

ISSN 1999-5458

# Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 3, т. 9, 2013



# Electrical and data processing facilities and systems

№ 3, v. 9, 2013



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

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭКОНОМИКИ И СЕРВИСА

УГУЭС

№ 3, т. 9, 2013

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

## Учредитель

Министерство образования и науки РФ


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

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций» (решение президиума Высшей аттестационной комиссии от 2 марта 2012 года).


Международный стандартный серийный номер ISSN 1999-5458.

## Редакционная коллегия:


Главный редактор:


С.В. Шапиро – д-р техн. наук, проф. Уфимского государственного университета экономики и сервиса (Россия, г. Уфа) 


Зам. главного редактора:


Ш.З. Валиев – канд. техн. наук, д-р экон. наук, проф. Уфимского государственного университета экономики и сервиса (Россия, г. Уфа) 


## Члены редакционной коллегии:


В.М. Артюшенко – д-р техн. наук, проф. Финансово-технологической академии (Россия, г. Москва) 

Б.М. Горшков – д-р техн. наук, проф. Поволжского государственного университета сервиса (Россия, г. Тольятти) 


М.Ю. Долomatов – д-р хим. наук, проф. Уфимского государственного университета экономики и сервиса (Россия, г. Уфа) 


В.Г. Крымский – д-р техн. наук, проф. Уфимского государственного университета 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. Уфимского государственного авиационного технического университета (Россия, г. Уфа) 

Р.Р. Сафин – д-р техн. наук, проф.


Уфимского государственного университета 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. Уфимского государственного университета экономики и сервиса (Россия, г. Уфа) 


М.А. Ураксеев – д-р техн. наук, проф. Уфимского государственного авиационного технического университета (Россия, г. Уфа) 


Н.А. Феоктистов – д-р техн. наук, проф.

Московского государственного университета дизайна и технологии (Россия, г. Москва) 

Ф.Ф. Хизбуллин – д-р техн. наук, проф. Уфимского государственного университета 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. Уфимского государственного нефтяного технического университета (Россия, г. Уфа) 

Р.Б. Яруллин – д-р техн. наук, проф. Уфимского государственного университета экономики и сервиса (Россия, г. Уфа) 

Ответственный секретарь: А.А. Мухамадиев

Технический редактор: С.С. Некрасова

Подписка во всех отделениях связи: индекс 18064 в объединенном каталоге «Почта России», индекс 91824 в объединенном каталоге «Пресса России».

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-51448 от 19.10.2012 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

© Уфимский государственный университет экономики и сервиса, 2013

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

Тел.: +7 (347) 228-91-38.

Подписано в печать 19.09.2013 г. Формат 60×80 1/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,5. Тираж 1000 экз. Заказ № 110.

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

Материалы приводятся в авторской редакции.

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

# ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND SERVICE



№ 3, v. 9, 2013

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

## Founder:

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

The journal is included in "The list of reviewed scientific journals and editions for publication of the main scientific results of theses" (decision of the Highest certification commission presidium of March 2, 2012).

International standard serial number ISSN 1999-5458.

## Editorial board:


Editor-in-chief:


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


Deputy editor-in-chief:

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


## Members of an editorial board:

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


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

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


V.G. Krymsky – Dr.Sci.Tech., prof. of 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 Ufa state aviation technical university (Russia, Ufa) 

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


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

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

F.F. Hizbullin – Dr.Sci.Tech., prof. of 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 Ufa state petroleum technological university (Russia, Ufa) 

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

Assistant editor: A.A. Mukhamadiev

Technical editor: S.S. Nekrasova

Subscription is available in all post offices: Postal code 18064 in the integrated catalog of the "Russian Post",  
Postal code 91824 in the integrated catalog of the "Russian Press".

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

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

Mass media registration certificate PI № PHS 77-51448 from 19.10.2012 given by Federal service of supervision in the scope of communication, information technologies and mass media.

© Ufa State University of Economics and Service, 2013  
Publisher's address: 145 Chernishevskiy St., 145, Ufa, 450078.  
Ph.: +7 (347) 228-91-38.

Signed for printing 19.09.2013. Format 60×80  $\frac{1}{8}$ . Offset printing. 7,5 printed pages. Circulation is 1000 copies. Order №. 110.  
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>Зикий А.Н., Зламан П.Н., Власенко Д.В.</i> Фильтр на поверхностных акустических волнах .....	5
<i>Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е.</i> Математическая модель переходных тепловых процессов в бесконтактной магнитоэлектрической машине.....	8
<i>Николаев П.А., Николаев А.Д., Горшков Б.М.</i> Комплексная оценка соответствия требованиям ЭМС по уровню ЭМП модельных рядов автомобилей, оснащенных искровой батарейной системой зажигания.....	14
<i>Стыскин А.В., Уразбахтина Н.Г.</i> Принципы применения вентильных электродвигателей в установках погружных электроцентробежных насосов для нефтедобывающих скважин.....	19
<i>Татевосян А.А.</i> Синтез многоконтурной схемы замещения эластомеров.....	24
<i>Феоктистов Н.А., Варламов И.В., Феоктистов А.Н.</i> Система управления и автоматического регулирования режимов работы электролизно-водного генератора с применением микроЭВМ .....	31
<i>Хакимьянов М.И., Шафиков И.Н.</i> Анализ потребления электроэнергии при механизированной добыче нефти электроцентробежными насосами .....	37
<i>Шабанов В.А., Шарипова С.Ф.</i> Требования к частоте вращения магистральных насосов при частотно-регулируемом электроприводе .....	42
<i>Шапиро С.В., Исмагилов Ф.Р., Терезулов Т.Р., Полихач Е.А., Кузнецов А.Ю.</i> Каскадный бесконтактный четырехступенчатый генератор.....	47

## Информационные комплексы и системы

<i>Абдрахманова Г.И., Багманов В.Х.</i> Сверхширокополосная антенна на основе фрактальных структур.....	52
<i>Артюшенко В.М., Кучеров Б.А.</i> Повышение оперативности бесконфликтного управления группировкой космических аппаратов в условиях ресурсных ограничений.....	59
<i>Бакалов О.В., Чередниченко П.И., Бакалов В.Г.</i> Моделирование процессов получения полимерной пленки в плоскощелевой головке.....	66
<i>Будников А.Н.</i> Сравнительный анализ защищенности криптографических протоколов электронного голосования с массовым удаленным участием и DRE-систем.....	73
<i>Мешков И.К., Зайнуллин А.Р., Грахова Е.П., Кутлюяров Р.В.</i> Метод синтеза прогнозирующего фильтра на основе многомерной линейной экстраполяции для повышения эффективности беспроводных телекоммуникационных систем .....	76
<i>Осипов В.П., Сивакова Т.В., Судаков В.А., Трахтенгерц Э.А., Загреев Б.В.</i> Методологические основы поддержки принятия решений при планировании научно-прикладных исследований и экспериментов на международной космической станции (МКС) .....	80
<i>Рокка П., Чириков Р.Ю., Багманов В.Х.</i> Калибровка параметров генетического алгоритма для задач проектирования фазированных антенных решеток .....	89
<i>Романченко А.Ф., Мухамадиев А.А.</i> Формирование информационных характеристик первичных преобразователей с фильтрацией помех за счет организации преобразования сигнала .....	93
<i>Тугашова Л.Г.</i> Виртуальные анализаторы показателей качества процесса ректификации .....	97

## Нанoeлектроника и квантовые информационные системы

<i>Журавлева Н.А., Долматов М.Ю.</i> Информационная система оценки ресурсов молекул в межзвездной среде .....	104
<i>Долматов М.Ю., Шуткова С.А., Кавыев А.Г., Юсупов Э.А., Гордеев В.Н., Челноков Ю.В.</i> Особенности электропроводности и свойств аморфных полупроводников на основе асфальтенов .....	109
<b>Об авторах</b> .....	115

# CONTENT

## Electrical facilities and systems

<i>Zikiy A.N., Zlaman P.N., Vlasenko D.V.</i> Surface acoustic wave filter .....	5
<i>Ismagilov F.R., Khayrullin I.K., Vavilov V.E.</i> Model of transient thermal processes in non-contact magnetoelectric machine .....	8
<i>Nikolaev P.A., Nikolaev A.D., Gorskov B.M.</i> Comprehensive assessment of the compliance level of EMC EMH model series vehicles equipped with spark battery ignition system .....	14
<i>Styskin A.V., Urazbakhtina N.G.</i> The principles of use of synchronous motor with permanent magnets in installations of submersible electrocentrifugal pumps for oil production wells .....	19
<i>Tatevosyan A.A.</i> Synthes of multiple circuit replacement scheme of elastomers .....	24
<i>Feoktistov N.A., Varlamov I.V., Feoktistov A.N.</i> The control system and automatic control modes of electrolytic water generator using a micro-computer .....	31
<i>Hakimyanov M.I., Shafikov I.N.</i> Analysis of energy consumption of artificial lift using electric submersible pumps ...	37
<i>Shabanov V.A., Sharipova S.F.</i> Requirements to the speed of the pumps with frequency-adjustable electric drive .....	42
<i>Shapiro S.V., Ismagilov F.R., Teregulov T.R., Polihach E.A., Kuznetsov A.Yu.</i> Cascade uncontacted four-step generator .....	47

## Data processing facilities and systems

<i>Abdrakhmanova G.I., Bagmanov V.H.</i> Ultra-wideband antenna on the basis of fractal structures .....	52
<i>Artuschenko V.M., Kucherov B.A.</i> Increasing efficiency of conflict-free control for spacecraft constellation with resource restrictions .....	59
<i>Bakalov O.V., Cherednichenko P.I., Bakalov V.G.</i> Simulation process for producing polymer film in the flat-die .....	66
<i>Budnikov A.N.</i> Comparative secure analysis of cryptographic electronic voting protocols with mass remote participation and DRE systems .....	73
<i>Meshkov I.K., Zainullin A.R., Grahova E.P., Kutluyarov R.V.</i> Method of the synthesis prediction filter based on the multidimensional linear extrapolation to improve the efficiency of wireless telecommunication systems .....	76
<i>Osipov V.P., Sivakova T.V., Sudakov V.A., Trahtengerts E.A., Zagreev B.V.</i> Methodological base of support decision-making in the planning of scientific and applied research and experiments on the international space station (ISS) .....	81
<i>Rocca P., Chirikov R.Yu., Bagmanov V.H.</i> Calibration of the genetic algorithm parameters for phased antenna array design .....	89
<i>Romanchenko A.F., Mukhamadiev A.A.</i> Formation of information characteristics of primary converters with a filtration of hindrances at the expense of the organization of transformation of a signal .....	93
<i>Tugashova L.G.</i> Virtual analyzers indicators of the quality of the rectification process .....	97

## Nanoelectronics and quantum data systems

<i>Zhuravleva N.A., Dolomatov M.Yu.</i> Information system of an molecules resources in the interstellar environment assessment .....	104
<i>Dolomatov M.Yu., Shutkova S.A., Kaviev A.G., Yusupov E.A., Gordeev V.N., Chelnokov Yu.V.</i> Features of conductivity and properties of amorphous semiconductors on the base of asfaltenes .....	109
<b>About the authors</b> .....	115

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS



**Зикий А.Н.**  
**Zikiy A.N.**

*кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
Южного федерального  
университета,  
Россия, г. Таганрог*



**Зламан П.Н.**  
**Zlaman P.N.**

*ведущий инженер-конструктор  
Научно-конструкторского бюро  
моделирующих и управляющих  
систем Южного федерального  
университета,  
Россия, г. Таганрог*



**Власенко Д.В.**  
**Vlasenko D.V.**

*ассистент кафедры «Инфор-  
мационная безопасность теле-  
коммуникационных систем»  
Технологического института  
Южного федерального универ-  
ситета, Россия, г. Таганрог*

УДК 621.396.6

## ФИЛЬТР НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Представлены результаты экспериментального исследования фильтра на поверхностных акустических волнах дециметрового диапазона частот. Показано, что потери в полосе пропускания не превышают 6 дБ, максимальные потери в полосе заграждения составляют около 68 дБ (730–780 МГц), потери на второй гармонике основной частоты равны 21 дБ. Форма АЧХ существенно отличается от традиционной для СВЧ-фильтров на микрополосковых линиях, а именно: вблизи полосы пропускания сверху и снизу имеются полосы затухания. Кроме того, на участках 790–1530 и 1630–3850 МГц прослеживается явная тенденция к уменьшению потерь. Если использовать фильтр в части полосы пропускания от 1574 до 1579 МГц, то потери составят менее 3,4 дБ.

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

## SURFACE ACOUSTIC WAVE FILTER

The results of experimental research of SAW-filter for decimeter band are presented. It's shown that passband losses do not exceed 6 dB, maximal stopband loss is about 68 dB (at 730–780 MHz band), second harmonics loss is 21 dB. The response form of this filter is significantly different from traditional response form of microwave filters based on microstrip lines: these are two stopbands to left and right from passband. Moreover there is tendency of losses reduction at 790–1530 MHz band and 1630–3850 MHz band. Using of such filter will give losses less than 3,4 dB on 1574–1579 MHz band.

*Key words:* SAWfilter, amplitude-frequency characteristic, experiment.

В настоящее время имеется обширная литература, посвященная синтезу и анализу фильтров на ПАВ, их конструированию и изготовлению [1–8].

Однако в перечисленной литературе совершенно недостаточно сведений для выбора фильтра применительно к конкретной разработке. Более полные сведения содержатся в [9], однако и в них часто не указывают заграждение на второй, третьей и других гармониках полезного сигнала. Поэтому экспериментальное исследование серийных фильтров является актуальным.

В качестве объекта исследования выбран

фильтр марки TFS1575SD для работы на частоте 1575 МГц. Эта частота широко используется в GPS-навигации, поэтому результаты такого исследования представляют несомненный интерес.

Для испытаний фильтра на ПАВ был изготовлен макет, фото которого представлено на рисунке 1. Из этого рисунка видно, что макет представляет собой печатную плату из фольгированного стеклотекстолита размером 30 x 30 x 1 мм. На плате установлены три разных фильтра и два соединителя типа SMA, гнездо. Фильтр на ПАВ на рисунке верхний.

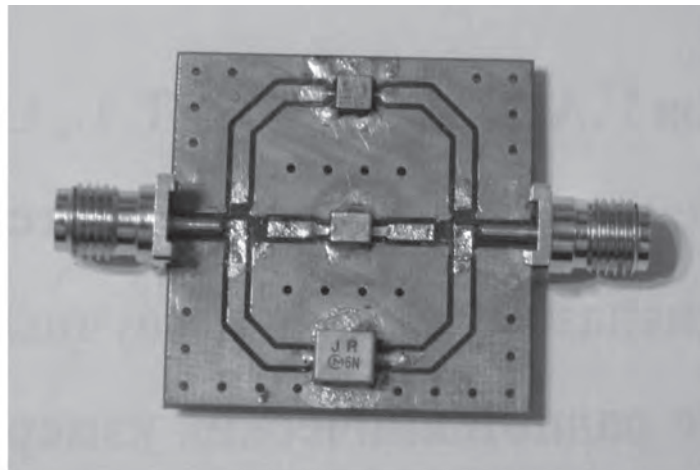


Рис. 1. Фото фильтров

Экспериментальное исследование АЧХ фильтра проводилось на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 2. Из этого рисунка видно, что в качестве источника сигналов исполь-

зован генератор сигналов ВЧ типа E8267D фирмы AgilentTechnologies [10]. В качестве измерителя уровня выходного сигнала использован анализатор спектра 8564EC той же фирмы.



Рис. 2. Структурная схема измерительной установки

В первом эксперименте измерение АЧХ проводилось по точкам в диапазоне 430–1700 МГц с шагом 10 МГц. Результаты этого эксперимента отображены на рисунке 3.

Во втором эксперименте измерение АЧХ проводилось по точкам в диапазоне 1560–1589 МГц с шагом 1 МГц. Результаты второго эксперимента показаны на рисунке 4.

В третьем эксперименте проводилось измерение уровня заграждения на второй гармонике основной частоты  $2f_0 = 3150$  МГц.

*Выводы:*

1. Потери в полосе пропускания  $1575 \pm 10$  МГц не превышают 5 дБ, причем в эти потери включены потери двух кабелей.
2. АЧХ фильтра существенно несимметрична.
3. Заграждение при отстройке на  $\pm 100$  МГц не превышает 30 дБ.
4. Заграждение на частоте  $2f_0 = 3150$  МГц составляет 21 дБ.

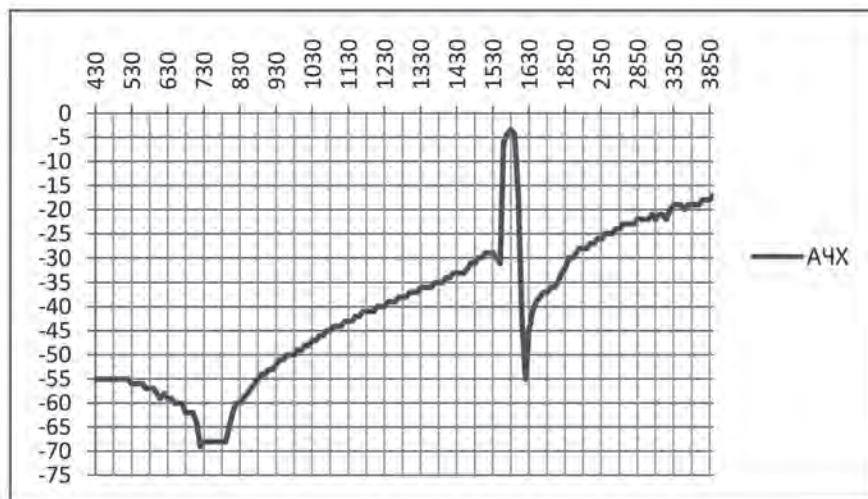


Рис. 3. АЧХ ПАВ фильтра

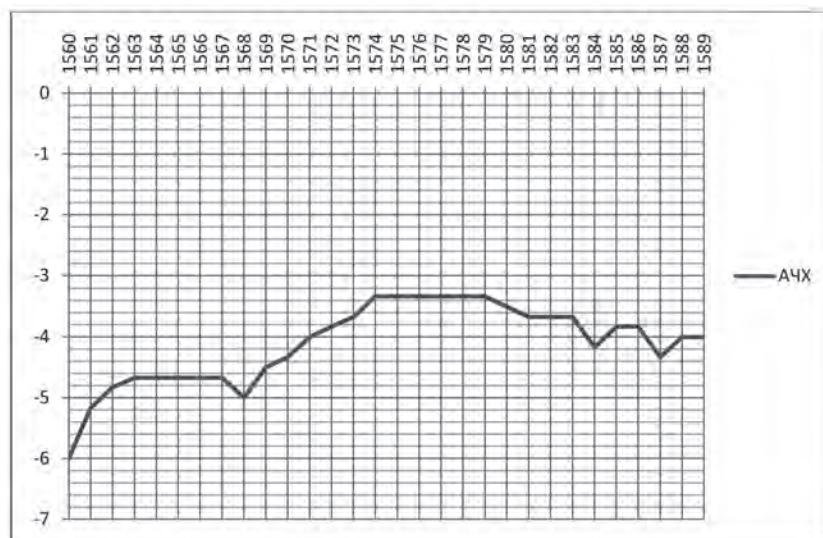


Рис. 4. Вершина АЧХ ПАВ фильтра

#### Список литературы

1. Орлов В.С. Фильтры на ПАВ [Текст] / В.С. Орлов, В.С. Бондаренко. – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.
2. Морган Д. Устройства обработки сигналов на ПАВ [Текст] / Д. Морган; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990. – 416 с.
3. Фильтры на ПАВ. Расчет, технология применения [Текст] / под ред. Г. Мэттьюза; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1981. – 472 с.
4. Мостяев В.А. Российская пьезо-акустоэлектроника. История развития и современное состояние [Текст] / В.А. Мостяев, П.Г. Поздняков. – М.: Радиотехника, 2008. – 328 с.
5. Речицкий В.И. Акустоэлектронные радиокомпоненты [Текст] / В.И. Речицкий. – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.
6. Речицкий В.И. Радиоконпоненты на ПАВ [Текст] / В.И. Речицкий. – М.: Радио и связь, 1984. – 112 с.
7. Речицкий В.И. Акустоэлектронные радиокомпоненты. Схемы, топология, конструкция [Текст] / В.И. Речицкий. – М.: Радио и связь, 1987. – 192 с.
8. Зеленка И. Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах: материалы, технология, конструкция, применение [Текст] / И. Зеленка; пер. с чешского. – М.: Мир, 1990. – 594 с.
9. TFS1575D. Filter specification. Version 1.1 [Text]. – 08.11.2005. – 5 p.
10. Румянцев К.Е. Экспериментальное исследование генератора на поверхностных акустических волнах [Текст] / К.Е. Румянцев, А.Н. Зикий, П.Н. Зламан, С.Э. Додаев, М.Н. Шипулин // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2011. – Т. 7. – № 4. – С. 34–35.





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

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа



**Хайруллин И.Х.**  
**Khayrullin I.K.**

доктор технических наук, профессор кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа



**Вавилов В.Е.**  
**Vavilov V.E.**

ассистент кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа

УДК 621.313

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В БЕСКОНТАКТНОЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЕ

Статья посвящена разработке математической модели переходных и установившихся тепловых процессов в бесконтактных магнитоэлектрических машинах с высококоэрцитивными постоянными магнитами (БММ с ВПМ). Представлены результаты численного и компьютерного моделирования в программном комплексе *Matlab* БММ с ВПМ марки *NdFeB* мощностью 80 кВт с номинальной частотой вращения ротора 24000 об/мин. На основе результатов моделирования проведены исследования зависимости потерь в обмотках и железе статора от частоты вращения ротора. Разработан алгоритм теплового расчета БММ с ВПМ.

Полученные математическая модель и алгоритм теплового расчета могут быть использованы на практике при проектировании и исследованиях бесконтактных магнитоэлектрических машин с высококоэрцитивными постоянными магнитами.

*Ключевые слова:* бесконтактные магнитоэлектрические машины, высококоэрцитивные постоянные магниты, установившиеся и переходные тепловые процессы.

## MODEL OF TRANSIENT THERMAL PROCESSES IN NON-CONTACT MAGNETOELECTRIC MACHINE

The article is devoted to the development of mathematical models of transient and steady-state thermal processes in a non-contact magneto-electric machines with high-coercivity permanent magnets (NMEM from HCMP). The results of numerical and computer modeling in Matlab software package NMEM from HCMP brand NdFeB power of 80 kW and a nominal rotor speed of 24,000 rev / min. Based on simulation results according to the study conducted losses in the windings of the stator iron and the rotational speed of the rotor. The algorithm for calculating the thermal NMEM from HCMP.

The resulting mathematical model and algorithm for calculating the heat can be used in practice in the design and research of non-contact magneto-electric machines with high-coercivity permanent magnets.

*Key words:* non-contact magneto-electric machines, high-coercivity permanent magnets, steady and transient thermal processes.

Бесконтактные магнитоэлектрические машины (БММ) с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ВПМ) благодаря своим преимуществам перед другими типами электрических машин, таким как пониженные массогабаритные показатели и отсутствие затрат энергии на возбуждение, находят все более широкое применение на практике в качестве одного из основных узлов электротехнических комплексов, например, генераторы с ВПМ в системе электроснабжения или исполнительные двигатели в электроприводе летательных аппаратов [1]. Ответственное назначение БММ с ВПМ выдвигает проблему повышения точности методологии ее проектирования. Одним из этапов решения данной проблемы является повышение точности теплового расчета БММ.

Традиционные методы теплового расчета электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ), основанные на методах замены реальной

системы эквивалентной ей тепловой схемой, не отражают в полной мере процессы теплопередачи в ЭМПЭ и подходят только для анализа их установившегося режима работы [2]. В работе [3] авторами предложен метод теплового расчета ЭМПЭ с учетом нестационарных, переходных тепловых процессов, что, несомненно, повышает точность проектных расчетов ЭМПЭ. Однако в [3] разработанные модели представлены для ЭМПЭ электромагнитного возбуждения, что в значительной степени ограничивает их применение для БММ. В связи с этим важной задачей является разработка математической модели, описывающей переходные и установившиеся тепловые процессы в бесконтактных магнитоэлектрических машинах и исследования с помощью ее особенностей данных процессов в БММ.

Для решения данной задачи рассматривается расчетная схема БММ, рисунок 1.

