы. – 2010. – № 11. – С. 23–25.
9. *Фаррахов Р.Г.* Математическая модель оптического преобразователя температуры с волоконным световодом [Текст] / Р.Г. Фаррахов // Приборы. – 2010. – № 4. – С. 11–14.

#### References

1. *Farrahov R.G.* Optiko-jelektronnye preobrazovateli temperatury dlja sistem kontrolja tehnologicheskimi processami: Nauchnoe izdanie [Tekst] / R.G. Farrahov, M.A. Urakseev, A.A. Muhamadiev. – Ufa: Ufinskaja gosudarstvennaja akademija jekonomiki i servisa, 2010. – 105 s.
2. *Frunze A.V.* Vlijanie metodicheskikh pogreshnostej pirometra na izbor pribora [Tekst] / A.V. Frunze // Fotonika. – 2012. – № 3. – S. 46–51.
3. *Shelkovej D.S.* Razrabotka i issledovanie principov postroenija i shemy opticheskogo trehspektral'nogo pirometra: avtoreferat dissertacii ... kandidata tehnikeskikh nauk [Tekst] / Shelkovej Denis Sergeevich. – Novosibirsk, 2010. – 158 s.
4. *Magunov A.N.* Spektral'naja pirometrija: osobennosti, preimushhestva, ogranichenija [Tekst] / A.N. Magunov // Fotonika. – 2012. – № 1. – S. 40–45.
5. *Muhamadiev A.A.* Matematicheskaja model' akustoopticheskogo pirometra [Tekst] / A.A. Muhamadiev, R.G. Farrahov // Datchiki i sistemy. – 2012. – № 2. – S. 28–30.
6. *Muhamadiev A.A.* Statcheskaja harakteristika, chuvstvitel'nost' i razreshajushhaja sposobnost' akustoopticheskogo pirometra [Tekst] / A.A. Muhamadiev, R.G. Farrahov // Datchiki i sistemy. – 2011. – № 11. – S. 41–43.
7. *Muhamadiev A.A.* Akustoopticheskij preobrazovatel' temperatury / A.A. Muhamadiev, R.G. Farrahov [Tekst] // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. – 2011. – № 1. – S. 26–28.
8. *Farrahov R.G.* Universal'nyj piometr dlja izmerenija vysokih temperatur / R.G. Farrahov, A.A. Muhamadiev [Tekst] // Datchiki i sistemy. – 2010. – № 11. – S. 23–25.
9. *Farrahov R.G.* Matematicheskaja model' opticheskogo preobrazovatelja temperatury s volokonnym svetovodom [Tekst] / R.G. Farrahov // Pribory. – 2010. – № 4. – S. 11–14.

## ОБ АВТОРАХ

*Андреев Леонид Николаевич*, канд. техн. 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.

*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.

*Бабинцева Ксения Анатольевна*, магистрант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет дизайна и технологий», e-mail: nikolay.a.feoktistov@gmail.com, Россия, г. Москва.

*Бобренёва Юлия Олеговна*, магистрант факультета математики и информационных технологий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Башкирский государственный университет», e-mail: byulyao12@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Возмилов Александр Григорьевич*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрооборудование и электронные системы автомобилей и транспорта», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», e-mail: vozmiag44@gambler.ru, Россия, г. Челябинск.

*Гордеев Эдуард Николаевич*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Информационная безопасность», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», e-mail: tatmigor@gmail.com, Москва, Россия.

*Губайдуллин Ирек Марсович*, д-р физ.-мат. наук, доцент, старш. научн. сотрудник лаборатории математической химии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт нефтехимии и катализа» Российской академии наук, e-mail: irekmars@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*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.

*Доломатов Михаил Юрьевич*, канд. техн. наук, д-р хим. наук, профессор кафедры «Физика», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика электронных процессов и наноматериалов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: dolomatov@gmail.com, Россия, г. Уфа.

*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.

*Зайцев А.Г.* аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет дизайна и технологий», e-mail: nikolay.a.feoktistov@gmail.com, Россия, г. Москва.

*Закурдаева Татьяна Алексеевна*, аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: zak.tanya@bk.ru, Россия, г. Уфа.

*Кабашов Владимир Юрьевич*, д-р техн. наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экологии», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Башкирский государственный аграрный университет», Россия, г. Уфа.

*Каримов Ильшат Ильгизович*, аспирант кафедры «Электроснабжение и применение электрической энергии в сельском хозяйстве», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: karishat89@gmail.com, Россия, г. Уфа.

*Китабов Андрей Николаевич*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: andrey.ugatu@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Коледина Камила Феликсовна*, канд. физ.-мат. наук, доцент, и. о. зав. кафедрой «Информатика и информационно-коммуникационные технологии», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: koledinakamila@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Кучеров Борис Алексеевич*, аспирант кафедры «Информационные технологии и управляющие системы», Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московской области «Финансово-технологическая академия», e-mail: boris.ku4erov@gmail.com, Россия, г. Королев.

*Марченко Алексей Александрович*, аспирант, ст. преподаватель кафедры «Электрооборудование и радиооборудование судов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Камчатский государственный технический университет», e-mail: marchello21@mail.ru, Россия, г. Петропавловск-Камчатский.

*Мухамадиев Айдар Асхатович*, канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: Aidar80@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Новичкова Анастасия Валерьевна*, аспирант лаборатории математической химии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт нефтехимии и катализа Российской академии наук», e-mail: stacy-pm25@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Нугаев Радик Рауфович*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: nugaev@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Осинина Елена Викторовна*, инженер-программист ОАО НПП «Эталон», e-mail: karo1@mail.ru, Россия, г. Омск.

*Серегородцева Светлана Юрьевна*, магистрант кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: s.u.svetlana@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Сухинец Антон Валерьевич*, студент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: gulin\_tks@ugatu.ac.ru, Россия, г. Уфа.

*Сухинец Жанна Артуровна*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа, e-mail: sukhinets@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Татевосян Андрей Александрович*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрическая техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Омского государственного технического университета, e-mail: karo1@mail.ru, Россия, г. Омск.

*Титов Дмитрий Евгеньевич*, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Камышинский технологический институт Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный технический университет», e-mail: dm30081989@yandex.ru, Россия, г. Камышин.

*Ураксеев Марат Абдуллоевич*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: uma1941@mail.ru,

Россия, г. Уфа.

*Файн Вениамин Борисович*, кандидат техн. наук, доцент кафедры «Применение электрической энергии в сельском хозяйстве» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Челябинская государственная агроинженерная академия», e-mail: [vozmiag44@rambler.ru](mailto:vozmiag44@rambler.ru), Россия, г. Челябинск.

*Федосов Артем Васильевич*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: [pbot@mail.ru](mailto:pbot@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](mailto:nikolay.a.feoktistov@gmail.com), Россия, г. Москва.

*Францов Родион Александрович*, магистрант кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: [rodion.asha@mail.ru](mailto:rodion.asha@mail.ru), Россия, г. Уфа.

*Щуров Артем Николаевич*, аспирант кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», e-mail: [mobiartem@yandex.ru](mailto:mobiartem@yandex.ru), Россия, г. Новочеркасск.

*Юркин Владимир Валерьевич*, аспирант кафедры «Энергообеспечение сельского хозяйства», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», Россия, г. Тюмень.

*Яковлев Сергей Михайлович*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение и применение электрической энергии в сельском хозяйстве», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: [karishat89@gmail.com](mailto:karishat89@gmail.com), Россия, г. Уфа.

## ABOUT THE AUTHORS

*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: [alextnn86@mail.ru](mailto:alextnn86@mail.ru), Russia, Tyumen.

*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](mailto:artuschenko@mail.ru), Russia, Korolev.

*Babintseva Ksenija A.*, undergraduate Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Moscow state university of design and technology», e-mail: [nikolay.a.feoktistov@gmail.com](mailto:nikolay.a.feoktistov@gmail.com), Russia, Moscow.

*Bobreneva Yuliya O.*, undergraduate faculty of «Mathematics and Information Technologies», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Bashkir State University», e-mail: [byulyao12@mail.ru](mailto:byulyao12@mail.ru), Russia, Ufa.

*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: [alextnn86@mail.ru](mailto:alextnn86@mail.ru), Russia, Tyumen.

*Dolomatov Michail Yu.*, cand. sci. tech., dr. sci. chem, professor chair of «Physics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state university of economics and service», head of the laboratory «Physics of electronic processes and nanomaterials», e-mail: [dolomatov@gmail.com](mailto:dolomatov@gmail.com), 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.rb.ru](mailto:efanov@mail.rb.ru), Russia, Ufa.

*Fain Veniamin B.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «The use of electrical energy in agriculture» Federal

state budgetary educational institution of higher professional education «Chelyabinsk state agroengineering academy», e-mail: vozmiag44@rambler.ru, Russia, Chelyabinsk.

*Fedosov Artem V.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Industrial safety and labor protection», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: pbot@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.

*Francov Rodion A.*, undergraduate chair of «Industrial safety and labor protection», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: rodion.asha@mail.ru, Russia, Ufa.

*Gordeev Eduard N.*, dr. sci. tech., professor chair of «Information Security» Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Bauman Moscow state technical university», e-mail: tatmigor@gmail.com, Russia, Moscow.

*Gubaidullin Irek M.*, dr. tech. phys.-math., associate professor, senior researcher laboratory «Mathematical chemistry», Federal state budgetary institution of science «Institute of Petrochemistry and Catalysis» Russian academy of sciences, e-mail: irekmars@mail.ru, Russia, Ufa.