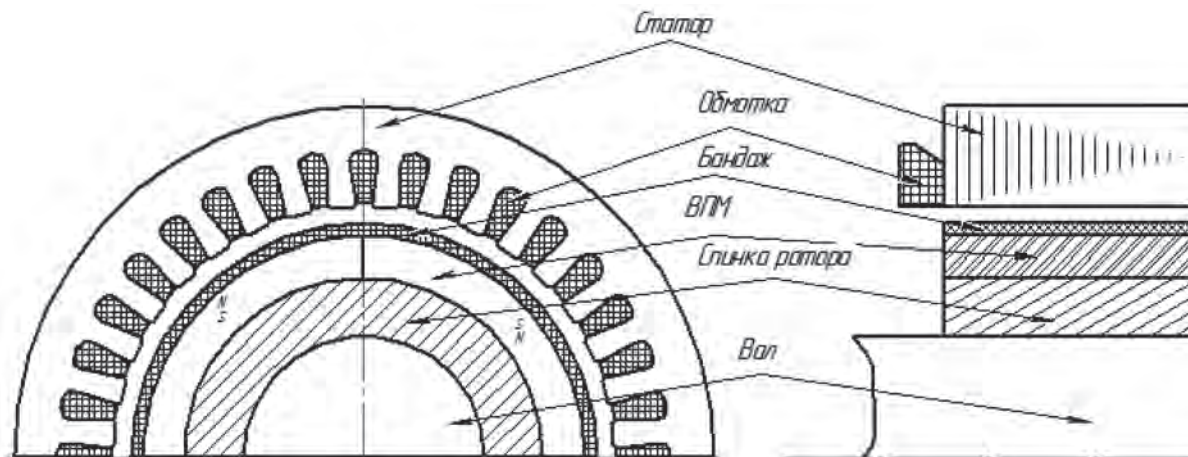


Рис. 1. Расчетная схема БММ

При этом вводятся следующие допущения:

- статор БММ обладает только внутренним тепловым сопротивлением;
- между обмотками статора и его железом, бандажом и ВПМ, ВПМ и спинкой ротора, валом и спинкой ротора циркулирует воздух;
- аэродинамические потери ротора ввиду малости не учитываются;
- температура окружающей среды постоянна.

С учетом вышеизложенных допущений можно сказать, что основные тепловыделения в БММ создаются токами, протекающими в обмотке, и потерями в железе статора.

Теплообмен между обмоткой и железом статора описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} P_1 &= c_1 m_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial t} + \alpha_1 S_1 (\Theta_1 - T) \\ P_2 &= c_2 m_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial t} + \alpha_2 S_1 (\Theta_2 - T) \\ S_1 (\alpha_1 \Theta_1 + \alpha_2 \Theta_2 - \alpha_2 T - \alpha_1 T) &= 2c_0 Q_0 T, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $P_1, P_2$  – потери в железе статора и обмотки соответственно;  $\Theta_1, \Theta_2$  – температура железа статора и обмотки;  $T$  – температура окружающей среды;  $S_1$  – площадь сопряженных граней;  $c_1, c_2, c_0$  – удельная теплоемкость железа статора, обмотки и воздуха соответственно;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициент теплопередачи железа статора и обмотки соответственно;  $m_1, m_2$  – масса железа статора и обмотки соответственно;  $t$  – время.

Потери в железе статора принимаются [4]:

$$P_1 = k_m P_{уд} B^2 m_1 \left( \frac{f}{f_{пр}} \right)^{1.3}, \quad (2)$$

где  $P_{уд}$  – удельные потери в железе статора;  $f$  – частота тока;  $B(t)$  – индукция в железе статора;  $k_m$  – коэффициент использования магнитного потока;  $f_{пр}$  – частота перемагничивания.

Известно, что удельные потери в железе статора складываются из потерь на вихревые токи ( $P_{вх}$ ) и гистерезис ( $P_{г}$ ):

$$P_{уд} = P_{вх} + P_{г}. \quad (3)$$

Удельные потери на гистерезис могут быть определены в виде [5]:

$$P_{г} = \frac{2fS_f B^2}{\mu}, \text{ при } \xi \leq 1, \quad (4)$$

$$P_{г} = \frac{\sqrt{\pi} f^{1.5} (t) S_f B^2 a}{\sqrt{\mu\rho}}, \text{ при } \xi > 1, \quad (5)$$

где  $a$  – толщина листа стали;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление стали;  $\mu$  – магнитная проницаемость стали;  $S_f$  – коэффициент формы петли гистерезиса;  $\xi = a / \left( \frac{1}{k_r} \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \right)$  – параметр, характеризующий уменьшение потерь в железе статора;  $k_r$  – коэффициент уменьшения глубины проникновения магнитного потока.

Удельные потери на вихревые токи:

$$P_{вх} = \frac{\pi^2 f^2 a B^2}{6\rho}, \text{ при } \xi \leq 1, \quad (6)$$

$$P_{г} = \frac{\sqrt{\pi} f^{1.5} B^2 a}{2k_r \sqrt{\mu\rho}}, \text{ при } \xi > 1. \quad (7)$$

Потери в обмотке определяются известным выражением:

$$P_2 = m_{\phi} i_{\phi}^2 \frac{w \cdot l_{cp}}{S_c} \cdot \left( 1 + 0,004 \cdot \left( \frac{\partial \Theta_1}{\partial t} - 20 \right) \right) \cdot \gamma_a, \quad (8)$$

где  $m_{\phi}$  – число фаз;  $i_{\phi}$  – фазный ток;  $w$  – число проводников в фазе;  $l_{cp}$  – средняя длина витка;  $S_c$  – площадь поперечного сечения обмотки;  $\gamma_a$  – температурный коэффициент сопротивления материала обмотки.

Анализ выражений (2), (8) с учетом того, что в отличие от ЭМПЭ электромагнитного возбуждения в БММ с ВПМ при запуске, в железе статора индуцируется значительный магнитный поток, слабо зависящий от величины тока и обусловленный характеристиками ВПМ, позволяет, в первом приближении, предположить, что в момент пуска и разгона БММ до номинальной частоты вращения потери в железе статора будут превышать потери в обмотке.

Для проверки этого авторами были проведены расчеты, при которых рассматривался момент пуска БММ. При этом принималось, что номинальная скорость вращения составляет 24000 об/мин, толщина листа стали 0,2 мм, марка стали 2214, мощность 80 кВт, индукция в зубцах статора, обусловленная характеристиками ВПМ, составляет 1,6 Тл. Для учета переходных процессов и пусковых токов было проведено компьютерное моделирование пуска БММ в пакете *MatlabSimulink*. В результате чего была получена осциллограмма тока при пуске БММ, рисунок 2.

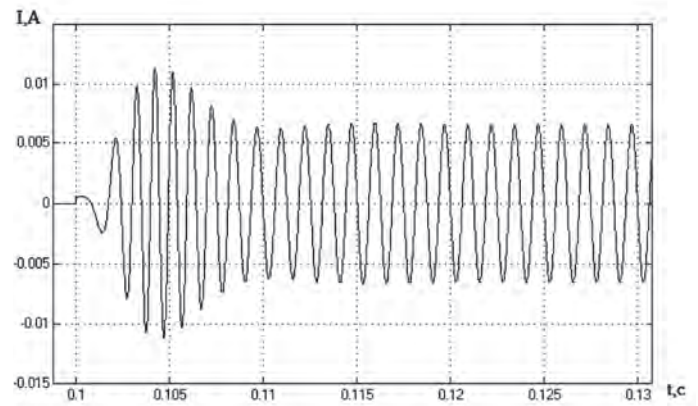


Рис. 2. Осциллограмма тока в обмотках БММ в момент пуска

Анализ полученной осциллограммы показал, что в момент пуска (0,103 с) ток в обмотках резко увеличивается, а следовательно увеличиваются потери в обмотке, после чего он снижается в 2 раза (0,108 с) и постепенно нарастает до установившегося значения 200 А (на осциллограмме не показано).

Другими словами, при пуске БММ преобладают потери в обмотке, обусловленные пусковыми токами.

Тепловое взаимодействие между статором и бандажом ротора определяется аналогичной (1) системой уравнений:

$$P_1 = c_1 m_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial t} + \alpha_1 S_2 (\Theta_1 - T)$$

$$\text{при } P_1 > P_2, \quad c_3 m_3 \frac{\partial \Theta_3}{\partial t} = -\alpha_3 S_2 (\Theta_3 - T) \quad (9)$$

$$S_2 (\alpha_1 \Theta_1 + \alpha_3 \Theta_3 - \alpha_3 T - \alpha_1 T) = 2c_0 Q_0 T,$$

$$P_2 = c_2 m_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial t} + \alpha_2 S_2 (\Theta_1 - T)$$

$$\text{при } P_1 < P_2, \quad c_3 m_3 \frac{\partial \Theta_3}{\partial t} = -\alpha_3 S_2 (\Theta_3 - T) \quad (10)$$

$$S_2 (\alpha_2 \Theta_2 + \alpha_3 \Theta_3 - \alpha_3 T - \alpha_2 T) = 2c_0 Q_0 T,$$

где  $\Theta_3$  – температура бандажа;  $m_3$  – масса бандажа;  $S_2$  – площадь сопряженных граней;  $c_3$  – удельная теплоемкость бандажа;  $\alpha_3$  – коэффициент теплопередачи бандажа.

Системы уравнений (9), (10) показывают, что нагрев бандажа может быть обусловлен как потерями в железе статора, так и в обмотке. В выражениях (9), (10) предполагается, что непосредственно в бандаже ротора отсутствуют внутренние потери, что характерно для пусковых и номинальных режимов работы БММ, но при режиме внезапного короткого замыкания, если бандаж БММ выполнен из электропроводящего материала, в нем проявляются потери, создаваемые аperiодической составляющей тока статора. В этом случае выражение (10) принимается в следующем виде:

$$\begin{aligned} P_2 &= c_2 m_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial t} + \alpha_2 S_2 (\Theta_1 - T) \\ c_3 m_3 \frac{\partial \Theta_3}{\partial t} &= P_3 - \alpha_3 S_2 (\Theta_3 - T) \\ S_2 (\alpha_2 \Theta_2 + \alpha_3 \Theta_3 - \alpha_3 T - \alpha_2 T) &= 2c_0 Q_0 T. \end{aligned} \quad (11)$$

Потери в бандаже, в данном случае, определяются по выражениям, представленным в работах [6, 7, 8, 9].

Тепловое взаимодействие ВПМ и бандажа ротора описывается аналогичными выражениями:

$$\begin{aligned} c_3 m_3 \frac{\partial \Theta_3}{\partial t} &= -\alpha_3 S_2 (\Theta_3 - T) \\ c_4 m_4 \frac{\partial \Theta_4}{\partial t} &= -\alpha_4 S_3 (\Theta_4 - T) \\ S_3 (\alpha_4 \Theta_4 + \alpha_3 \Theta_3 - \alpha_3 T - \alpha_4 T) &= 2c_0 Q_0 T, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\Theta_4$  – температура магнитов;  $m_4$  – масса магнитов;  $S_3$  – площадь сопряженных граней ВПМ – бандаж;  $c_4$  – удельная теплоемкость ВПМ;  $\alpha_3$  – температуропроводность ВПМ.

Взаимодействие ВПМ – спинка ротора:

$$\begin{aligned} c_5 m_5 \frac{\partial \Theta_5}{\partial t} &= P_4 - \alpha_5 S_4 (\Theta_5 - T) \\ c_4 m_4 \frac{\partial \Theta_4}{\partial t} &= -\alpha_4 S_3 (\Theta_4 - T) \\ S_4 (\alpha_4 \Theta_4 + \alpha_5 \Theta_5 - \alpha_5 T - \alpha_4 T) &= 2c_0 Q_0 T, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $m_5$  – масса железа спинки ротора.

Часть данных потерь отводится через вал БММ с ВПМ, в том случае если его температура меньше температуры спинки ротора, и приводит к нагреву подшипников, и как следствие этого происходит изменение кинематической вязкости смазывающего материала в их зазоре, а часть направлена на нагрев ВПМ. Таким образом, нагрев ВПМ осуществляется и со стороны статора, и со стороны спинки ротора.

В связи с незначительной максимальной рабочей температурой современных ВПМ, до 200 °C *NdFeB* и до 350 °C *SmCo*, и возможными потерями в спинке ротора, рекомендуется при сочленении ВПМ и ротора наносить на ВПМ теплоизоляционное покрытие или изоляционные прокладки для защиты ВПМ от перегрева, а также исключить возможности микроколебаний ВПМ относительно спинки ротора.

Взаимодействие спинки ротора и вала по физической природе близко к рассмотренному выше взаимодействию статор – бандаж и отличается тем, что температура вала, получаемая им от привода БММ, может быть больше температуры спинки ротора, кроме того, к температуре, передаваемой от приводного механизма, добавляются потери, обусловленные трением подшипниковых узлов. Тогда описание данного взаимодействия принимается в виде:

$$\begin{aligned} c_5 m_5 \frac{\partial \Theta_5}{\partial t} &= P_4 - \alpha_5 S_5 (\Theta_5 - T) \\ c_6 m_6 \frac{\partial \Theta_6}{\partial t} &= P_5 - \alpha_6 S_5 (\Theta_6 - T) \\ S_5 (\alpha_6 \Theta_6 + \alpha_5 \Theta_5 - \alpha_5 T - \alpha_6 T) &= 2c_0 Q_0 T, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\Theta_6$  – температура вала;  $m_6$  – масса вала;  $S_5$  – площадь сопряженных граней спинка ротора – вал БММ;  $c_6$  – удельная теплоемкость вала;  $\alpha_4$  – коэффициент теплопередачи вала;  $P_5$  – потери, обусловленные трением в подшипниках.

При превышении температуры вала БММ над температурой железа статора и обмоток тепловые потоки будут направлены не от статора к валу, а от вала к статору и будут способствовать увеличению температуры и обмоток, и ВПМ. В связи с этим рекомендуется в БММ использовать дополнительное охлаждение вала, а также минимизировать потери на трение, что может быть достигнуто применением магнитных подшипников [10, 11].

Таким образом, совокупность выражений (1–14) является математической моделью переходных и установившихся тепловых процессов в БММ с ВПМ. Решение данных уравнений аналитически является весьма затруднительным и решается численными методами. Например, как было показано авторами в работе [12], для решения подобных уравнений может использоваться программный пакет *MatlabSimulink*.

Разработанная математическая модель позволяет создать алгоритм расчета температурного распределения БММ с ВПМ при различных режимах работы и является основой для создания инженерной методики расчета тепловых нагрузок БММ с ВПМ. Алгоритм расчета представлен на рисунке 3.

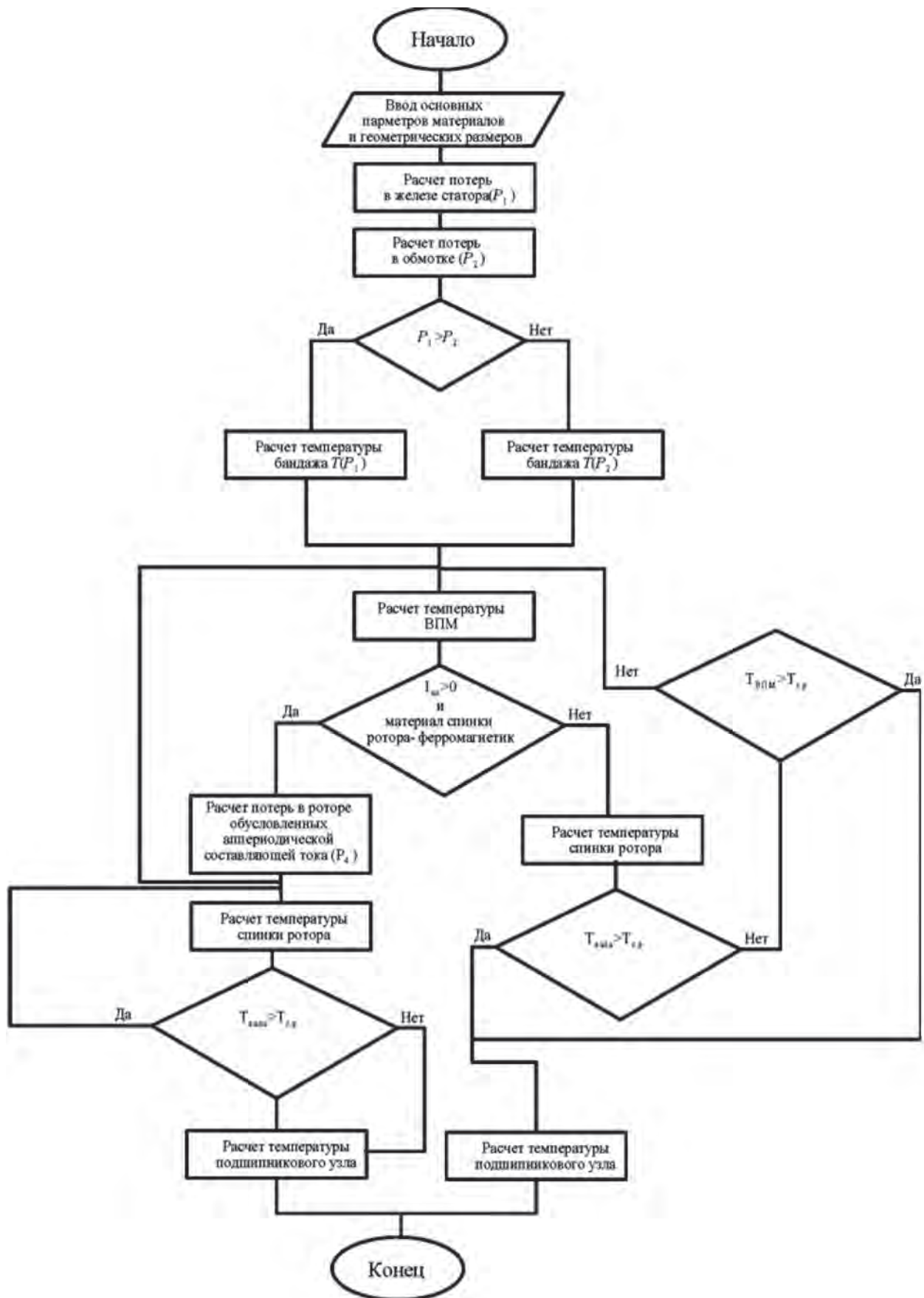


Рис. 3. Алгоритм тепловых расчетов БММ с ВПМ

Таким образом, в статье разработана математическая модель, описывающая переходные тепловые процессы в бесконтактных магнитоэлектрических машинах с высококоэрцитивными постоянными магнитами, разработан алгоритм инженерных тепловых расчетов и даны практические рекомендации по конструкции подобных машин.

Полученные результаты могут быть использованы на практике при проектировании бесконтактных магнитоэлектрических машин с высококоэрцитивными постоянными магнитами.

#### Список литературы

1. Moore M.J. Micro-turbine generators [Text] / M.J. Moore. – Professional Engineering. Printed in the USA. – 2002. – 113 p.
2. Сипайлов Г.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах: Учеб. для вузов по спец. «Электромеханика» [Текст] / Г.А. Сипайлов, Д.И. Сальников, В.А. Жадан. – М.: Высшая школа, 1989. – 238 с.
3. Гуревич Э.И. Переходные тепловые процессы в электрических машинах [Текст] / Э.И. Гуревич, Ю.Л. Рыбин. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 216 с.
4. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: учеб. пособие для студентов вузов [Текст] / В.А. Балагуров. – М.: Высш. школа, 1982. – 272 с.
5. Насытная Е.П. Подход к расчету удельных потерь в электротехнических сталях [Текст] / Е.П. Насытная // Труды Одесского политехнического университета. Сер. «Энергетика. Теплотехника. Электротехника». – 2010. – 1 (33). – 2 (34). – С. 116–123.
6. Хайруллин И.Х. К расчету в тонких пластинках с учетом реакции вихревых токов [Текст] / И.Х. Хайруллин // Труды УАИ. Выпуск 35. – 1973. – С. 129–133.
7. Хайруллин И.Х. К расчету магнитного числа Рейнольдса [Текст] / И.Х. Хайруллин // Труды УАИ. Выпуск 35. – 1973. – С. 134–139.
8. Вавилов В.Е. Потери энергии в гибридных магнитных подшипниках [Текст] / В.Е. Вавилов, А.М. Веселов, И.Д. Никонов // Современные инновации в науке и технике: материалы 3-й Международной научно-практической конференции (17 апреля 2013 года) / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск. – 2013. – С. 200–203.
9. Хайруллин И.Х. Определение сил гибридного магнитного подшипника для высокоскоростных шпинделей [Текст] / И.Х. Хайруллин, Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16. – № 1 (46). – С. 70–73.
10. Хайруллин И.Х. Определение влияния статического эксцентриситета на устойчивость гибридного магнитного подшипника [Текст] / И.Х. Хайруллин, Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16. – № 1 (46). – С. 147–149.
11. Герасин А.А. Имитационная модель электромеханических преобразователей энергии с учетом процессов в подшипниковых опорах [Текст] / А.А. Герасин, Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, М.М. Зюков, В.Е. Вавилов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2013. – № 2. – С. 35–39.
12. Герасин А.А. Математическая модель системы электромагнитного управления гибридным магнитным подшипником [Текст] / А.А. Герасин, Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов // Вестник машиностроения. – 2013. – № 1. – С. 30–34.



**Николаев П.А.**  
**Nikolaev P.A.**

кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор ОАО «АВТОВАЗ», Поволжского государственного университета сервиса, Россия, г. Тольятти



**Николаев А.Д.**  
**Nikolaev A.D.**

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Автомобильное электрооборудование и электро-механика» Тольяттинского государственного университета, Россия, г. Тольятти



**Горшков Б.М.**  
**Gorskov B.M.**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сервис технических и технологических систем» Поволжского государственного университета сервиса, Россия, г. Тольятти

УДК 629.33

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ ТРЕБОВАНИЯМ ЭМС ПО УРОВНЮ ЭМП МОДЕЛЬНЫХ РЯДОВ АВТОМОБИЛЕЙ, ОСНАЩЕННЫХ ИСКРОВОЙ БАТАРЕЙНОЙ СИСТЕМОЙ ЗАЖИГАНИЯ

Рассмотрены вопросы комплексной оценки соответствия требованиям ЭМС эксплуатируемых автомобилей. Получена математическая модель, позволяющая дать комплексную оценку соответствия требованиям ЭМС по уровню ЭМП модельных рядов автомобилей, оснащенных искровой батарейной системой зажигания. Разработан алгоритм, позволяющий оценить по ограниченной выборке правильность выбранных применительно к подавлению разрядных помех от системы зажигания решений, а также соблюдения заложенных в производство технологий.

*Ключевые слова:* автомобиль, электромагнитная совместимость (ЭМС), система зажигания, электромагнитные помехи (ЭМП).

## COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE COMPLIANCE LEVEL OF EMC EMH MODEL SERIES VEHICLES EQUIPPED WITH SPARK BATTERY IGNITION SYSTEM

Questions of a complex assessment the compliance to requirements EMC operated cars are considered. The mathematical model, allowing to give a complex assessment the compliance to requirements EMC on the EMH level of model ranges of the cars equipped with spark battery system of ignition is received. The algorithm, allowing to estimate on limited selection correctness of the digit hindrances chosen in relation to suppression from system of ignition of decisions, and also observance of the technologies put in production is developed.

*Key words:* car, electromagnetic compatibility (EMC), ignition system, electromagnetic hindrances (EMH).

Проблема анализа соответствия партии автомобилей с искровой батарейной системой зажигания (ИБСЗ), выпущенных за определенный период времени, предельно допустимым нормам по уровню излучаемых ими электромагнитных помех и определения количества образцов в большой партии, не соответствующих требованиям, до сих пор

не закрыта. Основные причины этого – невозможность из-за технических и экономических факторов проведения массового контроля и отсутствие математической модели, позволяющей производить необходимые расчеты по результатам измерений ограниченных выборок.

В настоящее время на практике, применительно-

но к электромагнитной совместимости (ЭМС), используются методы на основе биномиального и нецентрального  $t$ -распределений [1]. С их помощью по результатам исследования ограниченной выборки определяется соответствие всей партии. Однако данные методы не направлены на определение количества автотранспортных средств, у которых амплитуда напряженности ЭМП не соответствует предельно допустимому уровню.

Для решения указанной проблемы предлагается применить математическую модель, позволяющую по результатам ограниченной выборки определить доверительное число автомобилей с ИБСЗ из всей партии, не соответствующих требованиям по излучаемым электромагнитным помехам. Она базируется на разбиении некоторого диапазона частот  $\Delta F = f_{max} - f_{min}$ , на  $D$  областей  $\Delta f_i$ . Для каждой  $\Delta f_i$  выдвигается гипотеза превышения в ней предельно допустимого уровня и исследуются вероятностные законы распределения амплитуд напряженности ЭМП. Выбор диапазона  $\Delta F$  производится по результатам экспериментальных исследований выборки автомобилей, где уровень ЭМП имеет наибольшие значения, а также ожидается его превышение с наибольшей вероятностью.