*Kabashov Vladimir Yu.*, dr. sci. tech., associate professor chair of «Life safety and environmental» Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Bashkir state agrarian university», e-mail: g1311@mail.ru, Russia, Ufa.

*Karimov Ilshat I.*, post-graduate student chair of «Power supply and use of electricity in agriculture» Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Bashkir state agrarian university», e-mail: karishat89@gmail.com, Russia, Ufa.

*Kitabov Andrei N.*, cand. sci. tech., senior scientific researcher chair of «Information and measuring technics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: andrey.ugatu@mail.ru, Russia, Ufa.

*Koledina Kamila F.*, cand. sci. phys.-math., associate professor, head chair of «Computer science and information and communication technology», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state university of economics and service», e-mail: koledinakamila@mail.ru, Russia, Ufa.

*Kuchеров Boris A.*, post-graduate student chair of «Information technology and control systems», State budgetary educational institution of higher professional education Moscow region «Financial and technological academy», e-mail: boris.ku4erov@gmail.com, Russia, Korolev.

*Marchenko Alexey A.*, post-graduate student, senior lecturer chair of «Electrical and radio equipment of ships», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Kamchatka state technical university», e-mail: marchello21@mail.ru, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky.

*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.

*Novichkova Anastasiya V.*, laboratory «Mathematical chemistry», Federal state budgetary institution of science «Institute of Petrochemistry and Catalysis» Russian academy of sciences, e-mail: stacy-pm25@mail.ru, Russia, Ufa.

*Nugaev Radik R.*, 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: nugaevrr@mail.ru, Russia, Ufa.

*Osinina Elena V.*, software-engineer Scientific-Production Enterprise «Etalon», e-mail: karo1@mail.ru, Russia, Omsk.

*Seregorodceva Svetlana Y.*, undergraduate chair of «Industrial safety and labor protection», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: s.u.svetlana@yandex.ru, Russia, Ufa.

*Shchurov Artyom N.*, post-graduate student chair of «Power plants and power systems» Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Platov South-Russian State Polytechnic University

(Novocherkassk Polytechnic Institute)», e-mail: mobiartem@yandex.ru, Russia, Novocherkassk.

*Sukhinets Anton V.*, student, Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: sukhinets@mail.ru, Russia, Ufa.

*Sukhinets Zhanna A.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Telecommunication systems», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: sukhinets@mail.ru, Russia, Ufa.

*Tatevosayn Andrey A.*, cand. sci. tech., associate professor, associate professor chair of «Electrical Engineering», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Omsk State Technical University», e-mail: karo1@mail.ru, Russia, Omsk.

*Titov Dmitry E.*, post-graduate student chair of «Power supply of industrial enterprises», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Yuri Gagarin state technical university of Saratov», senior lecturer, Kamyshin Institute of Technology Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Volgograd State Technical University», e-mail: dm30081989@yandex.ru, Russia, Kamyshin.

*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.

*Vozmilov Alexander G.*, dr. sci. tech., professor chair of «Electrical and electronic systems of cars and trucks», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «South Ural State University (National Research University)», e-mail: vozmiag44@rambler.ru, Russia, Chelyabinsk

*Yakovlev Sergey M.*, cand. sci. tech., associate professor, associate professor chair of «Power supply and use of electricity in agriculture», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Bashkir state agrarian university», e-mail: karishat89@gmail.com, Russia, Ufa.

*Yurkin Vladimir V.* post-graduate student, Federal state budgetary educational institution of higher professional education «State agrarian university of Northern Zauralye», e-mail: womanow@mail.ru, Russia, Tyumen.

*Zakyrdaevaza Tatyana A.* post-graduate student, Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: k.tanya@bk.ru, Russia, Ufa.

*Zaitsev A.G.*, post-graduate student, 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.

## СПИСОК СТАТЕЙ, ИЗДАНЫХ В 2014 ГОДУ

### А

Адиев Т.И., Тлявлин А.З., Любопыттов В.С. Синтез корректирующего фильтра для OFDM-сигнала. № 2, с. 62

Арасланов Т.Р., Доломатов М.Ю., Калашченко Н.В. Особенности феноменологических квантовых параметров плазмы крови человека при доброкачественных и злокачественных опухолях головного мозга. № 1, с. 101

Артюшенко В.М., Воловач В.И. Динамические модели параметров движения протяженных объектов. № 2, с. 84

Артюшенко В.М., Корчагин В.А. Расчет и моделирование вероятности появления внутриканальных и интермодуляционных помех беспроводных устройств с малым радиусом действия. № 1, с. 57

Артюшенко В.М., Кучеров Б.А. Алгоритмы адаптации линий спутниковой связи по мощности передающих устройств земных станций при работе в составе узловых сети. № 4, с. 64

### Б

Белов О.А., Парфенкин А.И. Системная интеграция контроля электрооборудования. № 1, с. 14