Такой подход оправдан в силу того, что проведение анализа по непрерывным спектральным характеристикам электромагнитных помех не представляется возможным, так как они не взаимосвязаны между собой. Точность оценки по математической модели зависит от двух факторов: количества автомобилей и числа областей.

Как показывает практический опыт, за год оценка соответствующей модели ведется по числу экземпляров, не превышающих 10–20, тогда как их выпуск за соответствующий период времени может достигать несколько сотен тысяч. Видно, что первый фактор очень ограничен. В то время как второй зависит от технических характеристик измерительной системы и точность по нему может быть увеличена.

Максимум при определенной выборке автомобилей достигается при условии  $\lim_{D \rightarrow \infty} \Delta f_i = 0$ , т. е. нахождение условных вероятностей происходит на каждой частоте диапазона  $\Delta F$ . На практике  $\Delta f_i$  достаточно принять равной полосе пропускания измерительного приемника  $B$  Гц, или, если измерительный прибор, производящий цифровую обработку результатов измерений, выдает фиксированное на заданном диапазоне  $\Delta F$  число значений  $D$  (например, у ROUNDE & SCHWARZ ESPI  $M = 10000$ ), то можно положить число областей равное  $D$ .

По экспериментальным данным находятся за-

коны распределения амплитуды напряженности ЭМП  $f_{CB}(E_{\Delta f_i})$  и определяются числовые характеристики в каждом  $\Delta f_i$ . Вероятность несоответствия предельно допустимому уровню  $E_{np, \Delta f_i}$  в области  $\Delta f_i$  будет определяться выражением

$$P(E_{np, \Delta f_i} \leq E_{\Delta f_i}) = \int_{E_{np, \Delta f_i}}^{\infty} f_{CB}(E_{\Delta f_i}) dE. \quad (1)$$

Воспользовавшись формулой полной вероятности, найдем вероятность несоответствия отдельного автомобиля по уровню излучаемых электромагнитных помех

$$P(E_{np} \leq E) = \sum_{i=1}^D P(\Delta f_i) \times P(E_{np, \Delta f_i} \leq E_{\Delta f_i}), \quad (2)$$

где  $P(\Delta f_i)$  – вероятность того, что превышение будет именно в диапазоне  $\Delta f_i$ .

Очевидна равномерность событий  $P(\Delta f_1), P(\Delta f_2) \dots P(\Delta f_D) = 1/D$  потому, что превышение предельно допустимого уровня может произойти в любом диапазоне  $\Delta f_i$ . В этом случае (2) запишется в следующем виде

$$P(E_{np} \leq E) = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^D P(E_{np, \Delta f_i} \leq E_{\Delta f_i}). \quad (3)$$

Для определения среднего количества несоответствующих нормам автомобилей  $X$  в партии  $N$ , отобранной по определенному критерию (например, выпуск одной модели за год), адекватно применение биномиального распределения случайной величины (схема Бернулли). В этом случае

$$M[X] = N \times P(E_{np} \leq E). \quad (4)$$

Наиболее вероятный диапазон несоответствующих нормам автомобилей  $X$  в рассматриваемой партии  $N$  имеет границы:

$$\begin{aligned} \min X &= N \times P(E_{np} \leq E) - 3\sigma[X]; \\ \max X &= N \times P(E_{np} \leq E) + 3\sigma[X], \end{aligned}$$

$$\text{где } \sigma[X] = \sqrt{N \times P(E_{np} \leq E) \times [1 - P(E_{np} \leq E)]}. \quad (5)$$

На практике статистика набирается по ограниченному количеству автомобилей одной модели, число которых не превышает 50, поэтому для нахождения аналитических законов адекватно применение критерия Колмогорова – Смирнова для уровня значимости  $\alpha_s = 0,05$ . Анализ результатов испытаний 30 автомобилей каждого из семейств «Приора», «Калина», «Самара-2» и «Нива», имеющих пробег (ресурс)  $S$  не более 1000 км, показал, что распределение напряженности ЭМП в любом диапазоне  $\Delta f_i$  подчиняется Гауссову закону.

В этом случае для фиксированного ресурса (3) примет вид

$$P(E_{np} \leq E) \Big|_{S=S_i} = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^D \frac{1}{\sigma_{E_{\Delta f_i}} \sqrt{2\pi}} \int_{E_{np, \Delta f_i}}^{\infty} \exp \left[ -\frac{(E - m_{E_{\Delta f_i}})^2}{2\sigma_{E_{\Delta f_i}}^2} \right] dE. \quad (6)$$



По результатам ресурсных испытаний набирается статистика при различных фиксированных значениях пробега  $S_i$ . При каждом  $S_i$  вычисляется  $P(E_{np} \leq E) = P(S_i)$ .

Согласно [2], зная закон распределения  $f_{CB}(E_{\Delta f_i})$ , можно производить оценку автомобилей по ограниченной выборке, поступивших на испытания с количеством образцов не более 15. Исходя из этого и используя полученное выражение, были вычисле-

ны полные вероятности несоответствия предельно допустимому уровню напряженности ЭМП автомобилей с ИБСЗ четырех моделей производства ОАО «АВТОВАЗ» для диапазона частот  $\Delta F \in [30; 100]$  МГц. Данные сведены в таблицу 1, а результаты экспериментальных измерений ( $l_A = 3$  м,  $h_A = 1,8$  м, квазипиковый детектор) для автомобилей семейства «Приора» приведены на рис. 1–3.

Таблица 1

**Полные вероятности несоответствия нормам автомобилей**

Пробег $S_i$ , км	Полная вероятность, $P(E_{np} \leq E) = P(S_i)$			
	«Приора» (10 автомобилей)	«Калина» (10 автомобилей)	«Самара-2» (10 автомобилей)	«Нива» (10 автомобилей)
$\leq 1000$	$3,49 \times 10^{-6}$	$3,57 \times 10^{-6}$	$2,81 \times 10^{-6}$	$8,72 \times 10^{-5}$
[50; 60]	$6,56 \times 10^{-4}$	$6,96 \times 10^{-4}$	$4,63 \times 10^{-4}$	$7,88 \times 10^{-3}$
[100; 130]	$8,73 \times 10^{-3}$	$7,31 \times 10^{-3}$	$6,18 \times 10^{-3}$	$1,45 \times 10^{-2}$

Если для случая  $S \leq 1000$  км сравнить полные вероятности несоответствия нормам автомобилей исследуемых моделей, одна из которых найдена по выборке в 10 шт., а другая – по 30 шт. (таблица 2), то видно, что полученные значения имеют один по-

рядок. Их отличие составляет 15 %. Приведенная цифра говорит об адекватности применения математической модели для анализа больших партий автомобилей с ИБСЗ по ограниченной выборке с приемлемой точностью.

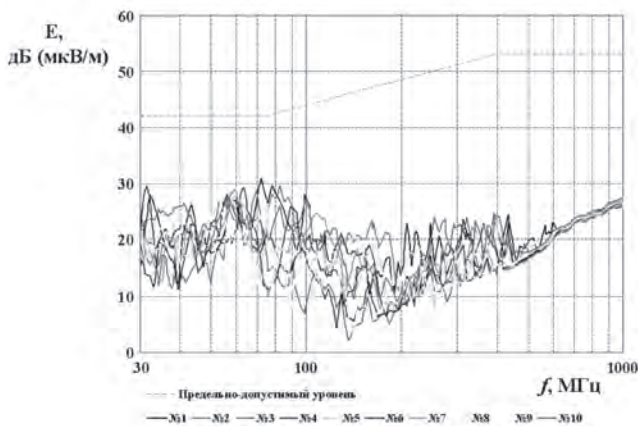


Рис. 1. Результаты измерений напряженности ЭМП от автомобилей семейства «Приора» ( $S \leq 1$  тыс. км)

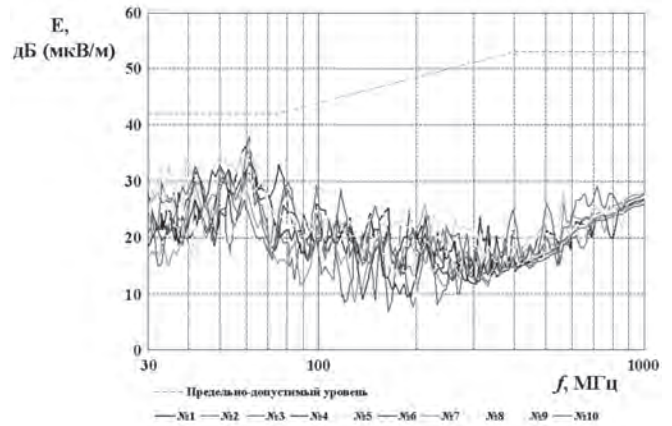


Рис. 2. Результаты измерений напряженности ЭМП от автомобилей семейства «Приора» ( $S = 50-60$  тыс. км)

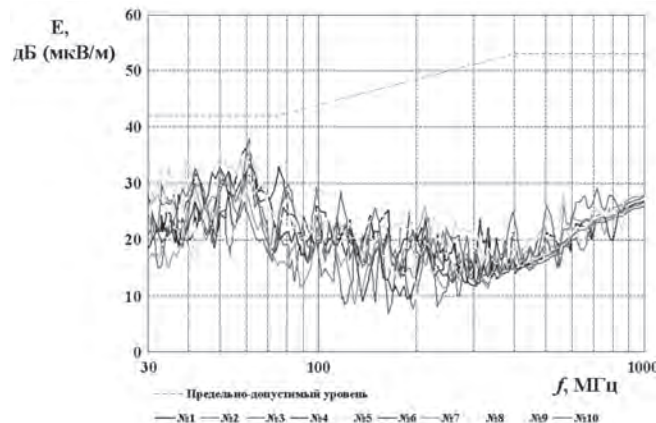


Рис. 3. Результаты измерений напряженности ЭМП от автомобилей семейства «Приора» ( $S = 100-130$  тыс. км)

Полные вероятности несоответствия нормам автомобилей

Семейство автомобилей	Пробег автомобилей $S_p$ , км	Полная вероятность, $P(E_{np} \leq E)$ (для 30 автомобилей)
«Приора»	$\leq 1000$	$3,02 \times 10^{-6}$
«Калина»	$\leq 1000$	$3,34 \times 10^{-6}$
«Самара-2»	$\leq 1000$	$2,76 \times 10^{-6}$
«Нива»	$\leq 1000$	$8,58 \times 10^{-5}$

На основании полученной математической модели разработан алгоритм комплексной оценки соответствия модельных рядов автомобилей с ИБСЗ

требованиям ЭМС по уровню ЭМП с учетом их эксплуатационной наработки (рис. 4).

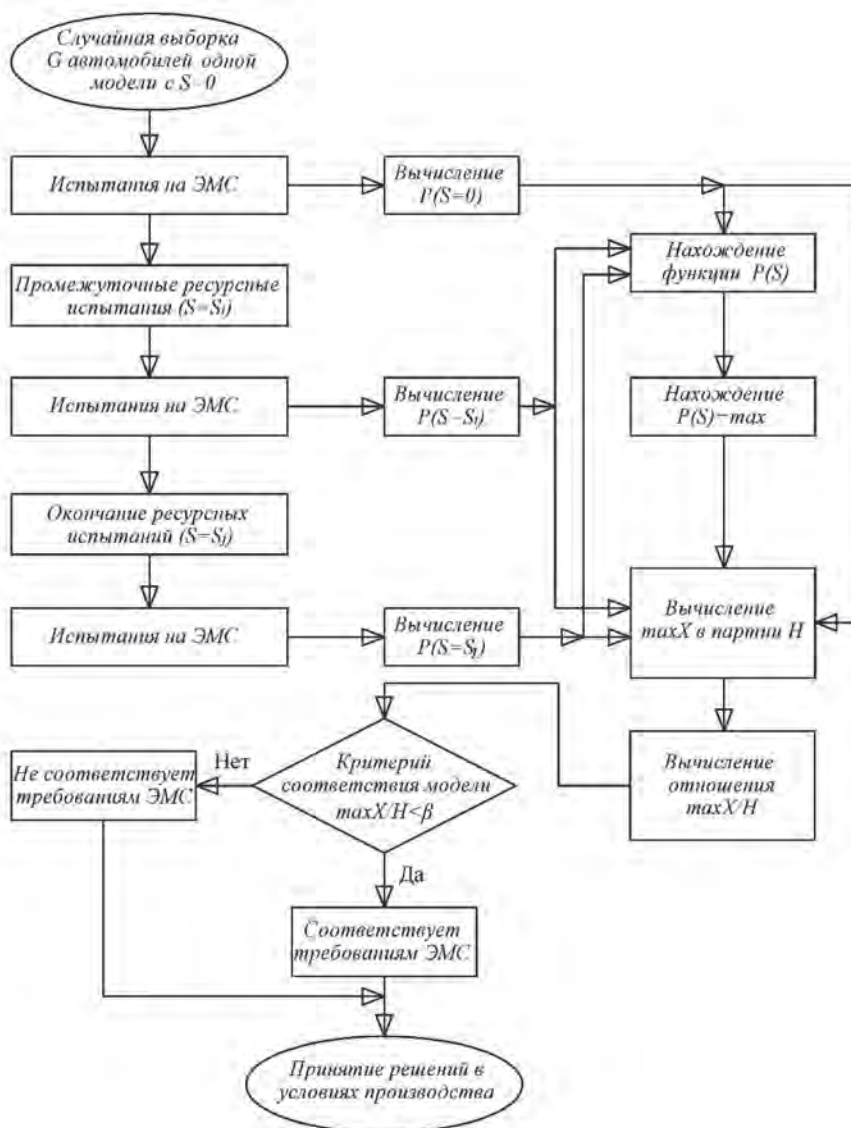


Рис. 4. Алгоритм оценки соответствия требованиям ЭМС по уровню ЭМП модельных рядов автомобилей с ИБСЗ

По экспериментальным данным определяется аналитическая функция  $P(S)$ , которая дает возможность прогнозировать динамику изменения количества  $X$  автомобилей с ИБСЗ, не соответствующих по уровню напряженности ЭМП.

Регрессионный анализ показывает, что функ-

ция  $P(S)$  имеет следующий вид:

$$P(S) = a - be^{-cs}, \quad (7)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  – коэффициенты.

Применительно к автомобилям модельного ряда «Приора» график функции  $P(S)$  имеет вид, представленный на рис. 5.

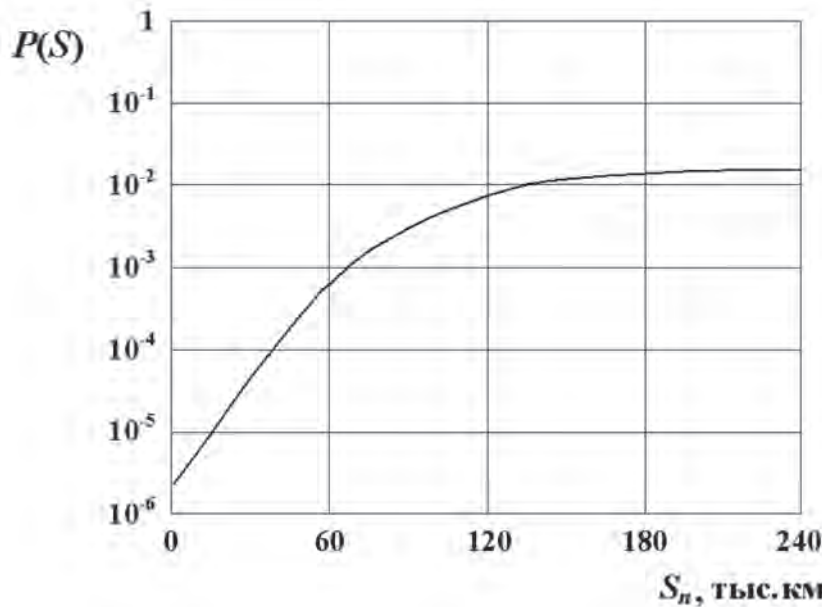


Рис. 5. Зависимость полной вероятности несоответствия автомобилей семейства «Приора» от пробега

Из  $P(S)$  находится пробег  $S_j$ , при котором

$$P(S_j) = \max. \quad (8)$$

Так как (7) является возрастающей функцией, а значит  $S_j = \infty$ , то на практике имеет место

$$S_j = S_{n,пр}, \quad (9)$$

где  $S_{n,пр}$  – предельное значение пробега, которое больше, чем гарантированный ресурс автомобиля.

Для всех  $S_j$ , а также  $S_j$  вычисляется максимальное количество несоответствующих автомобилей  $X$  в партии  $H$ , которое отбирается по определенному критерию, например, выпуск одной модели за год

$$\max X(S_{i,j}) = H \times P(S_{i,j}) + 3\sqrt{H \times P(S_{i,j}) \times [1 - P(S_{i,j})]}. \quad (10)$$

Соответствие требованиям ЭМС по уровню ЭМП есть неравенство

$$\frac{\max X(S_{i,j})}{H} \leq \beta(S), \quad (11)$$

где  $\beta(S)$  – критерий приемлемого риска, определяемый заводом-изготовителем.

Его максимальное значение  $\max \beta(S) = 0,143$  [3].

Разработанный на базе полученной математической модели соответствия автомобилей предельно допустимым нормам алгоритм позволяет оценить по ограниченной выборке правильность выбранных применительно к подавлению разряд-

ных помех от ИБСЗ решений, а также соблюдения заложенных в производство технологий. Данный подход есть оценка качества выпускаемой продукции, на основании которой принимаются решения в условиях действующего производства.

#### Список литературы

- ГОСТ Р 51320-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные. Методы испытаний технических средств – источников промышленных радиопомех [Текст] / Введ. 01.01.2001 – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 39 с.
- ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений [Текст] / Введ. 01.01.1977 – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 7 с.
- Николаев П.А. Риск ухудшения работоспособности автомобилей в условиях действия электромагнитных помех [Текст] / П.А. Николаев // Наука – промышленности и сервису: пятая международная научно-практическая конференция. Сборник статей. – Тольятти: ПВГУС, 2010. – Часть 2. – С. 190–194.



**Стыскин А.В.**  
**Styskin A.V.**

*кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Электромеханика»  
Уфимского государственного авиационного  
технического университета, Россия, г. Уфа*



**Уразбахтина Н.Г.**  
**Urazbakhina N.G.**

*кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Электромеханика»  
Уфимского государственного авиационного  
технического университета, Россия, г. Уфа*

УДК 621.313

## **ПРИНЦИПЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В УСТАНОВКАХ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ДЛЯ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН**

Одним из перспективных классов электрических машин для системы электроприводов нефтедобывающей промышленности являются погружные вентильные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов. Несмотря на явные преимущества вентильных двигателей по сравнению с применяемыми ныне в нефтедобыче асинхронными и синхронными, не смолкают дискуссии об эффективности применения вентильных двигателей больших габаритов для скважин нефтедобычи. В статье проведен сравнительный анализ систем с данными типами двигателей для обоснования целесообразности их применения. В результате отмечается, что массовое внедрение вентильных приводов связано, в первую очередь, с выравниванием их себестоимости с себестоимостью асинхронного привода, что в свою очередь определяется применением недорогих высококоэрцитивных постоянных магнитов.

*Ключевые слова:* электрическая машина, нефтяная промышленность, вентильный двигатель.

## **THE PRINCIPLES OF USE OF SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS IN INSTALLATIONS OF SUBMERSIBLE ELECTROCENTRIFUGAL PUMPS FOR OIL PRODUCTION WELLS**

One of perspective classes of electric cars for system of electric drives of the oil-extracting industry are submersible valve engines with excitement from constant magnets. Despite clear advantages of valve engines in comparison with applied nowadays asynchronous and synchronous engines, discussions about efficiency of use of valve engines of big dimensions for oil production wells don't cease. In article it is carried out the comparative analysis of systems with these types of engines for justification of expediency of their application. It is as a result noted that mass introduction of valve drives is connected, first of all, with alignment of its prime cost with prime cost of the asynchronous drive that in turn is defined by application of inexpensive high-coercive constant magnets.

*Key words:* electrical machines, oil industry, synchronous motor with permanent magnets.

За последнее десятилетие отмечается не только широкий интерес, но и расширение производства вентильных двигателей от первого до третьего габаритов. Это позволило некоторым производителям, во-первых, увеличить производство вентильных двигателей не только средней и малой мощности,

но и активно внедрять их в установках погружных электроцентробежных насосов (УЭЦН) для добычи нефти из скважин. Несмотря на явные преимущества вентильных двигателей по сравнению с применяемыми ныне в УЭЦН асинхронными и синхронными, не смолкают дискуссии об эффективности

применения вентильных двигателей больших габаритов для скважин нефтедобычи. В связи с этим возникает актуальная необходимость сравнительного анализа систем с данными типами двигателей для обоснования целесообразности их применения в УЭЦН.

Известно, что вентильным двигателем (ВД) называют регулируемый электропривод, основным элементом которого является двигатель переменного тока, конструктивно напоминающий синхронную машину с постоянными магнитами [1, 2]. Питание двигателя осуществляется от преобразователя частоты, подключенного к источнику постоянного тока. Кроме того, имеют место устройства управления, осуществляющие коммутацию цепей обмоток электродвигателя в зависимости от положения обмоток его ротора.

В связи с этим ВД напоминает электропривод с двигателем постоянного тока (ДПТ) и часто называется бесконтактным двигателем постоянного тока (БДПТ), лишенным основных недостатков ДПТ, таких как: наличие щеточно-коллекторного узла, следствием которого является их невысокая надежность; ограниченное напряжение на якоре и мощность двигателей, поэтому их не применяют для высокоскоростных мощных приводов, и т. д. Однако вентильный двигатель, конструктивно выполняется на базе синхронной машины с постоянными магнитами, поэтому имеет положительные свойства этих машин: повышенную надежность и ресурс работы; возможность использования в агрессивных и взрывоопасных средах, а также в вакууме, кроме того, ВД также имеет положительные свойства ДПТ – хорошие регулировочные качества.

Если до последнего времени авторы подчеркивали применение ВД в электроприводах малой и средней мощности, то широкому использованию мощных вентильных электроприводов способствовало создание высококоэрцитивных постоянных магнитов с остаточной индукцией  $B_r = 1,1$  Тл и коэрцитивной силой  $H_c = 800$  кА/м, прогресс в области силовых электронных ключей и высоковольтных микросхем [3].

В последнее десятилетие в связи с разработкой и внедрением в производство высокоэнергетических магнитов, изготовленных из сплавов редкоземельных металлов, таких как «Самарий-кобальт» ( $Sm-Co$ ) и «Неодим-железо-бор» ( $Nd-Fe-B$ ), и имеющих большую величину коэрцитивной силы, были значительно улучшены массогабаритные показатели электроприводов на основе ВД и получены более высокие электромеханические показатели, например, вращающий момент, для тех же габаритов дви-

гателей были разработаны и освоены промышленностью мощные вентильные двигатели, в том числе для нефтедобывающей отрасли.

Прежде чем предоставить информацию о преимуществах применения ВД по сравнению с традиционными двигателями переменного тока, кратко рассмотрим теоретические вопросы построения подобных систем. Согласно определению электропривода с ВД его функциональная схема может быть представлена подобно рис. 1, на котором: ЭМ – электрическая машина (ВД); К – коммутатор (инвертор), подключающий фазы ВД к источнику питания согласно определенному закону; ДПП – датчик положения ротора (отсутствует в приводах, в которых положение ротора определяется математически); СУ – система управления ключами коммутатора, обрабатывающая сигналы, поступающие с ДПП [3].

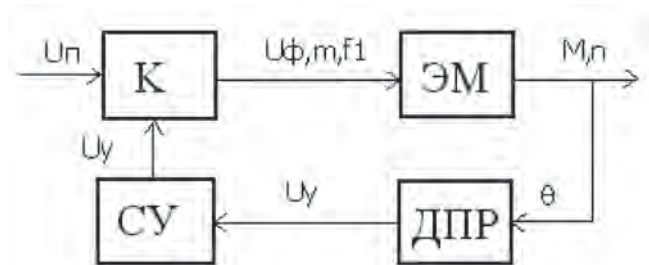


Рис. 1. Функциональная схема электропривода на основе ВД

Питание обмотки статора ВД осуществляется симметричной трехфазной системой напряжений (токов). В качестве коммутатора возможно применение известной схемы автономного инвертора на базе IGBT-транзисторов (рис. 2) [3]. Для получения формы кривой токов ВД, близкой по гармоническому составу к синусоидальной, целесообразно применить для системы управления транзисторами инвертора модифицированную синусоидальную или пространственно-векторную широтно-импульсную модуляцию с относительно высокими частотами переключения.