Берг О.И., Ураксеев М.А. Сопоставительная оценка по характеристикам различных типов преобразователей перемещений. № 1, с. 92

Бутков В.П., Зикий А.Н., Зламан П.Н. Сверхширокополосный детектор. № 2, с. 111

### В

Возмилов А.Г., Фаин В.Б., Андреев Л.Н., Дмитриев А.А., Юркин В.В. Анализ систем очистки воздуха в животноводческих и птицеводческих комплексах. № 4, с. 45

Возмилов А.Г., Андреев Л.Н., Дмитриев А.А., Жеребцов Б.В. Об основных задачах, решаемых при проектировании мокрых электрофильтров. № 1, с. 24

Воловач В.И., Будилов В.Н. Определение взаимосвязи порогового напряжения РУО и достоверности обнаружения протяженных объектов. № 3, с. 69

Воронин В.В., Давыдов О.А. Система мониторинга технического состояния локальной вычислительной сети. № 1, с. 73

### Г

Гордеев Э.Н. Об устойчивости моделирования некоторых процессов. № 4, с. 83

Грахова Е.П., Мешков И.К., Багманов В.Х., Виноградова И.Л. Моделирование СШП радиоимпульсов на основе производных Гаусса и Рэлея с учетом спектральной маски ГКРЧ. № 3, с. 62

### Д

Долгицер А., Козадаев Е. Повышение чувствительности дифференциальной защиты силовых трансформаторов. № 2, с. 5

Доломатов М.Ю. Методологические проблемы моделирования и интерпретации данных физических исследований на примерах некорректных задач спектроскопии. № 4, с. 94

Доломатов М.Ю., Карабельская И.В., Ковалева Э.А. Проектирование ИС по свойствам и электронным характеристикам сложных многокомпонентных органических систем. № 2, с. 68

Доломатов М.Ю., Телин А.Г., Сафуанова Р.М., Борисов Г.К., Бурханова З.И., Кисмерешкин С.В., Докичев В.А. Резонансная колебательная деструкция водородных связей как причина метастабильности эмульсий под действием магнитного поля. № 3, с. 113

### Е

Евстафьев А.И., Ураксеев М.А. Применение матриц Джонса для описания состояния поляризации света в магнитооптическом датчике тока. № 3, с. 96

Ефанов В.Н., Китабов А.Н. Количественная оценка степени развития дефектов погружного электрооборудования на основе вейвлет-преобразования сигнала вибрации. № 2, с. 29

Ефанов В.Н., Китабов А.Н., Нугаев Р.Р. Проектирование базы данных результатов диагностики погружного оборудования на основе информационной модели по стандарту IDEF1X. № 4, с.

### **З**

Зикий А.Н., Зламан П.Н., Власенко Д.В., Гончарова Т.О., Третьяк А.А. Фильтры на поверхностных акустических волнах. № 3, с. 50

### **И**

Исмагилов Ф.Р., Максудов Д.В., Гареев А.Ш. Способы уменьшения негативного влияния провалов напряжения на потребителей. № 2, с. 13.

### **К**

Кабашов В.Ю. Влияние параметров пролета на аварийные отключения сельских ВЛ 6–10 кВ при воздействии ветра. № 4, с. 52

Козловский В.Н., Строганов В.И., Дебелов В.В., Пьянов М.А. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 1. № 1, с. 40

Козловский В.Н., Строганов В.И., Дебелов В.В., Пьянов М.А. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 2. № 2, с. 19.

Крымский В.Г., Ахмеджанов Ф.М., Имильбаев Р.Р., Юнусов А.Р. Выбор периодичности обновления информации о состоянии газораспределительной сети при использовании системы телеметрии. № 1, с. 78

Кучеров Б.А. Состояние и перспективы развития основных направлений информатизации распределения средств управления космическими аппаратами. № 2, с. 54

Кушнир В.Г. Получение нового класса стеклообразных материалов на основе электротехнических технологий. № 1, с. 36

Кушнир В.Г., Поезжалов В.М. Система отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, основанная на использовании природно-климатических факторов. № 3, с. 45

### **Л**

Линенко А.В., Акчурин С.В., Туктаров М.Ф. Энергетические показатели линейного электропривода решетчатого стана зерноочистительной машины. № 1, с. 28

### **М**

Марченко А.А. Испытание асинхронного двигателя под номинальным током в режиме противовключения и понижения частоты напряжения. № 4, с. 25

Марченко А.А. Определение диапазона номинальной мощности электродвигателей при испытаниях методом динамического нагружения. № 2, с. 38.