Основным силовым элементом электропривода является электрическая машина. Анализируя имеющуюся информацию, можно отметить сходство и отличие между синхронными и вентильными двигателями [3, 4]. В отличие от асинхронного у синхронных и вентильных двигателей частоты вращения магнитного поля статора и частота вращения ротора пропорциональны и не зависят от момента сопротивления в определенном диапазоне. При частотном регулировании электропривода с синхронным двигателем частота вращения ротора  $n = 60f_1/p$

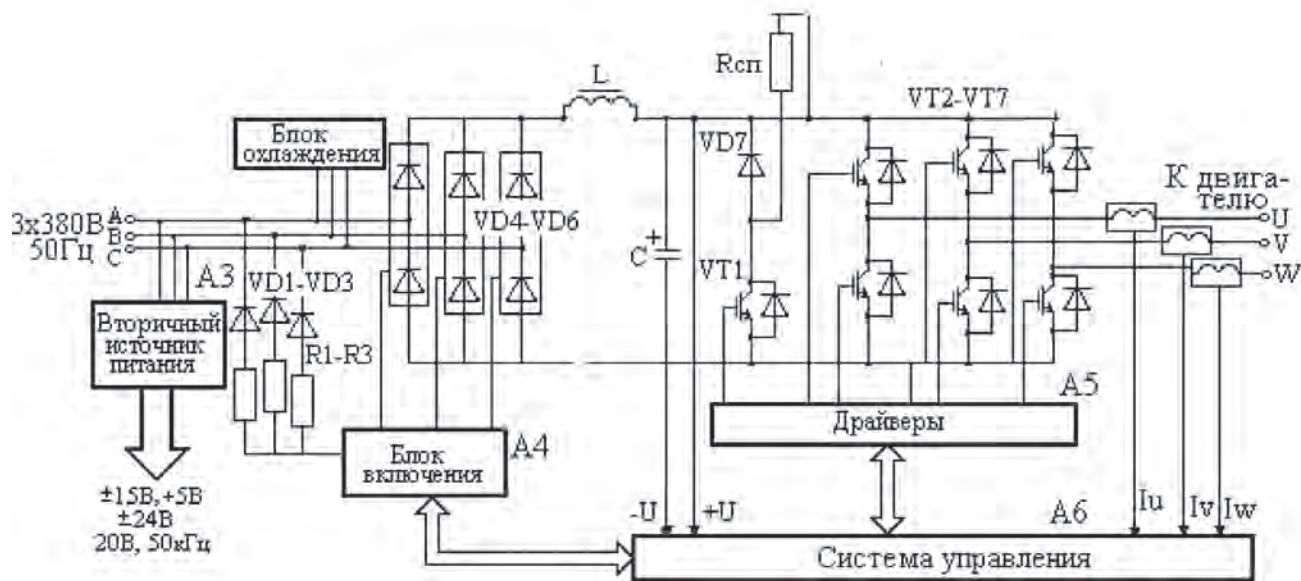


Рис. 2. Базовая функциональная схема силовой части преобразователя

определяется задающим устройством в составе системы управления автономного инвертора (как частота питающего напряжения  $f_i$ ), тем самым изменяя частоту коммутации ключей в фазах инвертора.

В отличие от синхронного вид и положение механической характеристики ВД определяется напряжением питания двигателя и моментом сопротивления, а частота вращения поля статора зависит от  $n$ , т. е.  $f_i = pn/60$ .

При сравнении с асинхронным двигателем (АД) можно отметить более высокие энергетические показатели, такие как КПД и  $\cos\phi$ . Коэффициент полезного действия ВД обычно превышает 90%, а коэффициент нагрузки ВД – более 0,95 [4]. Высокое значение коэффициента нагрузки  $\cos\phi$  обеспечивается рациональной настройкой системы управления и датчиков положения ротора или применением системы управления с векторным законом управления ключами инвертора.

Согласно справочным данным, максимальный КПД АД составляет около 86%, кроме того, зависит от изменения момента сопротивления двигателя и питающего напряжения, так как в соответствии с известными формулами пропорционален напряжению в квадрате. Высокий КПД ВД с возбуждением от постоянных магнитов обусловлен отсутствием электрических потерь в роторе; малое значение тока холостого хода уменьшает магнитные потери.

Следовательно, имея большую величину КПД и коэффициента мощности  $\cos\phi$ , ВД имеют более низкий перегрев по сравнению с АД одинаковой мощности и одинаковых размеров, что позволяет рассчитать двигатель меньших размеров по срав-

нению с АД той же мощности и тех же значений индукции в воздушном зазоре (порядка 0,6–0,8 Тл) или использовать привод при больших значениях нагрузки на валу.

Пониженный перегрев обмоток ВД увеличивает срок службы изоляции обмоток, повышая ресурс всего электропривода, даже если режим работы установки предполагает перегрузки, частые пуски и остановки. Уменьшенная масса ВД при той же мощности снижает момент инерции двигателя, увеличивает пусковой момент, тем самым повышая динамические свойства электропривода – высокое быстродействие, точность позиционирования.

Отличительным элементом электропривода на вентильном двигателе до последнего времени являлись датчики положения ротора (ДПР), необходимые для реализации алгоритма переключения коммутатора.

Датчиком положения ротора может быть индуктивный, емкостной дискретные датчики положения, также датчик Холла или фотоэлектрический инкрементальный энкодер. Однако эксплуатационники утверждают, что применение ДПР ведет к усложнению конструкции привода, снижению его надежности. Кроме того, в некоторых устройствах из-за удаленности двигателя от инверторов коммутатора применение датчиков положения фактически невозможно.

В этой связи ныне нашли применение «бездатчиковые» (*sensorless*) алгоритмы управления ВД, основанные на вычислении ЭДС одной из фаз двигателя по величинам токов, напряжений, измеренных непосредственно на выходных клеммах автономного инвертора, и текущей частоты вра-

щения ротора двигателя [5].

Кроме того, применяются более сложные методы определения положения ротора двигателя – метод оценки потокосцеплений фаз двигателя по математическим моделям с помощью наблюдателей состояния, по оценке гармонического состава ЭДС-вращения, а также применяя нейросетевые модели электромагнитных процессов в двигателе.

В последнее время в системах управления ключами инвертора вентильных электроприводов находят широкое применение так называемые «векторные», или частотно-токовые релейные алгоритмы управления [7]. Векторное управление невозможно без адекватной математической модели в системе управления. Кроме того, возникает необходимость введения наблюдателя состояний, который не только измеряет и отслеживает ряд внешних параметров двигателя (напряжения и токи как в звене постоянного тока, так и на клеммах питания), но и пересчитывает их значения в параметры обобщенной электрической машины в системе ортогональных координат  $d, q$ , связанной с роторной обмоткой двигателя и неподвижной относительно нее.

В математической модели задают положение вектора потокосцепления, направленного по оси  $d$  (продольной оси ротора ВД), токи и напряжения раскладывают на две составляющие. Составляющая тока по оси  $d$  определяет величину потокосцепления, а составляющая тока по оси  $q$  определяет момент на валу двигателя. Подобная модель вентильного двигателя делает его похожим на ДПТ с обмоткой возбуждения.

Итак, ныне существуют и развиваются два направления развития систем векторного управления. Если область применения электропривода такова, что требует широкого диапазона изменения частоты вращения электродвигателя с повышенной точностью, а также возможности регулирования, то, как правило, проектируются системы управления с обратной связью по скорости [3]. В противных случаях векторные системы управления выполняются «бездатчиковыми».

В вентильных электроприводах, так же как в асинхронных и синхронных, законы управления током и частотой вращения при векторном управлении достаточно сложны [5]. Объем вычислений при включении математических моделей в систему управления будет еще более увеличиваться у «бездатчиковых» систем. Кроме того, эффективность «бездатчиковой» системы управления в реальном масштабе времени зависит не только от точности первоначально вводимой информации (конструктивные параметры двигателя и окружающей среды,

в частности, для погружных двигателей свойства нефтепродукта), но и от изменения этих факторов в процессе работы. Авторами был предложен ряд систем векторного управления преобразователями частоты с улучшенными энергетическими параметрами и обратной связью по частоте вращения [6].

Системы управления, разработанные на совершенных законах, как правило, имеют сложную структуру, состоящую из многочисленных замкнутых контуров, имеющих обратные связи, дополнительные регуляторы. Большое количество замкнутых контуров регулирования способно привести к неустойчивости всей системы управления электроприводом в целом. Кроме того, при эксплуатации традиционных электроприводов появляются накапливающиеся статические ошибки регулирования и низкие показатели качества при изменении момента на валу двигателя, изменении конструктивных параметров двигателя из-за изменения внешних условий, например, изменение активного сопротивления ротора от изменения температуры.

Использование нечеткой логики в системах управления уменьшает вмешательство оператора в процесс управления и, следовательно, позволяет разработать новые методики управления, более адаптированные к промышленной среде. Авторами была предложена система управления напряжением преобразователя частоты для электропривода с нечетким регулятором (рис. 3).

Система управления учитывает изменение внутренних и внешних параметров двигателя при сохранении устойчивости, точности и качества регулирования частоты вращения и момента на валу [8].

На основе вышеприведенного анализа можно сделать следующие выводы.

Вентильные электроприводы по сравнению с асинхронными обладают значительными преимуществами по таким эксплуатационным показателям, как энергоэффективность, надежность, габариты, что дает возможность эффективного решения таких задач, как нефтедобыча из боковых стволов, прерывистая эксплуатация малодебитных скважин, осложненных высоким газовым фактором, и др.

Основным недостатком вентильного электропривода по сравнению с асинхронным является его относительно высокая себестоимость, вызванная необходимостью применения дорогостоящих высококоэрцитивных постоянных магнитов и датчиков положения ротора.

Эффективные интеллектуальные системы управления – энергосберегающие, векторные и с нечеткими регуляторами – могут применяться как с датчиками в цепи обратной связи, так и в «бездат-

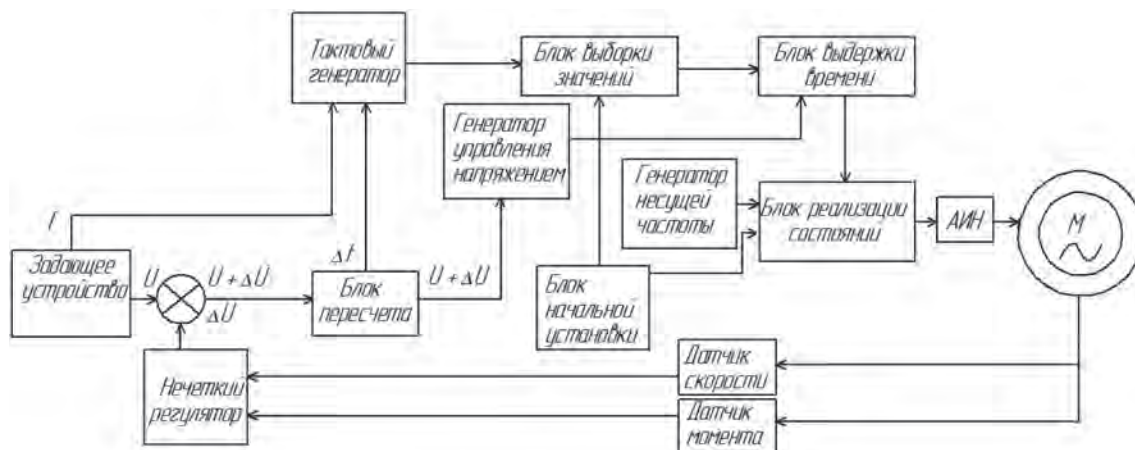


Рис. 3. Структурная схема системы управления электропривода с нечетким регулятором

чиковом» исполнении, это зависит от технических условий эксплуатации и от технических требований к установке. Однако однозначным видится то, что привод должен быть без датчиков положения ротора, усложняющих конструкцию погружного двигателя. Программное обеспечение системы управления вентильного двигателя может быть различным, но ненамного отличающимся по цене и сроку окупаемости от программного обеспечения частотно-регулируемых асинхронных электроприводов.

В связи с вышесказанным можно отметить, что массовое внедрение вентильных приводов связано, в первую очередь, с выравниванием их себестоимости с себестоимостью асинхронного привода, что в свою очередь определяется применением недорогих высококоэрцитивных постоянных магнитов.

#### Список литературы

1. Овчинников И.В. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) [Текст] / И.В. Овчинников. – СПб.: КОРОНА-Век, 2006. – 336 с.
2. Воронин С.Г. Электропривод летательных аппаратов: Конспект лекций [Текст] / С.Г. Воронин. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2008. – Часть 2. – 115 с.
3. Панкратов В.В. Тенденции развития обще-

промышленных электроприводов переменного тока на основе современных устройств силовой электроники [Текст] / В.В. Панкратов // Силовая интеллектуальная электроника. Специализированный информационно-аналитический журнал. – 2005. – № 2. – С. 27–31.

4. Шенгур Н.В. Мифы и реальности внедрения вентильного электродвигателя в УЭЦН [Текст] / Н.В. Шенгур, А.А. Иванов // Инженерная практика. – 2011. – № 3 – С. 36–38.

5. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: Учебник для вузов [Текст] / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 272 с.

6. Патент № 2339154, Российская Федерация, МПК7H02P27/06, H02M7/53846. Устройство управления преобразователя частоты [Текст] / Л.Э. Рогинская, А.В. Стыскин, Н.Г. Уразбахтина, Д.С. Рябухин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т» (RU). – № 2007118803/09; заявл. 21.05.2007; опубл. 20.11.2008.

7. Стыскин А.В. Система управления энергосберегающего асинхронного электропривода [Текст] / А.В. Стыскин, Н.Г. Уразбахтина // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов II Всероссийской научн. техн. конф. Т. 1. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. – С. 118–121.





**Татевосян А.А.**

**Tatevosyan A.A.**

кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Электрическая техника» Омского государственного технического университета,  
Россия, г. Омск

УДК 621.313.17

## СИНТЕЗ МНОГОКОНТУРНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛАСТОМЕРОВ

В статье рассмотрен подход к построению математической модели напряженно-деформированного состояния опытного образца эластомера на основе схемы замещения, а также указан метод расчета параметров схемы замещения на основе экспериментального исследования процесса «сжатие – релаксация». Результаты экспериментальных исследований процесса релаксации напряжения при фиксированных значениях деформаций, проведенные на испытательном стенде с различными образцами эластомеров, подтверждают возможность разложения механического напряжения на сумму экспонент, причем число экспонент для практически важных случаев не превышает шести. По найденным спектрам разложения и разработанному алгоритму определяются параметры многоконтурных схем замещения опытных образцов эластомеров.

*Ключевые слова:* многоконтурная схема замещения, напряженно-деформируемое состояние, реологические характеристики, эластомеры, расчет параметров схемы замещения.

## SYNTHESIS OF MULTIPLE CIRCUIT REPLACEMENT SCHEME OF ELASTOMERS

This article describes an approach to the construction of a mathematical model of the stress-strain state of a prototype-based elastomer equivalent circuit, and the statement of the method of calculation of equivalent circuit parameters on the basis of an experimental study of the "contraction-relaxation". The results of experimental studies of the process of stress relaxation at fixed strain, carried out on a test bench with different samples of elastomers confirm the possibility of expanding the amount of stress exponent, and the number of exponents to the practically important cases does not exceed six. For the resulting spectra decomposition and developed algorithm determines the parameters of multiple-substitution schemes prototypes elastomers.

*Key words:* multiple circuit replacement scheme, the stress-strain state, rheology, elastomers, the calculation of equivalent circuit parameters.

Эластомеры находят широкое применение в составе амортизирующих установок, производстве шин для транспортных средств, изготовлении различных прокладок и манжет, поэтому проектирование и расчет сложных технологических установок, включающих в свой состав изделия из эластомеров, а также технологические элементы конкретного назначения, использующие вязкоупругие свойства, связан с использованием математических моделей, в состав которых вводятся уравнения, описывающие состояние эластомеров в различных режимах работы. Нелинейные реологические свойства эластомеров, их неравномерная зависимость от температуры нагрева и окружающей среды, особенно проявляющаяся при динамических внешних воздействиях

типа «сжатие – растяжение», обуславливают необходимость применения сложного математического аппарата для расчета временных зависимостей и интегральных характеристик.

Проведенные в работах [1–6] исследования механических свойств эластомеров показывают, что эластомеры характеризуются двумя основными релаксационными механизмами:

- $\alpha$  – процессы, ответственные за быструю стадию релаксации, наблюдаемые в области стеклования и связанные с главным временем релаксации  $\tau_\alpha = 10^{-3} - 10^{-5}$  с при 20 °С;

- $\lambda$  – процессы, ответственные за медленную стадию релаксации, связанные с главными различными временами релаксации, существенно от-

личающимися по величине друг от друга, принимающими значения от десятых долей секунды до нескольких часов.

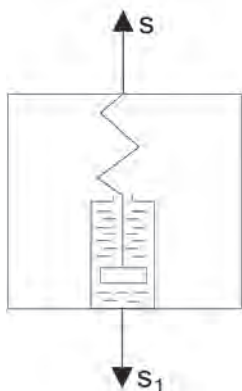


Рис. 1. Модель Максвелла вязкоупругого тела

Для исследования связи основных релаксационных механизмов с процессами вязкоупругости в эластомерах проведем синтез многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера. При построении схемы замещения воспользуемся моделью Максвелла для изучения свойств вязкоупругого тела. Модель состоит из соединенных последовательно двух элементов, один из которых обладает упругим сопротивлением, а другой – вязким (рис. 1). В качестве упругого элемента используется пружина, в качестве вязкого – цилиндр, заполненный вязкой жидкостью, внутри которого с некоторым зазором может двигаться поршень. При движении поршня относительно цилиндра возникает вязкое сопротивление, обусловленное перетеканием жидкости через зазор из одной полости в другую. В модели Максвелла упругий и вязкий элементы находятся под одним и тем же усилием, при этом полная деформация  $\varepsilon$  вязкоупругого тела складывается из упругой  $\varepsilon_y$  и вязкой  $\varepsilon_v$  деформации:

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_v. \quad (1)$$

Относительные деформации  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_v$  в соотношении (1) находятся как отношения удлинения пружины и смещения поршня к одной и той же длине ребра множества малых плотно прилегающих друг к другу единичных кубиков, составляющих вязкоупругого тела.

Упругая деформация  $\varepsilon_y$  связана с напряжением законом Гука

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma}{E}, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль упругости (модуль Юнга).

Зависимость между напряжением и скоростью вязкой деформации представим в виде соотношения [6]

$$\frac{d\varepsilon_v}{dt} = \frac{\sigma}{\lambda}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент, учитывающий вязкое течение эластомеров при растяжении – сжатии.

Продифференцируем по времени обе части уравнений (1) и (2), тогда с учетом выражения (3) получим уравнение:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\lambda}. \quad (4)$$

Уравнение (4), называемое уравнением механических состояний материала Максвелла, для случая линейной вязкоупругости отражает качественную картину физического процесса при растяжении – сжатии. Этого вполне достаточно, чтобы воспользоваться формальной аналогией в записи уравнений механических состояний вязкоупругого тела и электрического состояния цепи.

Пусть вязкоупругое тело нагружено любым способом до напряжения  $\sigma_0$  и в дальнейшем деформация тела поддерживается постоянной, то есть  $\varepsilon = \text{const}$ . В подобных условиях (рис. 2) находится опытный образец эластомера (1), зажатый с двух торцевых поверхностей стальными плитами (2, 3) при наличии ограничителя хода (4) одной из плит, при этом другая плита является неподвижной. Найдем закон изменения во времени напряжений в опытном образце эластомера.

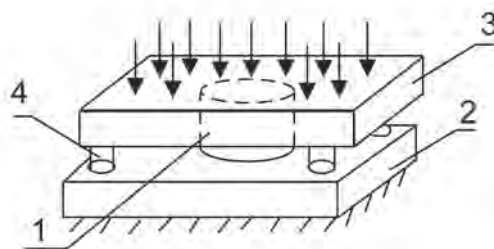


Рис. 2. Схема нагружения опытного образца эластомера

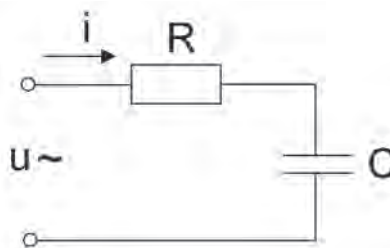


Рис. 3. Схема замещения вязкоупругого тела

С учетом условия  $\varepsilon = \text{const}$  уравнение (4) принимает вид:

$$\frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\lambda} = 0. \quad (5)$$

Для записи решения в окончательном виде подставим в уравнение (5) начальное условие (в момент времени  $t = 0$  напряжение  $\sigma = \sigma_0$ ), тогда получим

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E}{\lambda} t\right). \quad (6)$$

Если сопоставить уравнение (5) после операции его интегрирования

$$\frac{\sigma}{E} + \frac{1}{\lambda} \int \sigma dt = 0 \quad (7)$$

с уравнением заряда конденсаторной батареи от источника постоянного напряжения

$$iR + \frac{1}{C} \int i dt = 0 \quad (8)$$

и его решение

$$i = I_0 \exp\left(-\frac{t}{RC}\right), \quad (9)$$

то легко можно обнаружить формальную аналогию в записи уравнений (7) и (8) и их решений (6) и (9). Метод формальной аналогии широко используется при моделировании сложных систем [11]. Следовательно, в электрической схеме замещения опытного образца эластомера (рис. 3) аналогами тока  $i$ , напряжения  $u$ , сопротивления  $R$  и емкости  $C$  соответственно будут напряжение  $\sigma$ , деформация  $\varepsilon$ , инверсный модуль упругости  $E^{-1}$ , коэффициент вязкого течения  $\lambda$ . Построенная таким образом схема замещения опытного образца эластомера является упрощенной. Несмотря на это, выполненные на ее основе расчеты показывают процесс уменьшения напряжения  $\sigma$  в опытном образце эластомера при постоянной деформации  $\varepsilon$  и позволяют оценить время релаксации

$$\tau = \frac{E}{\lambda}, \quad (10)$$

динамический модуль упругости при синусоидально изменяющихся во времени деформациях

$$\frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} = \left[ \sqrt{E^2 + \frac{1}{(\omega\lambda)^2}} \right]^{-1} \quad (11)$$

и тангенс угла механических потерь

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{E}{\omega\lambda}, \quad (12)$$

где  $\omega$  – угловая частота;  $\varphi$  – угол сдвига фаз между напряжением  $\sigma(t)$  и деформацией  $\varepsilon(t)$ ;  $\sigma_m$ ,  $\varepsilon_m$  – соответственно амплитуды напряжения и деформации в вязкоупругом теле.

Формальная аналогия в записи уравнений механического состояния вязкоупругого тела и электрического состояния цепи дает возможность построить многоконтурную схему замещения вяз-

коупругого тела, в которой напряжение в процессе релаксации при поддержании заданной деформации раскладывается в экспоненциальный ряд:

$$\sigma(t) = \sum_{k=1}^N \sigma_{sk} e^{-\Lambda_k t}, \quad (13)$$

где  $\sigma_{sk}$ ,  $\Lambda_k$  соответственно амплитуда и показатель степени  $k$ -й экспоненты механического напряжения.

Разложение зависимости на сумму экспонент позволяет записать операторное сопротивление схемы замещения вязкоупругого тела, аналогичное операторному сопротивлению схемы замещения электрической цепи. По операторному сопротивлению можно синтезировать схему замещения.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что для описания  $\alpha$ - и  $\lambda$ -процессов достаточным является формирование шестиконтурной схемы замещения опытного образца эластомера (рис. 4). Используя формальную аналогию в замене параметров электрической цепи сопротивлений  $R_0, R_1, \dots, R_5$  на инверсные модули упругости  $E_0^{-1}, E_1^{-1}, \dots, E_5^{-1}$  и емкостей  $C_0, C_1, \dots, C_5$  на коэффициенты вязкого течения  $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_5$  соответственно можно найти и определить параметры многоконтурной схемы замещения напряженно деформированного состояния вязкоупругого тела при заданной деформации  $\varepsilon = \text{const}$ .

Процесс релаксации напряжения представим в виде:

$$\sigma(t) = \varepsilon E(t) = \varepsilon \sum_{k=1}^6 E_k e^{-\Lambda_k t}, \quad (14)$$

где  $E(t)$  – релаксационный динамический модуль упругости;  $\tau_k = \frac{1}{\Lambda_k}$  – постоянная времени  $k$ -го релаксационного механизма;  $E_k$  – коэффициент с размерностью модуля упругости, указывающий на относительный вклад  $k$ -го релаксационного механизма в процессе релаксации.

Таким образом, в процессе релаксации напряжения при фиксированных значениях деформации участвуют шесть экспонент, имеющих различные постоянные времени  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_6$ .

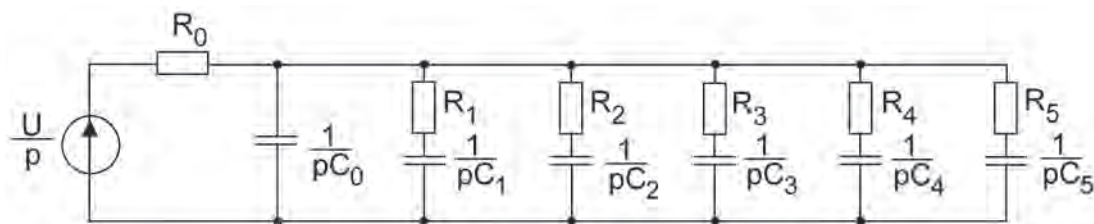


Рис. 4. Многоконтурная схема замещения цепи в операторной форме

Постоянные времени многоконтурной схемы замещения (рис. 4) определяются из решения системы нелинейных алгебраических уравнений (15).

Решение системы уравнений (15) производится методом последовательных приближений. По вычисленным значениям постоянных времени  $\tau_k = R_k C_k$ , где  $k = 1, 2, \dots, 5$  определяются параметры

многоконтурной схемы замещения  $R_k$  и  $C_k$ . Для их расчета вначале используется решение системы линейных алгебраических уравнений относительно емкостей схемы  $C_k$  (16).

Сопротивления участков схемы находятся при этом из соотношений  $R_k = \tau_k / C_k$ .

$$\left\{ \begin{aligned} \tau_1 \tau_2 \tau_3 \tau_4 \tau_5 &= \frac{I_{s1} \lambda_1 + I_{s2} \lambda_2 + I_{s3} \lambda_3 + I_{s4} \lambda_4 + I_{s5} \lambda_5 + I_{s6} \lambda_6}{I_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 \lambda_6} = \frac{\sum_{k=1}^6 I_{sk} \lambda_k}{I_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 \lambda_6} \\ \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5 &= \sum_{k=1}^6 \frac{1}{\lambda_k} \left( 1 - \frac{I_{sk}}{I_0} \right) \\ \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3} + \frac{1}{\tau_4} + \frac{1}{\tau_5} &= \frac{\sum_{k=1}^6 \left( I_{sk} \lambda_k \cdot \sum_{j=1}^6 \lambda_j \right)}{\sum_{k=1}^6 I_{sk} \lambda_k} \quad \text{при } j=k, \lambda_j=0 \\ \sum_{i=1}^3 \tau_i \sum_{j=i+1}^4 \tau_j \sum_{n=j+1}^5 \tau_n &= \frac{1}{I_0 \prod_{k=1}^6 \lambda_k} \left( \sum_{k=1}^6 I_{sk} \lambda_k \left( \sum_{j=1}^5 \lambda_j \sum_{m=j+1}^6 \lambda_m \right) \right) \quad \text{при } j=k, \lambda_j=0; \text{ при } m=k, \lambda_m=0 \\ \sum_{i=1}^4 \tau_i \sum_{j=i+1}^5 \tau_j &= \frac{1}{I_0} \left( \sum_{k=1}^6 I_{sk} \sum_{j=1}^5 \frac{1}{\lambda_j} \sum_{m=j+1}^6 \frac{1}{\lambda_m} \right) \quad \text{при } j=k, \frac{1}{\lambda_j} \text{ не существует} \\ & \quad \text{при } m=k, \frac{1}{\lambda_m} \text{ не существует} \end{aligned} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{aligned} C_0 \cdot a_0^{(1)} + C_1 \cdot a_1^{(1)} + C_2 \cdot a_2^{(1)} + C_3 \cdot a_3^{(1)} + C_4 \cdot a_4^{(1)} + C_5 \cdot a_5^{(1)} &= b_0^{(1)} \\ C_0 \cdot a_0^{(2)} + C_1 \cdot a_1^{(2)} + C_2 \cdot a_2^{(2)} + C_3 \cdot a_3^{(2)} + C_4 \cdot a_4^{(2)} + C_5 \cdot a_5^{(2)} &= b_0^{(2)} \\ C_0 \cdot a_0^{(3)} + C_1 \cdot a_1^{(3)} + C_2 \cdot a_2^{(3)} + C_3 \cdot a_3^{(3)} + C_4 \cdot a_4^{(3)} + C_5 \cdot a_5^{(3)} &= b_0^{(3)}, \\ C_0 \cdot a_0^{(4)} + C_1 \cdot a_1^{(4)} + C_2 \cdot a_2^{(4)} + C_3 \cdot a_3^{(4)} + C_4 \cdot a_4^{(4)} + C_5 \cdot a_5^{(4)} &= b_0^{(4)} \\ C_0 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 &= b_0^{(5)}. \end{aligned} \right. \quad (16)$$

Для построения многоконтурных схем замещения опытных образцов эластомеров воспользуемся экспериментальными исследованиями процесса релаксации напряжения при заданной деформации, проведенными на испытательном стенде, который обеспечивает:

- создание статического прижимного усилия на опытный образец эластомера;
- фиксацию хода якоря с помощью ограничителя хода в виде регулируемой высоты стопа для под-

держания заданной деформации;

- установку температуры испытаний опытного образца эластомера, используя термокамеру;
- измерение силы реакции опытного образца эластомера при сжатии с помощью преобразователя силы ПС-20К, имеющего номинальную нагрузку 20 кг при напряжении питания 5 В;
- усиление электрического сигнала с выхода преобразователя силы ПС-20К и его регистрацию на экране монитора ПК.

Для осциллографирования выходного сигнала использовалась осциллографирующая приставка (PCS 500 цифровой осциллограф, производитель VellemanInstruments, погрешность 2,5%, чувствительность 5 мВ). Ее программное обеспечение позволяет регистрировать время и амплитуду сигнала со следующими погрешностями, что делает возможным выделение в эксперименте быстрой и медленной стадии процесса релаксации.

Для исследования процесса релаксации меха-

нического напряжения при заданной деформации на испытательном стенде были отобраны опытные образцы эластомеров с различным наполнителем технического углерода П-550 и П-234, резко отличающиеся друг от друга своими вязкоупругими свойствами.

На рис. 5 и 6 приведены экспериментальные временные зависимости выходного сигнала, характеризующие процесс релаксации механического напряжения в опытных образцах эластомеров.

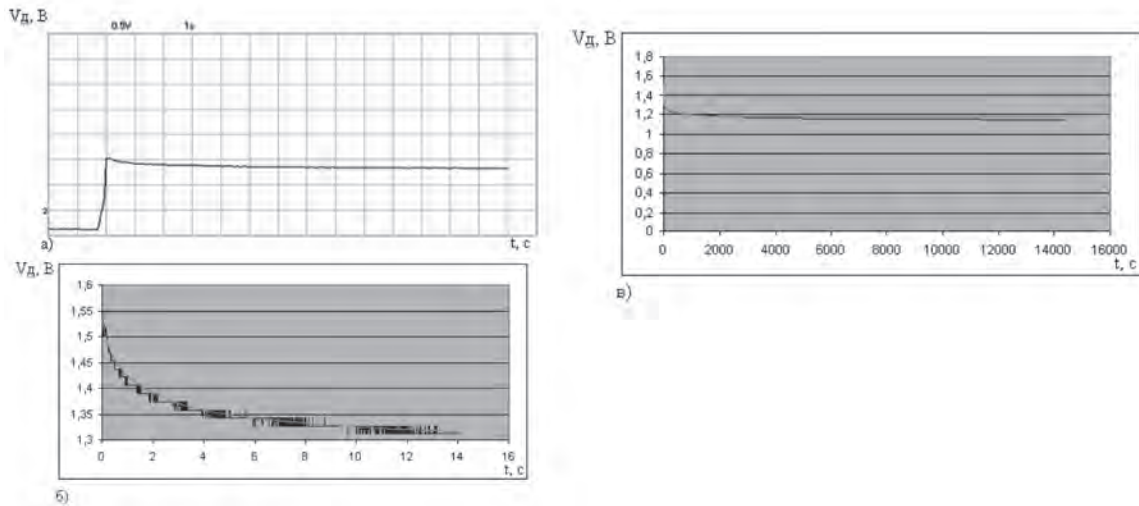


Рис. 5. Экспериментальные зависимости выходного сигнала в процессе релаксации механического напряжения в опытном образце эластомера с наполнителем технического углерода П-550: а) – с использованием АЦП в секундной области; б), в) – с использованием милливольтметра в часовой области

— экспериментальная характеристика;  
 — характеристика, полученная после разложения экспериментальной характеристики на экспоненты

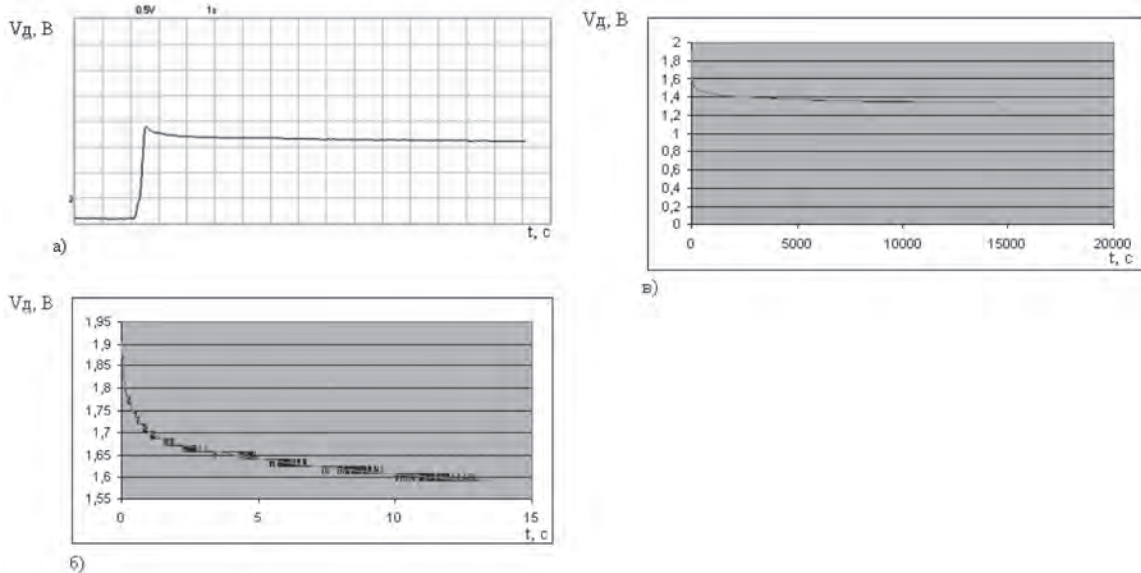


Рис. 6. Экспериментальные зависимости выходного сигнала в процессе релаксации механического напряжения в опытном образце эластомера с наполнителем технического углерода П-234: а) – с использованием АЦП в секундной области; б), в) – с использованием милливольтметра в часовой области

— экспериментальная характеристика;  
 — характеристика, полученная после разложения экспериментальной характеристики на экспоненты

Значения выходного сигнала пропорциональны силе реакции опытного образца эластомера на сжатие  $F_{эл} = k \cdot u_d$  и соответственно пропорциональны механическому напряжению  $\sigma = F_{эл}/S$ , где  $S$  – площадь поперечного сечения опытного образца в не нагруженном состоянии. Это позволяет определить амплитуду и показатель степени  $k$ -й экспоненты механического напряжения в выражении (13), при-

веденные в табл. 1.

Данные табл. 1 были использованы для синтеза многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера в программном обеспечении «Эластомер», разработанном в среде BorlandDelphi 6.0 [7, 8, 9]. Результаты расчетов по этой программе представлены в табл. 2.

Таблица 1

**Результаты разложения механического напряжения в процессе релаксации в опытных образцах эластомеров с различным наполнителем технического углерода П-550 и П-234**

Техуглерод П-550		Техуглерод П-234	
$\sigma_{si}$ , Па	$\lambda_i$	$\sigma_{si}$ , Па	$\lambda_i$
$\sigma_{s1} = 4.247 \cdot 10^5$	$\lambda_1 = 2 \cdot 10^{-6}$	$\sigma_{s1} = 4.959 \cdot 10^5$	$\lambda_1 = 2 \cdot 10^{-6}$
$\sigma_{s2} = 3.31 \cdot 10^4$	$\lambda_2 = 1.6 \cdot 10^{-3}$	$\sigma_{s2} = 3.673 \cdot 10^4$	$\lambda_2 = 6 \cdot 10^{-4}$
$\sigma_{s3} = 3.427 \cdot 10^4$	$\lambda_3 = 0.051$	$\sigma_{s3} = 3.64 \cdot 10^4$	$\lambda_3 = 6.3 \cdot 10^{-3}$
$\sigma_{s4} = 2.929 \cdot 10^4$	$\lambda_4 = 0.532$	$\sigma_{s4} = 4.524 \cdot 10^4$	$\lambda_4 = 0.128$
$\sigma_{s5} = 1.208 \cdot 10^4$	$\lambda_5 = 0.812$	$\sigma_{s5} = 4.863 \cdot 10^4$	$\lambda_5 = 2.373$
$\sigma_{s6} = 1.886 \cdot 10^4$	$\lambda_6 = 4.084$	$\sigma_{s6} = 2.313 \cdot 10^4$	$\lambda_6 = 26.989$

Данные табл. 1 были использованы для синтеза многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера в программном обеспечении

«Эластомер», разработанном в среде BorlandDelphi 6.0 [7, 8, 9]. Результаты расчетов по этой программе представлены в табл. 2.

Таблица 2

**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/с	$C_i$ , Ф	$R_i$ , Ом	$\tau_i$ , 1/с	$C_i$ , Ф	$R_i$ , 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	$1.108 \cdot 10^{-7}$	$4.398 \cdot 10^7$

Техуглерод П-550			Техуглерод П-234		
$2.464 \cdot 10^3$	$6.11 \cdot 10^{-6}$	$4.034 \cdot 10^8$	$1.350 \cdot 10^3$	$7.597 \cdot 10^{-6}$	$1.778 \cdot 10^8$
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 с различным наполнителем технического углерода П-550 и П-234, приведенные в табл. 2, служат основой в построении математической модели, учитывающей вязкоупругие линейные свойства эластомеров, входящих в состав технологических установок [10].

#### Список литературы

1. *Адамов А.А.* К построению нелинейной модели вязкоупругого поведения наполненных резин при конечных деформациях [Текст] / А.А. Адамов // Каучук и резина. – 1996. – № 5. – с. 27–30.
2. *Адамов А.А.* Методы прикладной вязкоупругости [Текст] / А.А. Адамов, В.П. Матвеевко, Н.А. Труфанов, И.Н. Шардаков. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 411 с.
3. *Бартенев Г.М.* Релаксационные свойства и структура эластомеров [Текст] / Г.М. Бартенев // Труды Краснодар. политехн. ин-та. Механика эластомеров. – 1977. – Вып. 242. – С. 7–21.
4. *Горшков А.Г.* Теория упругости и пластичности: Учеб. для вузов [Текст] / А.Г. Горшков, Э.И. Старовойтов, Д.В. Тарлаковский. – М.: Физматлит, 2002. – 416 с.
5. *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.: ил. ISBN 5-7038-1860-5.
6. *Павлов П.А.* Сопротивление материалов: Учебное пособие [Текст] / П.А. Павлов, Л.К. Паршин, Б.Е. Мельников, В.А. Шерстнев; под ред. Б.Е. Мельникова. – СПб.: Издательство «Лань», 2003. – 528 с.
7. *Ковалев Ю.З.* Программное обеспечение «Эластомер» для исследования параметров многоконтурной схемы замещения вязкоупругих свойств материалов на основе процесса релаксации [Текст] / Ю.З. Ковалев, А.А. Татевосян. – М.: ВНИИЦ, 2004. – № 50200401152.
8. *Татевосян А.А.* Синтез многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера на основе исследования процесса релаксации [Текст] / А.А. Татевосян // Зимняя школа по механике сплошных сред (четырнадцатая): Тез. докл. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – С. 6.
9. *Татевосян А.А.* Математическая модель для определения реологических характеристик эластомеров при циклическом нагружении [Текст] / А.А. Татевосян // Омский научный вестник. – 2006. – Вып. 41. – С. 92–96
10. *Татевосян А.А.* Математическое моделирование линейного магнитоэлектрического двигателя для испытания вязкоупругих свойств эластомеров [Текст] / А.А. Татевосян, Н.В. Захарова, Е.В. Осина // Динамика систем, механизмов и машин. Материалы VIII Международной научно-технической конференции. Тез. докл. – Омск, 2012. – С. 187–190.
11. *Курбатов П.А.* Математическое моделирование электромеханических систем электрических аппаратов [Текст] / П.А. Курбатов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 110 с.



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

доктор технических наук, профессор Московского государственного университета дизайна и технологий, Россия, г. Москва



**Варламов И.В.**  
**Varlamov I.V.**

доктор технических наук, профессор Института государственного управления, права и инновационных технологий, Россия, г. Москва



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

кандидат технических наук, доцент Института государственного управления, права и инновационных технологий, Россия, г. Москва  
УДК 621.79

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЛИЗНО-ВОДНОГО ГЕНЕРАТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ МИКРОЭВМ

В статье предложены принципы построения и защиты электролизно-водного генератора. Приведены результаты разработки схем системы управления на основе изобретений авторов и системы управления защиты и контроля генератора на базе PIC 16F84A.

Ключевые слова: электролизно-водный генератор (ЭВГ), система управления, микроЭВМ.

## THE CONTROL SYSTEM AND AUTOMATIC CONTROL MODES OF ELECTROLYTIC WATER GENERATOR USING A MICRO-COMPUTER

The paper proposes design principles and the protection of electrolytic water generator. The results of development schemes of control systems based on invention of the authors and control system protection and control of the generator to the base PIC16F84A.

*Key words:* electrolytic water generator, control system, micro-computer.

Важной составной частью комплексной автоматизации производства является автоматизация технологического оборудования. Это предусматривает создание аппаратов, оснащенных локальной автоматикой и программными средствами, позволяющими управляющей ЭВМ менять параметры и режимы и тем самым автоматизировать процессы. Методология системного подхода к автоматизации каждой локальной системы включает в себя изучение свойств, процессов и режимов работы с целью создания структурной модели и выбора наиболее целесообразных способов и средств управления.

За основу разработки структурной схемы ЭВГ можно взять модель автоматической системы управления технологическим процессом, которая включает в себя совокупность объекта управления и управляющей системы (рис. 1), в которой  $x_{1, 2, 3...n}$  – входные контролируемые параметры,  $y_{1, 2, 3...m}$  –

управляемые выходные параметры,  $U_{1, 2, 3...g}$  – управляющие сигналы,  $V, H$  – воздействия или сигналы от органов управления внешних устройств.

Современной элементной базой автоматизации оборудования являются микропроцессорные системы управления, реализуемые на основе однокристалльных микроЭВМ и интегральных микросхем.

Применительно к электролизно-водным генераторам, реализация законов формирования сигналов управления регулирующих органов, управление режимами работы электролизера и его защита по давлению, температуре, возникновению обратного удара, контролю и защиты элементов электрооборудования при средних и больших мощностях электролизно-водной установки может эффективно осуществляться современными микропроцессорными комплектами на базе микроконтроллеров, аналоговых и цифровых датчиков состояния, соответ-



ствующих аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей сигналов, дополнительных элементов цифровой логики, устройств отображения информации, исполнительных устройств, а также

устройств внешнего управления [1]. Все это в целом можно определить как электронная автоматическая управляющая система.

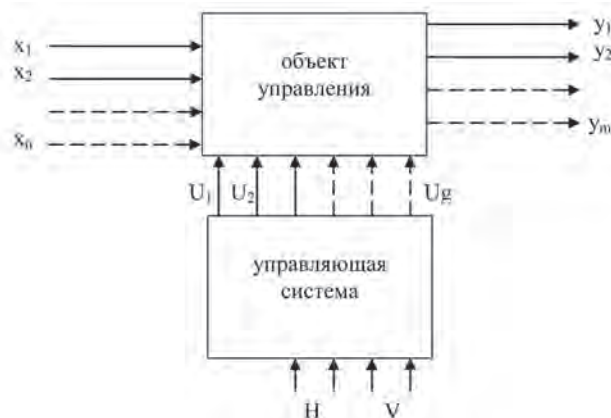


Рис. 1. Модель функциональной структурной автоматической системы управления

На рис. 2 представлена упрощенная структурно-функциональная система управления ЭВГ с применением микроЭВМ.

В соответствии с рисунком узел 1 представляет собой силовой регулирующий блок на полупроводниковых элементах, осуществляющий функции питания электролизера 2 в соответствии с принятой схемой регулирования мощности, а также отключение установки от электрической сети в случае возникновения аварийных ситуаций (возникновение обратного удара, отказ датчиков состояния или какой-либо сбой в системе управления). На электролизере 2 установлены датчики состояния 3, фикси-

рующие температуру электролизера, давление в самом электролизере и газотранспортной системе в целом, а также датчики возникновения волны обратного горения (обратный удар). Сигналы с датчиков через устройства сопряжения 7 поступают в микроЭВМ 6 и после соответствующей обработки опять через устройства сопряжения 5 – на исполнительные механизмы блоков 1 и 2 (включение и выключение устройства охлаждения электролизера, аварийное отключение, изменение параметров питания, включение клапана защиты от обратного удара и др.).



Рис. 2. Структурно-функциональная система управления ЭВГ с применением микроЭВМ

1 – пуско-регулирующий блок; 2 – электролизер с газотранспортной системой; 3 – датчики состояния; 5, 7 – устройства сопряжения по входу и выводу; 4 – исполнительное устройство защиты от обратного удара, 6 – управляющая микроЭВМ

Рассмотрим функциональную схему технологической автоматизированной установки для производства паяльно-сварочных работ. Устройство содержит электролизер, соединенный газопроводом с отстойником, водяным затвором, осушителем, барбатером с легковоспламеняющейся жидкостью, газосмесителем и горелкой. В блок управления

электролизером входят контактор, блок питания, регулятор мощности [2, 3].

Предлагаемое техническое решение [4] по сравнению с известными позволяет повысить эксплуатационную надежность и безопасность работы, причем улучшается технологический характер пламени, повышается стабильность работы электро-

лизера, автоматизация приводит как к повышению производительности за счет увеличения скорости сварки и точности, так и к повышению качества сварных соединений. Значительно упрощается процесс гашения пламени и повышения безопасности работы. Кроме того, при аварийном отключении электропитания не происходит подгорания горелки и проникновения обратного удара в шланги установки. Повышается надежность оборудования и повышается производительность сварки и пайки благодаря повышенной тепловой мощности пламени за счет высококалорийных добавок в гремучий газ; обладает сравнительно простой схемой автоматического управления, позволяющей безопасно осуществить весь технологический процесс. На рис. 3 представлена блок-схема усовершенствованного устройства. Устройство для газопламенной обработки содержит те же блоки. Отличие в том, что горючая смесь, выходящая из электролизера 4, по газопроводу проходит в отстойник 10, где осаждается неразрушительная пена, далее – через редукционный клапан 20, где осуществляется снижение давления до рабочей величины. Далее – через слой жидкости барбатера двойного действия (водяной затвор), где горючая смесь освобождается от влаги и через осушительный фильтр с пламегасителем поступает чистый гремучий газ через газосмеситель 15 в горелку 16. Кроме того,

часть гремучего газа проходит через второй барбатель двойного действия с легковоспламеняющейся жидкостью (ацетон, бензин, спирт) и насыщается ее парами. Очищенная горючая смесь по газопроводу подается через вентиль 14, на газосмеситель 15, на второй вход вентиля подается из источника 17 углеводородный газ (пропан  $C_3H_8$ ), который через газосмеситель 15 поступает в горелку 16.

Применение двух потоков горючего газа, один из которых остается «чистым», а другой насыщается в барбатере двойного действия легковоспламеняющейся жидкостью, и использование источника 17 с углеводородной смесью позволяет плавно регулировать состав горючей смеси в более широких пределах, чем достигается изменение температуры и активного характера пламени – от окислительного (избыток кислорода) до нормального (отсутствие свободного кислорода) и науглероженного (избыток паров углеводородных соединений).

Использование источника 17 с углеводородной смесью позволяет значительно уменьшить вероятность обратного удара, так как, во-первых, доля кислорода в смеси здесь значительно меньше, чем стехиометрическое соотношение для гремучего газа и, во-вторых, легко устанавливается скорость истечения газа перед соплом горелки значительно большей скорости распространения волны горения.