Мухамадиев А.А. Классификация оптических преобразователей температуры для систем экологического и техноферного мониторинга. № 4, с. 113

### **Н**

Новичкова А.В., Бобренева Ю.О., Губайдуллин И.М., Коледина К.Ф. Информационные системы моделирования реакционной способности алкенов в реакции гидроалюминирования олефинов триизобутилалюминием. № 3, с. 55

Новичкова А.В., Бобренева Ю.О., Губайдуллин И.М., Коледина К.Ф. Информационный комплекс построения кинетической модели реакции гидроалюминирования олефинов триизобутилалюминием. № 4, с. 58

Нугаев И.Ф., Байгускаров И.С., Стыскин А.В., Уразбахтина Н.Г. Динамическая модель тепловых процессов в погружном электродвигателе насосной установки нефтедобывающей скважины. № 3, с. 38

### **П**

Павлов С.В., Ефремова О.А., Соколова А.В. Формализованное описание пространственной информации в составе трехмерных моделей потенциально опасных объектов на основе теоретико-множественного подхода. № 1, с. 66

Павлов С.В., Самойлов А.С. Использование топологических отношений для обеспечения актуальности базы пространственных данных в распределенной геоинформационной системе газоснабжения промышленных предприятий. № 3, с. 75

Пентегов И.В. К теории метода тепловых источников, используемого при анализе тепловых процессов в электротехнических системах. № 3, с. 5

Прокина Д.Н., Федосов А.В., Штур В.Б. Применение информационных систем для оценки риска опасных производственных объектов. № 2, с. 73

## **Р**

Рогинская Л.Э., Горбунов А.С., Ялалова З.И. Улучшение электромагнитной совместимости преобразовательных устройств с сетью и нагрузкой с помощью многофазных трансформаторов. № 3, с. 21

Романченко А.Ф., Мухамадиев А.А. Формирование информационных характеристик первичных преобразователей при комплексной обработке выходного сигнала. № 3, с. 102

Рудерман С.Ю., Нургаянова О.С. Набор хромосом как потенциальный источник информации о предстоящем клетке построении последовательности белков (оптимизационная модель картины). № 3, с. 107

## **С**

Саухатс А., Антонов Д., Жалостиба Д., Долгицер А., Биела-Даилидовича Э. Применение программного обеспечения моделирования энергосистем в обучающих и научных целях. № 1, с. 5

Семина И.А. Имитационное моделирование трехмерной модели магнитной системы открытого типа в комплексе программ ANSYS. № 1, с. 32

Серенков П.С., Савкова Е.Н., Павлов К.А. Концепция развития доказательной базы современной метрологии. Организационная составляющая процесса измерения, № 1, с. 86

Серенков П.С., Савкова Е.Н., Павлов К.А. Концепция развития доказательной базы современной метрологии. Техническая составляющая процесса измерения. № 2, с. 97

Сироткин С.Л., Коньков А.Н. Методы непрерывной обработки информации от частотных датчиков. № 3, с. 89

Сухинец Ж.А., Сухинец А.В. Функциональный преобразователь частота – код для частотных датчиков. № 4, с. 88

## **Т**

Татевосян А.А., Осинина Е.В. Исследование динамических характеристик линейного магнитоэлектрического привода для испытания вязкоупругих свойств эластомеров. № 4, с. 32

Титов Д.Е., Щуров А.Н. Анализ статистических данных о результатах работы систем мониторинга гололедообразования. № 4, с. 12

## **У**

Ураксеев М.А., Шарипов М.М. Современные волоконно-оптические системы дистанционного измерения электрического тока. № 2, с. 91

Ураксеев М.А., Закурдаева Т.А. Современные волоконно-оптические датчики напряжения и напряженности электрического поля на электрооптическом эффекте. № 4, с. 101

## **Ф**

Фаррахов Р.Г., Мухамадиев А.А. Оптический блок акустооптического преобразователя температуры. № 2, с. 105

Федосов А.В., Серегородцева С.Ю., Францов Р.А. Устройство для исследования условий труда при проведении специальной оценки условий труда на предприятиях. № 4, с. 107

Феоктистов Н.А., Зайцев А.Г., Бабинцева К.А. Разработка систем стабилизации параметров электрической энергии от ветроэлектрического генератора бытового назначения. № 4, с. 5

Фетисов В.С., Ахмеров Ш.Р., Сизоненко Р.В., Красноперов Р.А. Наземные станции подзарядки электрических беспилотных летательных аппаратов на основе открытых контактных площадок. № 2, с. 44

## **Х**

Хакимьянов М.И., Гузеев Б.В., Рябишина Л.А. Методические основы расчета потребления электроэнергии электроприводами дожимных и кустовых насосных станций. № 3, с. 15

## **Ц**

Цветков В.М. Энергоэффективность мобильных устройств под управлением операционной системы ANDROID. № 2, с. 79

## **Ш**

Шабанов В.А., Пашкин В.В., Ивашкин О.Н. Анализ потерь электроэнергии в электроприводе аппарата воздушного охлаждения газа. № 1, с. 18