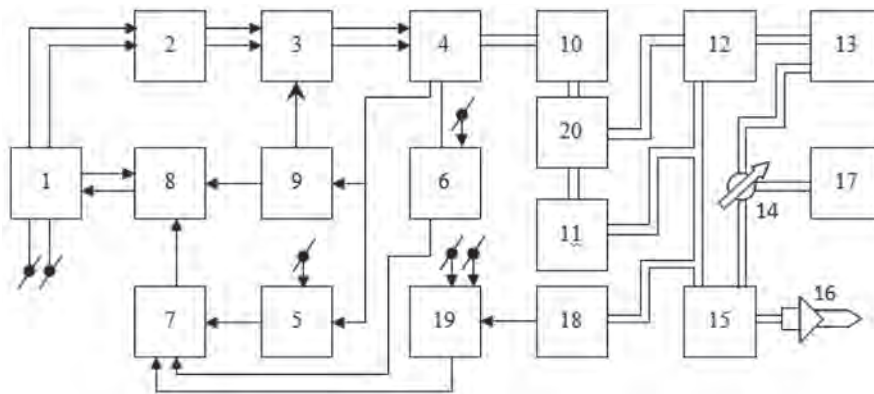


Рис. 3. Функциональная блок-схема модернизированной автоматизированной установки

- 1 – контактор; 2 – блок питания; 3 – регулятор мощности; 4 – электролизер; 5 – блок защиты по давлению; 6 – блок защиты по температуре; 7 – логическая схема «ИЛИ»; 8 – управляемый ключ; 9 – регулятор давления; 10 – отстойник; 11 – водяной затвор; 12 – осушитель; 13 – узел обогащения газовой смеси; 14 – вентиль; 15 – газосмеситель; 16 – горелка; 17 – источник газа углеводорода (пропан); 18 – датчик давления; 19 – блок защиты по давлению; 20 – редукционный клапан

Встраивание в газотранспортную систему редукционного клапана 20 позволяет разделить газотранспортную систему на две части, в одной из которых поддерживается значительно большее давление, что требуется для эффективной работы электролизера, в другой же – области низкого давления – поддерживается оптимальный режим для

насыщения углеводородными соединениями газовой смеси, а также для технологии процесса. Разбиение газотранспортной системы на области высокого и низкого давления приводит к существенному улучшению энергетических, а также габаритных и массовых характеристик электролизно-водного генератора.

Предполагаемое техническое решение, по сравнению с известными, позволяет повысить эксплуатационную надежность и безопасность работы. Благодаря улучшению условий очистки смеси улучшается технологический характер пламени, повышается стабильность работы электролизера, а автоматизация приводит как к повышению производительности за счет увеличения скорости сварки и точности, так и к повышению качества сварочных соединений. Повышается надежность оборудования, производительность сварки и пайки благодаря увеличению тепловой мощности пламени при сохранении массогабаритных показателей электролизно-водного генератора, который становится легко транспортируемым устройством, обладает сравнительно простой схемой автоматического управления, позволяющей безопасно осуществить весь технологический процесс.

Известно, что смеси водорода и кислорода становятся взрывоопасными, если в водороде содержится более 5,7% кислорода, а в кислороде более 5% водорода [5]. Из этого следует, что с целью обеспечения надежности и взрывобезопасности, а также с целью регулировки характера и параметров пламени целесообразно раздельное получение водорода и кислорода.

Функциональная схема системы управления и защиты установки на базе электролизно-водного генератора, построенная на базе рассмотренной выше функциональной схемы, с учетом ориентации

на раздельное получение кислорода и водорода и использование микроЭВМ для контроля и управления работой генератора, представлена на рис. 4.

Основным узлом установки является электролизер 4 монополярного типа, генерирующий кислород (на аноде) и водород (на катоде) [6].

Газы накапливаются раздельно в кислородной и водородной областях электролизера. Далее газы проходят кондиционирование (освобождаются от излишков влаги и паров щелочи) в устройствах 5, 6. С целью снижения энергетических затрат электролиз ведут при повышенном давлении в электролизере (обычно при  $0,3 \div 0,6$  МПа). Уровень высокого давления заканчивается управляемыми от микроЭВМ редукторами 7, 8, что позволяет программно регулировать мощность и химический состав (окислительный или восстановительный) для реализации заданного цикла или режима сварки и пайки. После редукторов газы раздельно проходят через устройства защиты от обратного удара 9, 10 и поступают через вентили ручного управления 11, 12 к горелке. Вентили выполняют активную функцию регулирования мощности и характера пламени в случае ручной сварки и пайки или их роль ограничивается функцией клапана в случае ведения процесса в автоматическом режиме, когда мощность и характер пламени изменяются с помощью ЭВМ по заданной программе посредством управляемых редукторов.

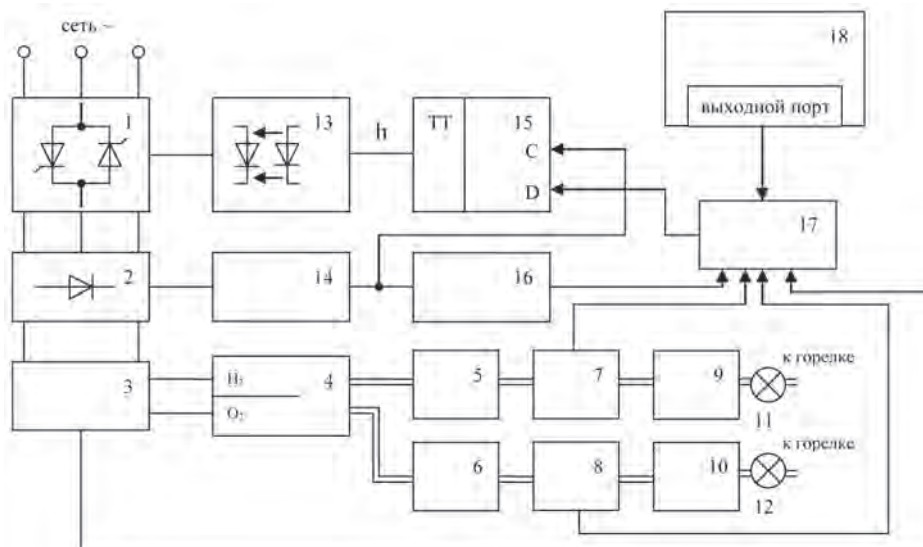


Рис. 4. Функциональная схема системы управления и защиты технологической установки на базе электролизно-водного генератора. 1 – тиристорный блок управления; 2 – выпрямительный блок; 3 – расходомер электроэнергии; 4 – электролизер; 5, 6 – устройство очистки газов; 7, 8 – редукторы газовые с электронным управлением; 9, 10 – устройство защиты от обратного удара и обрыва в газотранспортной системе; 11, 12 – вентили газовые; 13 – оптронная развязка; 14 – формирователь импульсов; 15 – триггер; 16 – счетчик; 17 – компаратор; 18 – микроЭВМ

Питание электролизера осуществляется через тиристорный контактор 1, объединяющий функции управления, защиты и коммутации, и выпрямительный мост 2, обеспечивающий сглаженный ток. Непосредственно на шины постоянного тока устанавливается датчик расхода электроэнергии 3, сигнал с которого контролируется на ЭВМ. Это позволяет после обработки сигнала на ЭВМ реализовать контроль расхода газа.

Выпрямленное пульсирующее напряжение поступает на вход формирователя импульсов 14, с выхода которого снимается сигнал в виде электрических импульсов, фронты которых начинаются с точки пересечения синусоид подводимого трехфазного напряжения. Увеличение напряжения с точки пересечения напряжений вызывают запоминание сигнала с выхода компаратора D в триггере и прибавление единицы к текущему содержимому счетчика. При переполнении счетчика он начинает счет с нуля, а затем опять пойдет следующее переполнение. Компаратор сравнивает n-разрядное положительное двоичное число N, поступающее от счетчика, с (n + 1) разрядным числом P, поступающим из порта микроЭВМ. Число определяет среднюю мощность нагрузки и остается стабильным до изменения мощности. Если  $N \geq P$ , то на выходе компарато-

ра формируется логическая «1», в противном случае – логический «0». С целью отключения электролизера от сети микроЭВМ записывает в выходной порт любое (n + 1) разрядное число, содержащее в старшем разрядке «1». При этом n-разрядные числа  $N < P$ , что соответствует «0» на выходе компаратора, который постоянно должен подтверждаться. Чтобы электролизер был включен и не отключался от сети, микроЭВМ записывает в выходной порт нулевой код ( $P = 0$ ). При этом условие  $N \geq P$  выполняется для любого кода в счетчике. На выходе компаратора имеем постоянно «1», и тиристорная система подключает электролизер к сети.

При дозированном включении электролизера с целью стабилизации давления микроЭВМ может задавать любые градации подаваемого на электролизер электропитания. Это обеспечивается записью в выходной порт чисел P, обеспечивающих режим дозирования. При подключении электролизера в произвольные моменты времени могут возникать кратковременные скачки тока, так как электролизер является активно-емкостной нагрузкой для сети.

Вместо компаратора можно использовать ПЗУ, с выхода которого может подаваться сигналы включения электролизера (рис. 5).

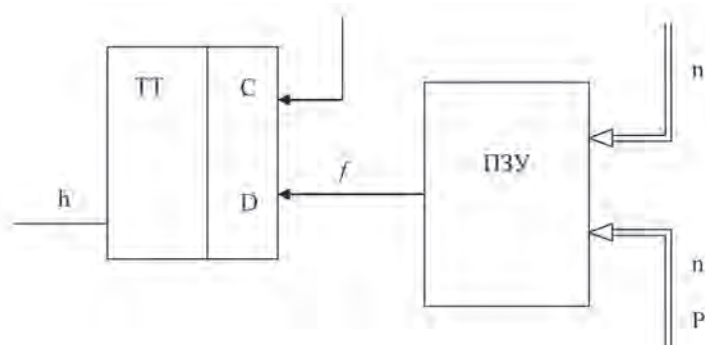


Рис. 5. Схема с ПЗУ вместо компаратора

Более эффективная схема блока, обеспечивающего программную реализацию регулирования режимов электролизера, может быть построена введением в состав микроЭВМ сетевого таймера. Для этого вход h оптронной развязки 13 изолируется от выхода D-триггера 15 и подключается непосредственно к одному из разрядов выходного порта микроЭВМ. Опираясь на фиксированное значение P и текущее N, процессор каждый раз отыскивает в ПЗУ нужный бит и передает в выходной порт.

На рис. 6 представлены основные узлы принципиальной электрической схемы системы управления, защиты и контроля ЭВГ постоянной на базе микроконтроллера PIC16F84A.

В качестве датчика температуры в схеме ис-

пользован DS18B20, работающий в диапазоне температур от  $-50$  до  $+125$  °C. Выходной сигнал датчика в цифровой форме, так что он может быть непосредственно подключен к микроконтроллеру (уровни сигналов также согласуются). В качестве датчиков давления используются уже проверенные нами ранее релейные сигнализаторы давления типа МСТ. Рабочий – на давление до 3 атм (0,3 МПа). Аварийного отключения – до 6 атм (0,6 МПа). В качестве сигнализаторов состояния электролизера по температуре используются светодиоды: синий D1 – холодный электролизер, зеленый D2 – температура достигла оптимальной величины (80 °C) и красный D3 – перегрев электролизера ( $T > 85$  °C).

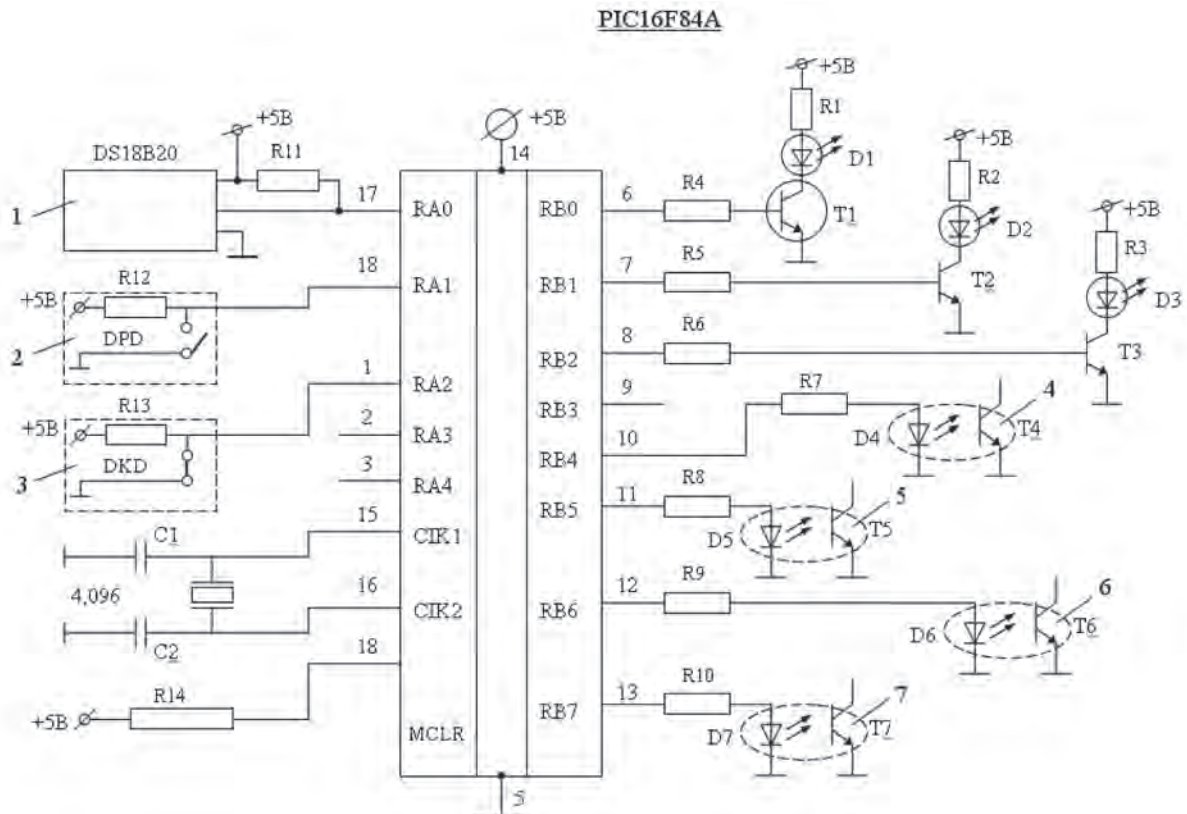


Рис. 6. Схема системы управления защиты и контроля ЭВГ на базе PIC16F84A

1 – датчик температуры DS18B20 с цифровым выходом; 2 – электрическая схема сигнализатора рабочего давления (DPD); 3 – электрическая схема сигнализатора критического давления (DKD); 4 – схема включения системы охлаждения; 5 – схема рабочего включения и отключения питания электролизера; 6 – схема аварийного отключения ЭВГ по температуре; 7 – схема аварийного отключения ЭВГ по давлению

В качестве развязывающих и усилительных элементов в каналах управления исполнительными механизмами используются транзисторные оптроны (Т 4, 5, 6, 7).

*Список литературы*

1. Варламов И.В. Системы электропитания и управления электролизно-водными генераторами: Монография [Текст] / И.В. Варламов, Н.А. Феоктистов. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2011. – 202 с.
2. Феоктистов Н.А. Перспективы создания и применения бытовых электротехнологических установок на базе электролизно-водного генератора [Текст] / Н.А. Феоктистов // Научный журнал «Теоретические и прикладные проблемы сервиса». – 2001. – № 1.
3. Патент № 2014185 Российская Федерация, МПК7B23K5/00, C25B15/02. Устройство для газопламенной обработки материалов [Текст] / И.В. Варламов, Н.А. Феоктистов и др.; заявитель

и патентообладатель В. Варламов, Н.А. Феоктистов и др. – № 5055042/08; заявл. 16.07.1992; опубл. 15.06.1994.

4. Патент № 2447976 Российская Федерация, МПК7B23K5/00, C25B1/12. Устройство для газопламенной обработки материалов [Текст] / И.В. Варламов, Д.Л. Михайлюк, Н.А. Феоктистов, В.Д. Ходжаев; заявитель и патентообладатель ОАО «Научно-исследовательский институт точных приборов» (RU). – № 2010136415/02; заявл. 02.09.2010; опубл. 20.04.2012. – Бюл. № 11.

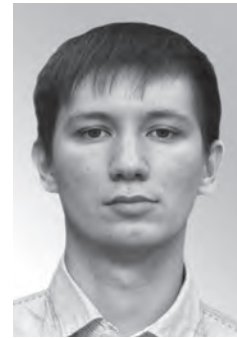
5. Электротехнологические промышленные установки. Учебник для вузов [Текст] / И.П. Евтюкова, Л.С. Кацевич, Н.М. Некрасова, А.Д. Свенчанский; под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400 с.

6. Феоктистов Н.А. Электролизно-водные генераторы кислородно-водородной смеси для сварки и пайки [Текст] / Н.А. Феоктистов, А.А. Тиканов, Е.В. Ларин, А.Н. Феоктистов // Естественные и технические науки. – 2008. – № 6 (38). – С. 292–297.



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

кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Электротехника и электрооборудование  
предприятий» Уфимского государственного  
нефтяного технического университета,  
Россия, г. Уфа



**Шафиков И.Н.**  
**Shafikov I.N.**

аспирант кафедры «Электротехника и элек-  
трооборудование предприятий» Уфимского  
государственного нефтяного технического  
университета, Россия, г. Уфа

УДК 681.5:502:622.276

## АНАЛИЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ДОБЫЧЕ НЕФТИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫМИ НАСОСАМИ

В статье рассматривается структура потребления электроэнергии при скважинной добыче нефти установками электроцентробежных насосов. Электроцентробежными насосами оснащено свыше 54% всего фонда скважин РФ, при этом из этих скважин извлекается 75% всей добываемой нефти. Анализируются потери во всех элементах насосной установки: электродвигателе, кабельной линии, трансформаторе, станции управления и центробежном насосе. Приводятся результаты расчета потерь для одной из скважин. Установлено, что на подъем скважинной жидкости расходуется не более 20...30% от потребляемой электроэнергии, потери в насосе составляют до 50%, а в электродвигателе – до 15%. Потери в остальных элементах насосной установки (в кабельной линии, трансформаторе, станции управления, протекторе) менее значительны. Рассматриваются способы оптимизации потребления электроэнергии скважинными насосами, такие как использование вентильных двигателей и интеллектуальных станций управления.

*Ключевые слова:* электроцентробежный насос, погружной электродвигатель, энергопотребление, потери мощности, нефтяная скважина.

## ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION OF ARTIFICIAL LIFT USING ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMPS

The paper describes the structure of electricity consumption of electric submersible pumps. Electric submersible pumps are on more than 54% of the wells of the Russian Federation, thus from these wells recovered 75% of all oil. Analyzed the loss of all elements of the pumping unit: the motor, the cable line, transformer, control stations and centrifugal pump. The article presents the results of calculation of loss to one of the wells. Found that to lift wellbore fluids consumed less than 20 ... 30% of the consumed electric power, loss in the pump up to 50%, and a motor - 15%. Losses in the rest of the elements of pump installation (cabling, transformers, control stations, the protector) are less significant. Discusses how to optimize power consumption of oil production, such as the use of Permanent Magnet Synchronous Motors and smart control stations.

*Key words:* electric submersible pump, submersible motor, powerconsumption, power, power loss, oilwell.

В настоящее время вопросы энерго- и ресурсосбережения стали особенно актуальными практически во всех отраслях промышленности. Не являются исключением и предприятия топливно-энергетического комплекса, которые занимаются добычей, подготовкой, транспортом и переработкой нефти и газа. Нефтегазодобывающие предприятия (НГДП) вынуждены разрабатывать и внедрять

целые комплексы энергосберегающих мероприятий. Проводится энергоаудит всех технологических процессов с целью определения звеньев, где эффективность использования энергетических ресурсов недостаточно высока и имеется потенциал для сбережения.

С этой целью на промышленных предприятиях стали широко внедряться автоматизированные системы коммерческого и технического учета электроэнергии – АСКУЭ и АСТУЭ, позволяющие вести непрерывный мониторинг эффективности потребления электроэнергии различным оборудованием.

Структура потребления электроэнергии нефте-

газодобывающим предприятием приведена на рисунке 1. Самым энергоемким технологическим процессом на всех НГДП является механизированная добыча нефти скважинными насосами – до 55...62% от общего потребления электроэнергии [1]. Среди нефтедобывающих скважин основным способом эксплуатации является использование электроцентробежных насосов (ЭЦН). Свыше 54% всего фонда скважин в РФ эксплуатируется ЭЦН, при этом из этих скважин извлекается около 75% всей добываемой нефти [2]. Поэтому оптимизация технологических процессов механизированной добычи нефти при помощи ЭЦН может дать значительный эффект энергосбережения для предприятия в целом.

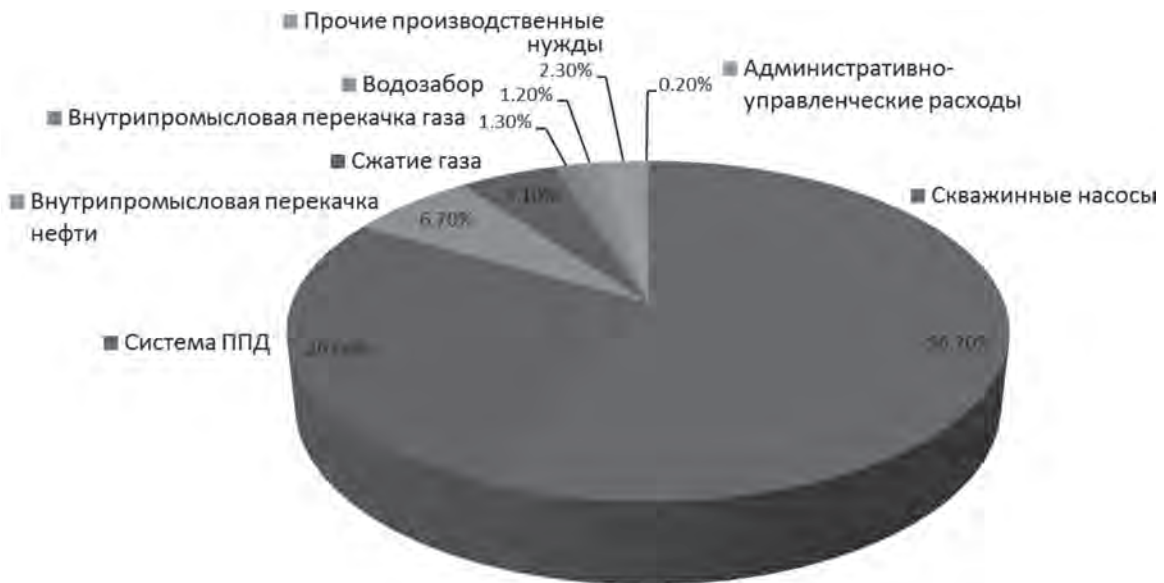


Рис. 1. Структура потребления электроэнергии различными технологическими процессами на НГДП

При планировании потребления электроэнергии предприятием, а также для оценки эффективности ее использования необходимо провести анализ потребления электроприводами скважинных насосов. Для этого нужно иметь методику расчета потребления электроэнергии в зависимости от установленного оборудования и технологических параметров скважины.

Структура потерь электроэнергии в узлах установки ЭЦН приведена на рисунке 2.

$$P_{\Sigma} = P_{\text{пм}} + \Delta P_{\text{цн}} + \Delta P_{\text{пу}} + \Delta P_{\text{пр}} + \Delta P_{\text{пэд}} + \Delta P_{\text{кл}} + \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{су}} + \Delta P_{\text{сф}} + \Delta P_{\text{вф}} \quad (1)$$

Первые пять слагаемых в выражении (1) образуют мощность, потребляемую двигателем:

$$\Delta P_{\text{пэд}} = P_{\text{пм}} + \Delta P_{\text{цн}} + \Delta P_{\text{пу}} + \Delta P_{\text{пр}} + \Delta P_{\text{пэд}} \quad (2)$$

Полезная мощность  $P_{\text{пм}}$ , расходуемая насосом на подъем скважинной жидкости, зависит от очень многих факторов: подачи насоса, плотности жидкости, динамического уровня, буферного и затрубного давлений, гидравлического сопротивления НКТ,

Как видно из рисунка 2, потребляемая установкой ЭЦН мощность складывается из полезной мощности  $P_{\text{пм}}$ , расходуемой насосом на подъем скважинной жидкости, а также потерь во всех элементах установки: в насосе  $\Delta P_{\text{цн}}$ , в предвключенном устройстве  $\Delta P_{\text{пу}}$ , в протекторе  $\Delta P_{\text{пр}}$ , в погружном электродвигателе  $\Delta P_{\text{пэд}}$ , в кабельной линии  $\Delta P_{\text{кл}}$ , в трансформаторе  $\Delta P_{\text{тр}}$ , в станции управления  $\Delta P_{\text{су}}$ , а также в сетевом  $\Delta P_{\text{сф}}$  и входном  $\Delta P_{\text{вф}}$  фильтрах при их наличии:

давления насыщения, газосодержания и других [3]. Поэтому точность расчета полезной мощности будет определяться полнотой имеющихся данных о параметрах скважины и режимах работы оборудования.

Потери мощности в насосе  $\Delta P_{\text{цн}}$  определяются его коэффициентом полезного действия (КПД). При этом КПД центробежного насоса меняется в зави-

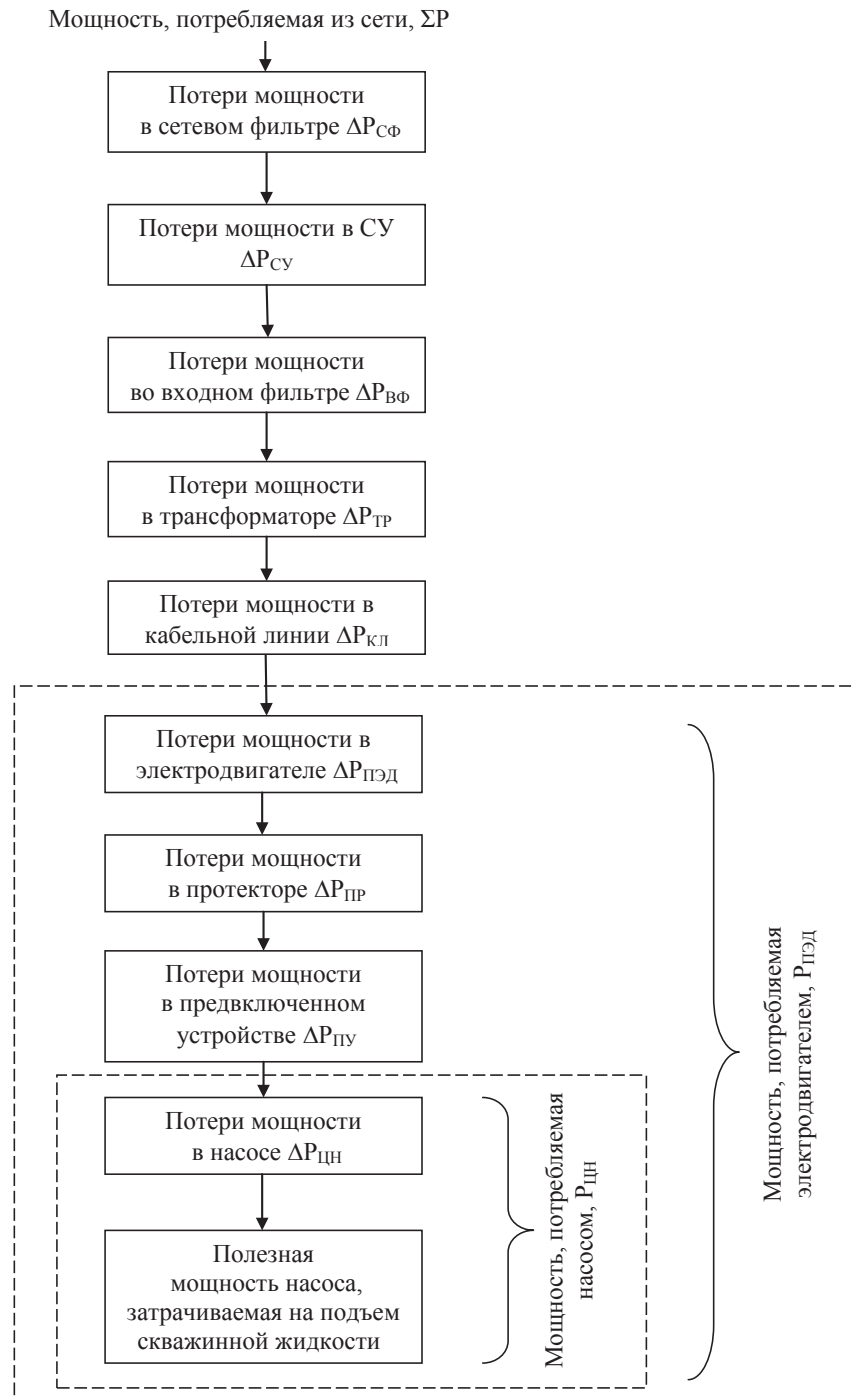


Рис. 2. Структура потерь мощности в установке ЭЦН

симости от производительности, достигая максимума в номинальном режиме. Поэтому для определения КПД ЭЦН при данной производительности необходимо использовать характеристику насоса.

Потери мощности в таких элементах, как предвключенные устройства  $\Delta P_{пу}$ , протектор  $\Delta P_{пр}$ , станция управления  $\Delta P_{су}$ , сетевой  $\Delta P_{сф}$  и входной  $\Delta P_{вф}$  фильтры, берутся из заводской документации. При ее отсутствии могут быть взяты типовые значения исходя из установленной мощности.

Потери в двигателе  $\Delta P_{пэд}$  также определяют-

ся его КПД, который изменяется в зависимости от загрузки. Значение КПД двигателя при данной загрузке находится по рабочим характеристикам двигателя.

Потери мощности в кабеле  $\Delta P_{кл}$  составляют значительную часть в общем энергопотреблении установки ЭЦН. Потери мощности в кабельной линии пропорциональны квадрату тока [4]:

$$\Delta P_{кл} = \frac{1,732 \cdot \rho \cdot L_{каб} [1 + \alpha(t - 20)] \cdot I^2}{F}, \quad (3)$$



где  $\rho$  – удельное сопротивление материала кабеля, Ом·м (для меди  $\rho = 0,0195 \cdot 10^{-6}$  Ом·м);  $\alpha$  – температурный коэффициент расширения меди (для меди  $\alpha = 0,0041$ );  $L_{каб}$  – длина кабеля, м;  $t$  – средняя температура кабеля, °С;  $I$  – рабочий ток, А;  $F$  – площадь поперечного сечения жилы, м<sup>2</sup>.

Потери мощности в двухобмоточном трансформаторе складываются из потерь в стали и меди:

$$\Delta P_{ТР} = \Delta P_X + \Delta P_{МД} = \Delta P_X + \Delta P_K \left( \frac{S}{S_{НОМ}} \right)^2, \quad (4)$$

где  $\Delta P_X$  – потери холостого хода, приведенные в паспортных данных, Вт;  $\Delta P_{МД}$  – потери в меди, Вт;

$\Delta P_K$  – потери короткого замыкания, приведенные в паспортных данных, Вт;  $S$  – мощность нагрузки трансформатора, В·А;  $S_{НОМ}$  – номинальная полная мощность трансформатора, В·А.

Результаты расчета потерь мощности в элементах установки ЭЦН с использованием формул (1), (2), (3) и (4) для скважины № 1608 приведены в таблице 1. На рисунке 3 приведена диаграмма, показывающая процентное распределение потерь мощности между элементами установки. Следует отметить, что в данной конфигурации скважины отсутствуют предвключенные устройства и фильтры.

Таблица 1

Потери мощности по элементам установки ЭЦН для скважины № 1608

Элемент, в котором происходят потери мощности	Обозначение	Значение	
		кВт	%
Полезная мощность	$P_{ПМ}$	4,77	22,7
Потери в насосе	$\Delta P_{ЦН}$	9,90	47,0
Мощность протектора	$\Delta P_{ПР}$	0,40	1,9
Потери в двигателе	$\Delta P_{ПЭД}$	2,60	12,3
Потери в кабельной линии	$\Delta P_{КЛ}$	1,36	6,5
Потери в трансформаторе	$\Delta P_{ТР}$	1,58	7,5
Потери в станции управления	$\Delta P_{СУ}$	0,44	2,1
Общее энергопотребление установки	$\Sigma P$	21,05	100,0

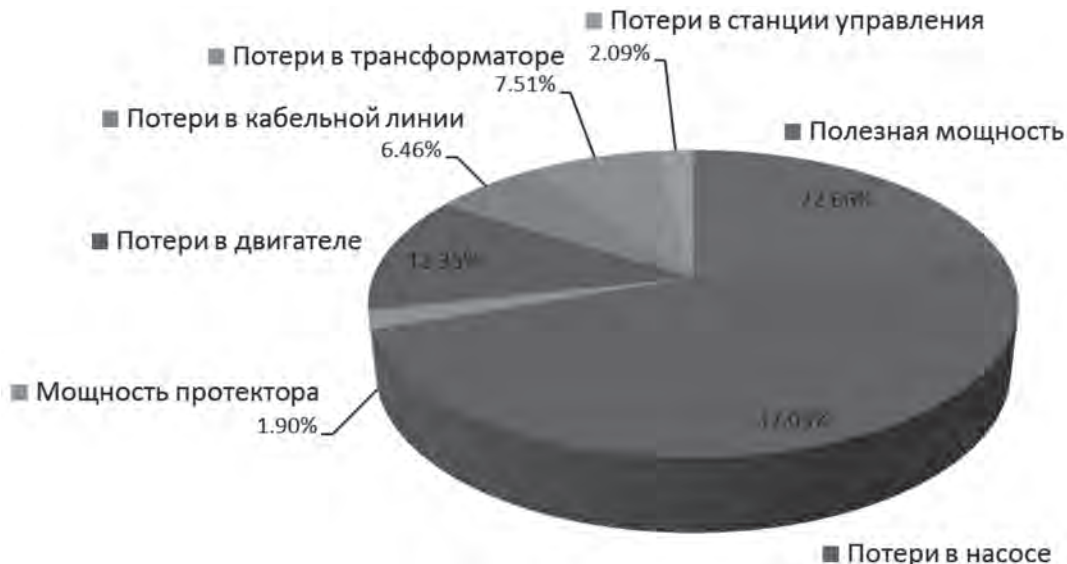


Рис. 3. Диаграмма потерь мощности по элементам установки ЭЦН для скважины № 1608

Как видно из диаграммы на рисунке 3, полезная мощность, которая расходуется непосредственно на подъем скважинной жидкости, составляет лишь 22,7% от общего энергопотребления установки ЭЦН. При этом потери в центробежном насосе

(47% от общего потребления) более чем в два раза превосходят полезную мощность. Это обусловлено относительно низким КПД центробежного насоса при данной подаче – 32%. Также значительную часть в энергопотреблении установки составля-

ют потери в двигателе (12,3%), в кабельной линии (6,4%) и в трансформаторе (7,5%). Мощность, потребляемую протектором, и потери в станции управления можно считать незначительными (1,9 и 2,0% соответственно).

Приведенное распределение потерь мощности для скважины № 1608 можно считать типичным для скважин, эксплуатируемых установками ЭЦН. Высокие затраты электроэнергии на механизированную добычу углеводородного сырья заставляют нефтедобывающие предприятия искать пути оптимизации энергопотребления. Основными направлениями совершенствования установок ЭЦН являются внедрение частотно-регулируемого привода, использование блоков погружной телеметрии, а также замена асинхронных электродвигателей на вентильные. Блоки погружной телеметрии передают на поверхность информацию о технологических параметрах на забое скважины, что позволяет подобрать оптимальный режим эксплуатации для каждой конкретной скважины. Вентильные электродвигатели имеют КПД на 6...8% выше, чем асинхронные [5], что, соответственно, снижает потери в двигателе, потребляемую мощность и ток. Благодаря снижению тока также сокращаются и остальные потери: в кабеле, трансформаторе и станции управления.

Существенным фактором оптимизации режимов работы установок ЭЦН является использование интеллектуальных станций управления с контроллерами, управляющими работой электроприводов [6, 7].

Таким образом, могут быть сделаны следующие выводы:

1. Скважинная механизированная добыча нефти является самым энергоемким технологическим процессом на НГДП, а следовательно обладает наибольшим потенциалом для внедрения оптимизационных энергосберегающих мероприятий.

2. Среди способов механизированной добычи нефти наиболее актуальным для оптимизации энергопотребления является использование ЭЦН, так как этим способом эксплуатируется большая часть фонда скважин РФ (свыше 54%), которые

дают до 75% всей добываемой нефти.

3. При работе установки ЭЦН полезная мощность, расходуемая на подъем скважинной жидкости, составляет лишь 20...25% от общего потребления, тогда как потери в центробежном насосе могут достигать 47% и выше. Значительные потери мощности также имеют место в двигателе (12%), кабельной линии (6%) и трансформаторе (7%).

4. Снижение потребляемой двигателем мощности уменьшает потери в последующих элементах установки: кабеле, трансформаторе, станции управления из-за снижения тока.

#### Список литературы

1. *Ивановский В.Н.* Энергетика добычи нефти: основные направления оптимизации энергопотребления [Текст] / В.Н. Ивановский // Инженерная практика. – 2011. – № 6. – С. 18–26.

2. *Маркетинговое* исследование рынка установок штанговых глубинных насосов (УШГН). Аналитический отчет. Research.Techart. 2010 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.techart.ru/files/research/walking-beam-pumping-unit.pdf>.

3. *Мищенко И.Т.* Скважинная добыча нефти: Учебное пособие для вузов [Текст] / И.Т. Мищенко. – М.: ФГУП «Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 816 с.

4. *Ивановский В.Н.* Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти [Текст] / В.Н. Ивановский, С.С. Пекин, А.А.Сабиринов. – М.: ГУП «Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 256 с.

5. *Сайт* ООО «РИТЭК-ИТЦ» [Электронный ресурс]. – URL: <http://ritek-itc.ru/info/faq#20110125-20>.

6. *Искужин Р.В.* Анализ и синтез алгоритмов управления нефтедобывающей скважины на базе электрического центробежного насоса [Текст] / И.Ф. Нугаев, Р.В. Искужин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – т. 9.– № 1. – С. 18–20.

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



**Шабанов В.А.**  
**Shabanov V.A.**

*кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий» Уфимского государственного нефтяного технического университета, Россия, г. Уфа*



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

*аспирант Уфимского государственного нефтяного технического университета, Россия, г. Уфа*

УДК 621.31; 62-83

## **ТРЕБОВАНИЯ К ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ НАСОСОВ ПРИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ\***

При разработке частотно-регулируемых электроприводов для магистральных насосных агрегатов нефтеперекачивающих станций необходимо рассматривать все насосные агрегаты технологического участка и их частотно-регулируемые электроприводы как компоненты единого технологического процесса. При разработке требований к частоте вращения частотно-регулируемых насосных агрегатов эта задача трансформируется в задачу выбора нефтеперекачивающих станций, на которых целесообразна установка частотно-регулируемых электроприводов. В статье рассматриваются требования к частоте вращения магистральных насосов. Приведены ограничения, обусловленные особенностями технологического процесса перекачки, а также свойствами частотного регулирования. Все ограничения, обусловленные требованиями технологического режима, представлены в функции частоты вращения магистральных насосных агрегатов. Приведены аналитические выражения для выбора частоты вращения регулируемых насосных агрегатов как с учетом требуемых значений производительности нефтепровода, так и с учетом требований к допустимому диапазону частоты вращения.

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

## **REQUIREMENTS TO THE SPEED OF THE PUMPS WITH FREQUENCY-ADJUSTABLE ELECTRIC DRIVE**

During the development of variable frequency drives of main pump units at oil booster stations must consider all pump units of processing area and variable frequency drives as components of a single process. The development of requirements to the speed frequency-adjustable pumping units this task is transformed into the problem of the choice of pump stations, where feasible installation of variable frequency drives. The article discusses the requirements for frequency of rotation of the main pumps. Are the limitations, determined by the peculiarities of the technological process pumps as well as properties of frequency regulation, are given. All restrictions imposed by the requirements of the technological regime, represented as a function of frequency of rotation of main pump units of technological site. The analytical expressions for the selection of the frequency of rotation adjustable pump units with the required values of the performance of the oil pipeline, and the requirements for permissible speed range.

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

*\*При подготовке статьи использованы результаты исследований, выполненных при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по программе «Разработка и организация серийного производства мощных высоковольтных частотно-регулируемых приводов (ВЧРП)» (шифр 2010-218-02-051, договор № 13.G25.31.0060).*

Магистральные нефтепроводы являются одним из самых сложных и энергоемких технологических объектов нефтегазовой отрасли. Поэтому разработка энергосберегающих частотно-регулируемых электроприводов (ЧРЭП) для нефтеперекачивающих станций (НПС) магистральных нефтепроводов является особенно актуальной [1, 2, 3]. Магистральные нефтепроводы для перекачки нефти делятся на технологические участки, в пределах которых режимы работы всех НПС взаимосвязаны. Поэтому при разработке частотно-регулируемых электроприводов (ЧРЭП) для магистральных насосных агрегатов (НА) НПС необходимо рассматривать все ЧРЭП и все НА технологического участка как компоненты единого технологического процесса. Технологический участок магистрального нефтепровода содержит до шести НПС. На каждой НПС в работе может быть до трех НА. На каждом НА всех НПС устанавливать ЧРЭП нецелесообразно как по экономическим соображениям, так и с точки зрения обеспечения всех режимов перекачки и требуемого диапазона регулирования [4, 5, 6]. Поэтому актуальной задачей является минимизация числа ЧРЭП на НПС технологического участка. При решении такой задачи одной из главных проблем становится выбор места установки ЧРЭП вдоль трассы технологического участка. Эта задача должна решаться как при проектировании нефтепроводов, так и при реконструкции действующих нефтепроводов. Для действующего нефтепровода эта задача трансформируется в задачу выбора НПС, на которых целесообразна установка ЧРЭП [7]. В статье рассматриваются требования к частоте вращения НА, которые необходимо учитывать при выборе НПС технологического участка для установки ЧРЭП НА.

Основная задача частотного регулирования – обеспечивать заданную производительность трубопровода при выполнении ограничений по напорам и подпорам. При системе перекачки из насоса в насос технологический режим перекачки описывается уравнением баланса напоров [8]. Обозначим число НА, участвующих в режиме перекачки нефти по технологическому участку, через  $n$ . Тогда в общем случае при  $k$  регулируемых насосах уравнение баланса напоров можно записать в виде

$$\sum_{i=1}^k (a_{pi} \cdot v_i^2) - \left( \sum_{i=1}^k b_{pi} \right) \cdot Q^{2-m} + A_k - B_k Q^{2-m} = 0, \quad (1)$$

где  $a_{pi}$ ;  $b_{pi}$  – коэффициенты напорной характеристики регулируемых насосов;  $v = \omega/\omega_{НОМ}$  – относительная частота вращения  $i$ -го НА;  $\omega$  и  $\omega_{НОМ}$  – текущая и номинальная угловые скорости вращения насоса;  $Q$  – производительность нефтепровода;  $A_k$  и  $B_k$  – коэффициенты уравнения баланса напоров нефтепро-

вода в режиме работы при  $k$  отключенных МН:

$$A = a_{п} + \sum_{i=1}^{n-k} a_i - \Delta z - h_{ост}, \quad (2)$$

$$B = 1,02 fL + \left[ \frac{b_{п}}{m_{п}^{2-m}} \right] + \sum_{i=1}^{n-k} b_i, \quad (3)$$

где  $a_{п}$ ,  $b_{п}$ ,  $a_i$ ,  $b_i$  – коэффициенты напорных характеристик подпорного и магистрального насосов;  $m_{п}$  – число работающих подпорных насосов;  $\Delta z$  – разность геодезических отметок по концам технологического участка;  $h_{ост}$  – остаточный напор в конце технологического участка;  $m$  – коэффициент режима перекачки;  $f$  – гидравлический уклон при единичной производительности;  $L$  длина трубопровода.

При заданной производительности трубопровода уравнение (1) представляет собой уравнение с  $k$  неизвестными частотами вращения НА. Оно имеет множество решений. Для поиска оптимального решения используются оптимизационные алгоритмы, из которых наибольшее распространение получил метод перебора возможных вариантов [1], а также метод покоординатного спуска и градиентные методы [9]. Используются также генетические алгоритмы и нейронные сети [10].

Обычно оптимизационным путем определяются частоты вращения  $k-1$  регулируемых насосов. Частота вращения  $k$ -го НА определяется путем решения уравнения (1) относительно частоты вращения  $v_k$ , при известных скоростях вращения всех других  $k-1$  регулируемых НА по выражению:

$$v_k = \sqrt[2]{\frac{\left( \sum_{i=1}^k (b_{pi}) + B_k \right) \cdot Q^{2-m} - A_k - \sum_{i=1}^{k-1} (b_{pi})}{a_{pk}}}. \quad (4)$$

Число режимов перекачки определяется картой технологических режимов работы технологического участка нефтепровода, а их последовательность – графиком поставки нефти. В процессе эксплуатации последовательность режимов перекачки и их параметры регистрируются в сведениях о соблюдении режимов работы технологического участка. В течение года число режимов может достигать нескольких сотен. Поэтому для выбора оптимального числа частотно-регулируемых НА и выбора НПС, на которых целесообразно установить ЧРЭП, необходимо многократно использовать уравнения (1) и (4). При выборе НПС, на которых целесообразно установить ЧРЭП, необходимо учитывать ограничения по напорам и подпорам, обусловленные особенностями технологического процесса перекачки, а также свойства частотного регулирования НА [4, 6, 7]. При этом выбор места установки ЧРЭП дол-

жен производиться одновременно с выбором частоты вращения НА. Поэтому в алгоритме поиска оптимального решения уравнения (1) все ограничения, обусловленные требованиями технологического режима, целесообразно представить в функции частот вращения НА. Рассмотрим основные из ограничений и их представление в функции частоты вращения НА технологического участка.

1. При выборе НПС для установки ЧРЭП и выборе частоты вращения регулируемых НА необходимо проверять ограничения по минимальным подпорам на входе НПС и максимальным напорам на выходе НПС [8]:

$$H_{ПСi} = \Delta H_i + \Sigma H_{\text{нер},i} + \Sigma (a_{pi} \cdot v^2 - b_{pi} \cdot Q^{2-m});$$

$$\Delta H_{i+1} = H_{ПСi} - H_{i,i+1} = \Delta H_i + \Sigma H_{\text{нер},i} + \Sigma (a_{pi} \cdot v^2 - b_{pi} \cdot Q^{2-m}) - H_{i,i+1},$$

где  $H_{i,i+1}$  – потери напора между  $i$ -й и  $i+1$ -й станциями.

С учетом полученных выражений для того, чтобы величины напоров на выходе  $i$ -й станции  $H_{ПСi}$  и подпор  $\Delta H_{i+1}$  на входе  $i+1$  станции удовлетворяли ограничениям (5), относительные частоты вращения МН должны удовлетворять следующим условиям:

$$\Delta H_i + \Sigma H_{\text{нер},i} + \Sigma (a_{pi} \cdot v^2 - b_{pi} \cdot Q^{2-m}) \leq H_{\text{max},i}, \quad (7)$$

$$\Delta H_i + \Sigma H_{\text{нер},i} + \Sigma (a_{pi} \cdot v^2 - b_{pi} \cdot Q^{2-m}) - H_{i,i+1} \geq \Delta H_{\text{min},i}. \quad (8)$$

2. Необходимо учитывать ограничения, накладываемые наличием перевальных точек на топографическом профиле трассы нефтепровода. Величины напоров  $H_{П}$  в местах расположения возможных перевальных точек должны удовлетворять условию [8]:

$$H_{Пi} \geq h_{Пi}, \quad (9)$$

где  $h_{Пi}$  – геодезическая отметка  $i$ -й перевальной точки на трассе нефтепровода.

С учетом выражения (6) условие (9) может быть преобразовано к виду:

$$H_i + \Sigma H_{\text{нер},i} + \Sigma (a_{pi} \cdot v^2 - b_{pi} \cdot Q^{2-m}) - H_{i,П} \geq h_{Пi}, \quad (10)$$

где  $H_{i,П}$  – потери напора от  $i$ -й станции до перевальной точки.

3. Необходимо учитывать, что диапазон регулирования частоты вращения НА ограничен не только неравенствами (7), (8) и (10), но и особенностями технологии перекачки нефти по магистральным нефтепроводам. При этом рабочий диапазон изменения частоты вращения НА ограничен снизу минимально допустимой частотой рабочего диапазона:

$$v_i \geq v_{\text{мин}}. \quad (11)$$

При снижении частоты вращения НА ниже минимально допустимого значения  $v_{\text{мин}}$  открывается обратный клапан в обвязке насоса. При этом насос

$$H_{ПСi} \leq H_{\text{max},i}; \Delta H_i \geq \Delta H_{\text{min},i}, \quad (5)$$

где  $H_{\text{max},i}$ ,  $\Delta H_{\text{min},i}$  – разрешенные значения напоров и подпоров  $i$ -й НПС.