Шапиро С.В., Саенко А.Г., Садыков М.А., Мичков Е.В. Высокочастотный озонатор с охлаждаемым алюминиевым электродом. № 1, с. 49

Шуляковская Д.О., Долوماتов М.Ю., Долوماتова М.М., Еремина С.А. Метод фотоизображений в информационной системе контроля физико-химических свойств многокомпонентных углеводородных систем. № 1, с. 106

## **Я**

Яковлев С.М., Каримов И.И. Энергосберегающая светодиодная система облучения растений. № 4, с. 18

Яруллин Р.Б., Сафин Р.Р. К вопросу проектирования саморегулируемого инерционного вибратора асинхронного электропривода вибромашин. № 3, с. 30

## **LIST OF ARTICLES PUBLISHED IN 2014**

## **A**

Adiev T.I., Tlyavlin A.Z., Lyubopytov V.S. Mathematical model of pre-equalizer for ofdm signal. № 2. p. 62

Araslanov T.R., Dolomatov M.Yu., Kalashchenko N.V. The features of phenomenological quantum parameters of human blood plasma in benign and malignant brain tumors. № 1, p. 101

Artuschenko V.M., Korchagin V.A. The calculation and modeling the probability of occurrence of co-channel and intermodulation interference wireless devices with small radius actions. № 1, p. 57

Artuschenko V.M., Kucherov B.A. adaptation algorithms of satellite communication links by transmitter power on ground stations when working as part of a meshed network. № 4, p. 64

Artyushenko V.M., Volovach V.I. Dynamic models of parameters of movement of extended objects. № 2, p. 84

## **B**

Belov O.A., Parfenkin A.I. System integration of electrical equipment monitoring. № 1, p. 14

Berg O.I., Urakseev M.A. Comparative assessment characteristics of different types displacement transducers. № 1, p. 92

Butkov V.P., Zikiy A.N., Zlaman P.N. Ultrawideband detector. № 2, p. 111

## **D**

Dolgicers A., Kozadajevs Je. Improvement of the sensitivity of differential protection of power transformers. № 2, p. 5

Dolomatov M.Yu. Methodological problem of simulation and interpretation data physical researches on examples ill – posed problem of spektroskopy. № 4, p. 94

Dolomatov M.Yu., Karabelskaya I.V., Kovaleva E.A. Design of information systems on the properties of the electronic characteristics of complex multicomponent organic systems. № 2, p. 68

Dolomatov M.Yu., Telin A.G., Safuanova R.M., Borisov G.K., Burhanova Z.I., Kimereshkin S.V., Dokichev V.A. Resonant vibrational destruction of hydrogen bonds as a cause meta-stable emulsion under low frequency electromagnetic field. № 3., p. 113

## **E**

Efanov V.N., Kitabov A.N. Quantitative evaluation of the degree of defects electric immersion based on wavelet transform of a signal vibrations. № 2, p. 29

Efanov V.N., Kitabov A.N., Nugaev R.R. Database design of diagnostic results of submersible equipment based on the information model by IDEF1X. № 4, p. 73

Evstafev A.I., Urakseev M.A. Application of the jones matrices for describing polarization state of light in magneto-optical current sensor. № 3, p. 96

## **F**

Farrahov R.G., Mukhamadiev A.A. Optical unit acousto-optic temperature transducer. № 2, p. 105

Fedosov A.V., Seregorodceva S. Yu., Francov R.A. The device for research of working conditions when carrying out the special assessment of working conditions at the enterprises. № 4, p. 107

Feoktistov N.A., Zaitsev A.G., Babintseva K.A. Development of systems of stabilizing of parameters of electrical energy from the vetroelektrichesky generator of the household purpose. № 4, p. 5

Fetisov V.S., Akhmerov Sh.R., Sizonenko R.V., Krasnopyorov R.A. Terrestrial charging station for electrical unmanned aerial vehicles based on open contact pads. № 2, p. 44

## G

Gordeev E.N. On the stability of the simulation of some processes. № 4, p. 83

Grakhova E.P., Meshkov I.K., Bagmanov V.Kh., Vinogradova I.L. UWB radio pulses design based on the derivative Gaussian and Rayleigh pulses relevant to the spectral mask of radiofrequencies committee. № 3, p. 62

## H

Hakimyanov M.I., Guzeev B.V., Ryabishina L.A. Methodological bases calculation of power consumption of electric drives booster and group pumping station. № 3, p. 15

## I

Ismagilov F.R., Maksudov D.V., Gareev A.Sh. The methods of reducing of a negative impact of voltage sags on consumers. № 2, p. 13

## K

Kabashov V.Yu. Influence of parameter of span on the emergency shut-off rural overhead lines 6–10 kV at impact of wind. № 4, p. 52

Kozlovskiy V.N., Stroganov V.I., Debelov V.V., Pianov M.A. Complex electronic control systems passenger traffic hybrid car. Part 1. № 1, p. 40

Kozlovskiy V.N., Stroganov V.I., Debelov V.V., Pianov M.A. Complex electronic control systems passenger traffic hybrid car. Part 2. № 2, p. 19

Krymsky V.G., Akhmedzhanov F.M., Imilbaev R.R., Yunusov A.R. Choice of time period of updating the information on performances of gas distribution network in case the telemetry system is used. № 1, p. 78

Kuchеров B.A. State and development prospects of basic directions of informatization distribution of control facilities for spacecrafts. № 2. p. 54

Kushnir V.G. Obtaining a new class of glassy materials on the basis of electrical technologies. № 1, p. 36

Kushnir V.G., Poezshalov V.M. Climatic factors-based heating, ventilation and air conditioning system. № 3, p. 45

## L

Linenko A.V., Akchurin S.V., Tuktarov M.F. Energy indicators of the linear electric drive of the sieve pan grain-cleaning machine. № 1, p. 28

## M

Marchenko A.A. Determination of range of rated power of electric motors at tests by the method of dynamic loading. № 2, p. 38

Marchenko A.A. Test of the asynchronous engine under rated current in the antiinclusion and fall of frequency of tension mode. № 4, p. 25

Mukhamadiev A.A. Classification of optical transducers for temperature systems for environmental monitoring and technospheric. № 4, p. 113

## N

Novichkova A.V., Bobreneva Yu.O., Gubaidullin I.M., Koledina K.F. Information systems for modeling reactivity of alkenes in olefin hydroalumination reactions with triisobutylaluminum. № 3, p. 55

Novichkova A.V., Bobreneva Yu.O., Gubaidullin I.M., Koledina K.F. Information system of kinetic modeling olefin hydroalumination reactions with triisobutylaluminum. № 4, p. 58

Nugaev I.F., Byguskarov I.S., Styskin A.V., Urazbakhtina N.G. Dynamic model of thermal processes in the submersible motor oil well pumping unit. № 3, p. 38

## P

Pavlov S.V., Efremova O.A., Sokolova A.V. Formalized description of the spatial information within three-dimensional models of potentially dangerous objectson the basis set-theoretic approach. № 1, p. 66

Pavlov S.V., Samoylov A.S. Topological relations use for spatial database relevance provision in distributed geographic information system of industrial enterprises gas supply system. № 3, p. 75

Pentegov I.V. On the method of heat sources in the analysis of thermal processes in electrotechnical systems. № 3, p. 5

Prokina D.N., Fedosov A.V., Shtur V.B. Information systems application measure the risk of dangerous production facilities. № 2, p. 73

## R

Roginskaya L.E., Gorbunov A.S., Yalalova Z.I. Improving of electromagnetic compatibility of converter devices with mains and load using multiphase transformers. № 3, p. 21

Romanchenko A.F., Mukhamadiev A.A. Formation of information characteristics of primary converters for complex output signal processing. № 3, p. 102

Ruderman S.Yu., Nurgajanova O.S. Set of chromosomes as a potential source of information about the upcoming construction of the cell protein sequences (optimization model). № 3, p. 107

## S

Sauhats A., Antonovs D., Zalostiba D., Dolgicers A., Biela-Dailidovicha E. Application of power system modelling software for educational and research purpose. № 1, p. 5

Semina I.A. Simulation of three-dimensional model of magnetic open in complex program ANSYS. № 1, p. 32

Serenkov P.S., Savkova E.N., Pavlov K.A. Concept of development of evidential base of modern metrology. Organizational component of process of measurement. № 1, p. 86

Serenkov P.S., Savkova E.N., Pavlov K.A. Concept of development of evidential base of modern metrology. Technical component of process of measurement. № 2, p. 97

Shabanov V.A., Pashkin V.V., Ivashkin O.N. Analysis of gas air-cooler electric motor energy loss. № 1, p. 18

Shapiro S.V., Saenko A.G., Sadykov M.A., Michkov E.V. High frequency ozone generator with cooled aluminum electrode. № 1, p. 49

Shulyakovskaya D.O., Dolomatov M.Yu., Dolomatova M.M., Eremina S.A. Method of photographic images in information system of multi-component hydrocarbon systems physicochemical properties control. № 1, p. 106

Sirotkin S.L., Konkov A.N. The methods continuous working of information from frequency sensors. № 3, p. 89

Sukhinets Zh.A., Sukhinets A.V. Функциональный преобразователь частота – код для частотных датчиков. № 4, p. 88

## T

Tatevosyan A.A., Osinina E.V. Study dynamic characteristics linear magnetoelectric drive for research viscoelastic properties elastomers. № 4, p. 32

Titov D.Ye., Shchurov A.N. Analysis of statistical data on results of work of systems of glaze ice monitoring. № 4, p. 12

Tsvetkov V.M. Energy mobile devices under the control operating system android. № 2, p. 79

## U

Urakseev M.A., Sharipov M.M. Modern fiber-optic systems for remote measurement of the electric current. № 2, p. 91

Urakseev M.A., Zakyrdava T.A. Advanced fiber-optic voltage sensor and electric field at the electro-optical effect. № 4, p. 101

## V

Volovach V.I., Budilov V.N. Definition of interrelation of threshold tension of REDD and reliability of detection of extended objects. № 3, p. 69

Voronin V.V., Davydov O.A. Local area network technical state monitoring system. № 1, p. 73

Vozmilov A.G., Andreev L.N., Dmitriev A.A., Zherebtsov B.V. About main problem solved in design wet electrostatic filters. № 1, p. 24

Vozmilov A.G., Fain V.B., Andreev L.N., Dmitriev A.A., Yurkin V.V. Analysis of air purification systems in livestock and poultry farms. № 4, p. 45

## Y

Yakovlev S.M., Karimov I.I. Energy-saving lighting system for plants. № 4, p. 18

Yarullin R.B., Safin R.R. By design issues of self-regulatory inertia vibrator asynchronous electric drive the vibration machine. № 3, p. 30

## Z

Zikiy A.N., Zlaman P.N., Vlasenko D.V., Goncharova T.O., Tretyak A.A. Filters on the surface-acoustic wave. № 3, p. 50.

## **Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале:**

1. Статьи, предоставляемые авторами в журнал, должны соответствовать профилю журнала, обладать новизной, интересовать широкий круг научной общественности.
2. Редакция принимает к публикации только открытые материалы на русском и английском языках (для иностранных авторов).
3. Поля – 2,5 см с каждой стороны; шрифт – Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал – полуторный; ссылки на литературу – в квадратных скобках. При наличии ссылок список литературы обязателен (в порядке цитирования, в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 или ГОСТ Р 7.05-2008).
4. В правом верхнем углу жирным курсивом:  
фамилия, имя, отчество авторов (обязательно полностью), ученая степень, ученое звание, должность, структурное подразделение (обязательно полностью), наименование организации (полностью), город, страна.
5. По центру, жирным шрифтом, заглавными буквами: название статьи, УДК в правом верхнем углу.
6. В конце статьи укажите почтовый адрес с указанием индекса, фамилию и инициалы получателя (по этому адресу будет выслан журнал), телефон (сотовый), e-mail контактного лица. Файл со статьей оформить: **Фамилия И.О.doc** (или docx). Отправлять по адресу: **uop-ugaes@mail.ru**.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельным файлом.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (до 240 слов, определяющих теоретическую ценность и практическую новизну статьи), ключевые слова (не менее 10), список литературы обязателен (не менее 5 источников) на русском и английском языках.
9. Автор дает согласие на воспроизведение на безвозмездной основе в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВПО «УГУЭС» электронной версии своей статьи, опубликованной в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы».
10. Графический и табличный материал должен быть представлен в **черно-белом** варианте в приложении к WORD. Например, Microsoft Graph, без использования сканирования; для диаграмм применять различную штриховку, размер шрифта 10 или 11 pt, математические формулы оформляются через редактор формул Microsoft Equation, а их нумерация проставляется с правой стороны. Таблицы, диаграммы, рисунки подписываются 12 шрифтом в правом верхнем углу.
11. Сокращение слов, имен и названий, как правило, не допускается. Разрешаются лишь общепринятые сокращения мер физических, химических и математических величин и терминов и т. д.
12. Поступившие в редакцию статьи в обязательном порядке будут проходить рецензирование. Рецензии отклоненных работ высылаются авторам и содержат аргументированный отказ от публикации. В рецензиях работ, отправленных на доработку, указываются замечания к статье.
13. Все статьи, поступившие в редакцию, в обязательном порядке проходят проверку в системе «Антиплагиат».
14. С аспирантов плата за публикацию не взимается. При отправлении статьи на электронный адрес также необходимо отправить отсканированную справку из аспирантуры, заверенную отделом кадров.

### **Памятка авторам**

В статье настоятельно рекомендуется:

- НЕ использовать табуляцию (клавиша Tab);
- НЕ устанавливать свои стили абзацев (кроме принятых по умолчанию);
- НЕ расставлять автоматические списки (при нумерации строк и абзацев);
- НЕ ставить двойные, тройные и т. д. пробелы между словами.

Рекомендуется применять в статье только один тип кавычек («»).

Помнить о том, что необходимо различать дефис и тире. Тире выставляется сочетанием двух клавиш («Ctrl» + «-»).

**Все цитаты в статье должны быть соотнесены со списком литературы, при прямом цитировании обязательно указывать номера страниц.** Список литературы не следует смешивать с примечаниями, которые должны располагаться перед списком литературы.

**Статьи, не соответствующие требованиям, отклоняются для доработки.**