Выразим напоры на выходе и подпоры на входе НПС через скорость вращения НА. Для этого напорную характеристику насоса при ЧРЭП запишем в виде

$$H = a_p \cdot v^2 - b_p \cdot Q^{2-m}, \quad (6)$$

где  $a_p$  и  $b_p$  – коэффициенты аппроксимации напорной характеристики регулируемого насоса.

С учетом (6) напор на выходе  $i$ -й станции  $H_{ПСi}$  и подпор  $\Delta H_{i+1}$  на входе  $i+1$  станции будут:

«выключается» из процесса перекачки и перестает влиять на производительность трубопровода.

Нижний предел рабочего диапазона частоты вращения может быть найден из уравнения [5]:

$$v_{\text{мин}} = \sqrt{\frac{b_p \cdot Q^{2-m}}{a_p}}, \quad (12)$$

где  $Q$  – производительность трубопровода при отключенном регулируемом насосе, для которого исследуется диапазон частоты вращения.

4. Число ЧРЭП на технологическом участке должно быть минимальным. Поэтому проверку всех требований и выбор частоты вращения следует начинать с возможности установки ЧРЭП только на одном из НА технологического участка. При использовании ЧРЭП на одном из НА, решая уравнение баланса напоров (1) относительно скорости вращения регулируемого насоса при  $k = 1$ , или из уравнения (4) при  $k = 1$  можно найти зависимость производительности трубопровода от скорости вращения в виде:

$$Q = \sqrt[2-m]{\frac{a_p \cdot v^2 + A}{b_p + B}}, \quad (13)$$

где значения  $A$  и  $B$  определяются по выражениям (2) и (3) при  $k = 1$ .

Выражение (13) позволяет определить диапазон значений производительности нефтепровода  $Q$ , который может быть обеспечен в рабочем диапазоне частоты вращения регулируемого НА по (11), при условии, что при этом выполняются ограничения (7), (8) и (10).

5. Если не все требуемые режимы технологического участка обеспечиваются по выражению (13) или если при регулировании только одного из НА технологического участка нарушается одно из

ограничений (7), (8) или (10), то следует рассмотреть установку ЧРЭП на двух НПС. При этом возможно либо независимое регулирование режимов перекачки с помощью только одного НА на одной из НПС, либо одновременное регулирование НА на двух НПС. При одновременном частотном регулировании двух МН уравнение баланса напоров (1) будет

$$a_{p1} \cdot v_1^2 + a_{p2} \cdot v_2^2 - (b_{p1} + b_{p2}) \cdot Q^{2-m} + A_2 - B_2 Q^{2-m} = 0, \quad (14)$$

где  $a_{p1}$ ;  $a_{p2}$ ;  $b_{p1}$  и  $b_{p2}$   $v_1$  и  $v_2$  – коэффициенты напорной характеристики и частоты вращения первого и второго регулируемых насосов;  $A_2$  и  $B_2$  – коэффициенты уравнения баланса напоров при двух отключенных НА.

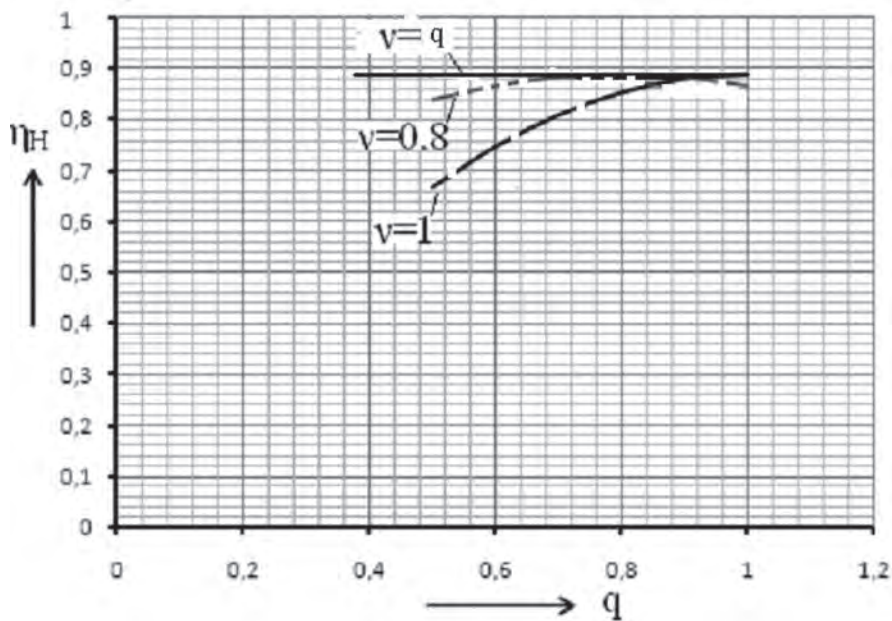


Рис. 1. Изменение КПД насоса при изменении подачи

Для регулируемых насосов КПД зависит не только от подачи, но и от скорости вращения [9, 11]. Эта зависимость может быть представлена в виде:

$$\eta_n = \eta_{ном} - (q - v)^2 \cdot \eta_{ном} \cdot v^2, \quad (15)$$

где  $\eta_{ном}$  – номинальный КПД насоса;  $q = Q/Q_{ном}$  – относительное значение подачи насоса;  $Q_{ном}$  – номинальная подача.

На рис. 1 приведены графики изменения КПД насоса НМ-10000-210, построенные по выражению (15) для нескольких фиксированных значений скорости вращения ( $v = 1,0$ ;  $v = 0,8$ )  $q$  [12], а также при переменном значении  $v = q$ . При снижении скорости вращения насоса максимальное значение КПД смещается в область меньших подач. Причем, если в относительных величинах изменение скорости вращения и подачи происходит на одно и то же значение ( $v = q$ ), то, как это следует из (15), КПД насоса при частотном регулировании остается постоянным и равным его максимально возможному

Выражение (14) показывает, что частота вращения одного из НА является зависимой переменной и при известной частоте вращения первого из НА должна определяться из выражения (14). Причем частота вращения каждого из насосов должна удовлетворять ограничениям (7), (8), (10) и (11).

6. Как регулируемые, так и не регулируемые НА при всех режимах перекачки должны работать с высокими значениями коэффициента полезного действия (КПД). При изменении производительности нефтепровода КПД НА также изменяются. Графики зависимости КПД от подачи насоса приведены на рис. 1.

(номинальному) значению. В реальных режимах перекачки скорость вращения регулируемого насоса и производительность трубопровода связаны выражениями (1), (13) или (14). При этом условие  $v = q$  не выполняется, и КПД регулируемого насоса будет отличаться от его максимального значения. Для оценки реальных значений КПД насоса при частотном регулировании необходимо в выражение (15) подставить значение производительности трубопровода из выражения (4). Тогда для КПД насоса при ЧРЭП получим:

$$\eta_n = \eta_{ном} - \left( \frac{1}{Q_{ном}} \cdot \sqrt[2-m]{\frac{\sum_1^k (a_{p1} \cdot v^2) + A_k}{\sum_1^k (b_{p1}) + B_k}} - v \right)^2 \cdot \eta_{ном} \cdot v^2 \quad (16)$$

При выборе числа и места установки ЧРЭП необходимо проверять значения КПД как нерегулируемых насосов по выражению (15) при  $v = 1$  либо по

выражениям, приведенным в [8], так и КПД регулируемого насоса по выражению (16). При этом целесообразно, чтобы КПД насосов не снижался ниже минимально допустимого значения  $\eta_{доп}$ :

$$\eta_i \geq \eta_{доп}. \quad (17)$$

7. Места установки ЧРЭП и частоты вращения МН должны быть оптимальными. Это означает, что из нескольких возможных вариантов расположения ЧРЭП на НПС технологического участка должен быть выбран такой, при котором регулирование частоты вращения обеспечивает наибольший технико-экономический или иной эффект.

Приведенные выражения (5)–(17) позволяют все ограничения на технологические параметры, обусловленные требованиями технологического режима, представить в функции частоты вращения НА.

#### Выводы

1. Сформулированы требования к месту установки и диапазону частотного регулирования магистральных насосов НПС. При этом требования к напорам, подпорам и КПД НА, обусловленные особенностями технологического режима перекачки, преобразованы в требования к частоте вращения регулируемых магистральных насосов.

2. Приведены аналитические выражения для выбора частоты вращения регулируемых НА как с учетом требуемых значений производительности нефтепровода, так и с учетом требований к допустимому диапазону частоты вращения НА.

#### Список литературы

1. Туманский А.П. Оптимизация режимов перекачки по магистральным трубопроводам с перекачивающими станциями, оборудованными частотно-регулируемым приводом [Текст] / А.П. Туманский // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2005. – № 8. – С. 11–14.

2. Сокол Е.И. Опыт разработки и внедрения преобразователей частоты для регулируемого электропривода насосных агрегатов МН [Текст] / Е.И. Сокол, А.Ю. Бару, Ж.К. Лукпанов // Электротехника. – 2004. – № 7. – С. 52–57.

3. Шабанов В.А. Алгоритм оценки эффективности частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов эксплуатируемых нефтепроводов по критерию снижения расхода электроэнергии [Текст] / В.А. Шабанов, Э.Ф. Хакимов, С.Ф. Шарипова // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – № 2. – т. 9. – С. 34–42.

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

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

6. Гольянов А.И. Выбор рационального режима работы магистрального трубопровода [Текст] / А.И. Гольянов, А.В. Михайлов, А.М. Нечваль, А.А. Гольянов // НИС «Транспорт и хранение нефтепродуктов». – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1998. – № 10. – С. 16–18.

7. Шабанов В.А. Определение мест расстановки частотно-регулируемых электроприводов при заданном числе насосов [Текст] / В.А. Шабанов, О.В. Бондаренко, З.Х. Павлова // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – № 3 (89). – С. 87–92.

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

9. Шабанов В.А. Алгоритмы оптимизации частотно-регулируемых электроприводов магистральных насосов методом покоординатного спуска [Электронный ресурс] / В.А. Шабанов, З.Х. Павлова // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 4. – С. 4–9. – URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov\\_11.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_11.pdf).

10. Гафаров Р.Р. Двухуровневая система оптимизации работы нефтеперекачивающих станций на участке магистрального нефтепровода [Текст] / Р.Р. Гафаров, О.Е. Данилин // Нефтегазовое дело. – 2008. – т. 6. – № 2. – С. 105–112.

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

12. Шабанов В.А. К вопросу о выборе оптимального режима работы магистрального насоса с частотно-регулируемым приводом [Текст] / В.А. Шабанов, А.А. Ахметгареев // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – № 3 (89). – С. 119–127.



**Шapiro С.В.**  
**Shapiro S.V.**

*доктор технических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
«Физика» Уфимского государственного  
университета экономики и  
сервиса, Россия, г. Уфа*



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

*доктор технических наук,  
профессор, заведующий  
кафедрой «Электромеханика»  
Уфимского государственного  
авиационного технического уни-  
верситета, Россия, г. Уфа*



**Терегулов Т.Р.**  
**Teregulov T.R.**

*кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Электромеха-  
ника» Уфимского государственного  
авиационного технического  
университета, Россия, г. Уфа*



**Полихач Е.А.**  
**Polihach E.A.**

*кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Электромеханика» Уфимского  
государственного авиационного техни-  
ческого университета, Россия, г. Уфа*



**Кузнецов А.Ю.**  
**Kuznetsov A.Yu.**

*студент Уфимского государственного  
авиационного технического  
университета, Россия, г. Уфа*

УДК 621.313

## **КАСКАДНЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ ЧЕТЫРЕХСТУПЕНЧАТЫЙ ГЕНЕРАТОР**

В статье приводятся описание, принцип действия и результаты теоретического и экспериментального исследования синхронно-асинхронного каскадного генератора. Результаты испытания опытной установки, состоящей из четырех шестиполюсных агрегатов, один из которых использовался как обращенный неявнополюсный синхронный генератор, подтвердили работоспособность такого каскада и позволили уточнить ряд зависимостей, необходимых при проектировании. Эти зависимости подтверждены исследованием многоступенчатой схемы замещения. Показано, что использование конденсаторов, компенсирующих реактивную мощность на выходе второй и четвертой ступени, необходимо для получения номинальной мощности на выходе каскада. При этом к.п.д. генератора равняется 75,5%.

*Ключевые слова:* трехфазный генератор переменного тока, синхронно-асинхронный каскад.

## **CASCADE UNCONTACTED FOUR-STEP GENERATOR**

The principle of action, the arrangement and the theoretical and experimental investigations of the cascade synchronous-induction generator are giving. The results of investigation of experimental plant what content



from the four six-pole aggregates, one of what was taken as inverted synchronous generator allow the real works this cascade and give some news dates for the calculate. It is allowed by investigation the replacements scheme. It is shown that the use of capacitors to compensate the reactive power at the output of the second and the fourth stage, it is necessary to obtain the rated power output stage. This efficiency generator is equal to 75,5%.

*Key words:* three-phase alternating current generator; cascade synchronous-induction generator.

В [1, 2] была обоснована экономическая целесообразность замены многополюсных тихоходных синхронных генераторов синхронно-асинхронным каскадом. Суть этого обоснования сводилась к следующему. Расход активных материалов (обмоточного провода и электротехнической стали) и потери у обоих типов генераторов практически одинаковы, однако у каскада значительно меньше расход конструкционных материалов, более удобная транспортируемость и технологичность, отсутствуют

любые скользящие контакты, нет необходимости в возбудителе (вспомогательном генераторе постоянного тока).

С целью экспериментально-теоретического изучения работы синхронно-асинхронного каскада в научно-исследовательской лаборатории кафедры электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета был собран действующий макет. На рис. 1 дана фотография этого макета.



Рис. 1. Фотография действующего макета синхронно-асинхронного каскадного генератора с приводом в виде двигателя постоянного тока

Он состоит из четырех серийных асинхронных крановых двигателей с фазным ротором ДМТФ-011-641 IP44 со следующими номинальными данными:

- мощность – 1,4 кВт при повторно-кратковременном режиме работы S3 – 40%;
- напряжение питания 380/220 В трехфазное от сети 50 Гц;
- угловая скорость ротора – 880 об/мин.;
- номинальные данные ротора  $U_p = 118$  В;  $I_p = 9,0$  А. Обмотка ротора соединена трехфазной звездой, концы которой выведены на контактные кольца.

Валы роторов всех четырех машин соединены стандартными муфтами и приводятся во вращение серийным двигателем постоянного тока с параллельным возбуждением П-42. Его номинальные данные следующие:

- мощность – 8 кВт;
- ток якоря – 43 А;
- число оборотов 3000 об/мин.

Номинальные данные асинхронных двигателей

позволяют заключить, что они имеют  $2p = 6$  полюсов и рассчитаны на длительную (не повторно-кратковременную) мощность 600 Вт.

Двигатель П-42 позволяет путем снижения напряжения якоря регулировать число оборотов в минуту до нескольких десятков. Правда, при этом существенно уменьшается его к.п.д., так как основные потери в нем – потери в якорной обмотке – при номинальном токе не меняются.

Сопротивление обмотки якоря, включая щеточные контакты, измеренные обычным тестером, составляет 0,7 Ом. Поскольку с ростом тока доля потерь в щеточных контактах уменьшается [4], можно заключить, что при номинальном токе 43 А потери в якорной цепи двигателя равны:

$$\Delta P_{яд} = 0,8 I_{я}^2 R_{я} = 0,8 \cdot 43^2 \cdot 0,7 = 1040 \text{ Вт.}$$

На рис. 2 дана схема соединения статорных и роторных цепей всех четырех асинхронных агрегатов и приводного двигателя постоянного тока. У агрегата 1 две фазные статорные обмотки  $w_{cl}$  соеди-

нены последовательно и на них подано постоянное напряжение подмагничивания. Обмотка третьей фазы не подключена. В результате при вращении ротора со скоростью  $n$  в его обмотке  $w_{p1}$  наводится ЭДС с частотой  $f_1$ , равной

$$f_1 = \frac{pn}{60} = \frac{n}{20}. \quad (1)$$

При  $n = 250$  об/мин частота  $f_1 = 12,5$  Гц.

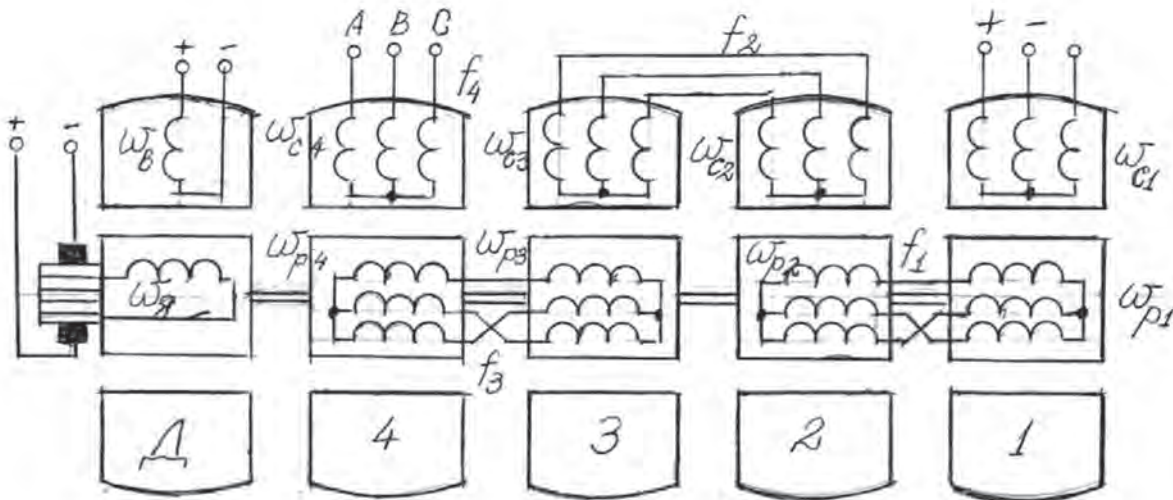


Рис. 2. Схема соединения экспериментального каскадного генератора

Роторная обмотка  $w_{p1}$  питает роторную обмотку генератора 2- $w_{p2}$ , последовательность фаз которой противоположна чередованию фаз обмотки  $w_{p1}$ . Поэтому трехфазный ток обмотки  $w_{p2}$  создает магнитное поле, вращающееся в ту же сторону, что и сам ротор, и с той же скоростью. В результате относительно неподвижного статора агрегата 2 поле вращается со скоростью  $2n$  и наводит в его обмотке  $w_{c2}$  ЭДС с частотой  $f_2 = 2f_1$ . При  $n = 250$  об/мин.  $f_2 = 25$  Гц.

В свою очередь обмотка  $w_{c2}$  питает статорную обмотку агрегата 3- $w_{c3}$ . Последовательность фаз этой обмотки также противоположна последовательности фаз обмотки  $w_{c2}$ . Следовательно, магнитное поле, создаваемое током обмотки  $w_{c3}$  вращается со скоростью  $2n$  в сторону, противоположную вращению ротора агрегата 3. В результате в обмотке этого ротора  $w_{p3}$  наводится ЭДС с частотой

$$f_3 = 3 \frac{pn}{60} = \frac{3n}{20}. \quad (2)$$

При  $n = 250$  об/мин. частота  $f_3 = 37,5$  Гц.

И наконец, эта ЭДС создает в обмотке ротора агрегата 4- $w_{p4}$  трехфазный ток, который, будучи все также соединен со встречным чередованием фаз по отношению к  $w_{p3}$ , создает магнитное поле, вращающееся в ту же сторону, что и ротор. Скорость вращения этого магнитного поля равна:

$$n_3 = \frac{60f_3}{p} = 3n \quad (3)$$

Следовательно, в обмотке статора агрегата 4 наводится ЭДС с частотой  $f = f_4 = 4f_1$ . При  $n = 250$  об/мин. частота  $f_4 = 50$  Гц.

Вместе с ростом частоты от ступени к ступени возрастает выходная мощность каждого агрегата в соответствии с известной формулой асинхронной машины [3]:

$$P_p = P_{эм} s, \quad (4)$$

где  $P_{эм}$  – электромагнитная мощность, передаваемая от статора к ротору;  $P_p$  – мощность, теряемая в цепи ротора;  $s$  – скольжение ротора (отношение его скорости вращения к скорости вращения магнитного поля, создаваемого током статора), получаем следующую формулу:

$$P_p \cong P_c \frac{f_p}{f_c}, \quad (5)$$

где  $P_c = P_{эм} + \Delta P_c$  – мощность, подводимая к статорной обмотке,  $\Delta P_c$  – потери в статорной обмотке и в стали сердечника статора. Если пренебречь в первом приближении потерями  $\Delta P_c$ , мы и получим формулу (5), так как  $s = f_p/f_c$ .

В нашем каскаде ротор и статор каждого агрегата поочередно меняются местами, поэтому более правильно говорить о первичной и вторичной обмотках, но суть от этого не меняется – выходная мощность каждой ступени возрастает пропорционально частоте.

Проведенные испытания показали существенную зависимость выходного напряжения (а, следо-

вательно, и мощности) от внутренних сопротивлений синхронного и асинхронных агрегатов каскада. При этом главную роль играют индуктивные составляющие рассеяния обмоток, реакция якоря синхронного генератора и сопротивления взаимной

индуктивности асинхронных преобразователей.

На рис. 3 изображена схема замещения каскада, приведенная к выходной (статорной обмотке) 4-го агрегата.

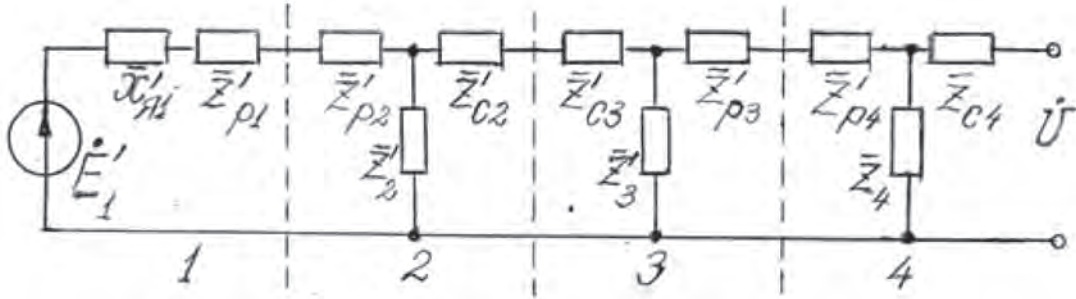


Рис. 3. Схема замещения каскадного синхронно-асинхронного генератора

На этой схеме  $E'_1$  – комплекс ЭДС, наводимой в обмотке ротора 1-го агрегата, приведенный к статорной обмотке 4 агрегата;  $x_{я1}$  – индуктивное сопротивление реакции якоря 1 агрегата, также приведенное к  $w_{c4}$ ,  $z'_{p1}$ ,  $z'_{p2}$ ,  $z'_{c2}$ ,  $z'_{p3}$ ,  $z'_{p4}$  – приведенные сопротивления роторных и статорных обмоток 1, 2, 3 и 4-го агрегатов,  $z'_2$ ,  $z'_3$  – приведенные (к обмотке  $w_{c4}$ ) сопротивления взаимной индукции второго и третьего агрегата,  $z'_{c4}$  и  $z'_4$  – сопротивления обмотки  $w_{c4}$  и взаимной индукции 4-го агрегата.

Приведение сопротивлений одних обмоток ( $w_1 \rightarrow w_2$ ) другим осуществляется по стандартной методике [4]:

$$z' = z \frac{w_2^2 k w_2^2 f_2}{w_1^2 k w_1^2 f_1} \tag{6}$$

где  $k_{w1}$  и  $k_{w2}$  – обмоточные коэффициенты соответствующих обмоток, определяемые как произведение их коэффициентов укорочения, распределения и скоса [4].

Опуская промежуточные выкладки, можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}'_{я1} &= jx_m; \bar{z}'_{p1} = z'_{p2} = jx_p + z_p s_1; \\ \bar{z}'_{c2} = \bar{z}'_{c3} &= jx_c + z_c s_2; \bar{z}'_2 = \bar{z}'_3 = \bar{z}_4 = jx_m; \\ \bar{z}'_{p3} = z'_{p4} &= jx_p + r_p s_3; \bar{z}'_{c4} = jx_c + r_c; \\ s_1 &= f/f_1; s_2 = f/f_2; s_3 = f/f_3 \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

где  $x_m$  – индуктивное сопротивление взаимной индукции статорной обмотки асинхронного агрегата, равное:

$$x_m = \omega w_c^2 k_{wc}^2 \frac{\Phi}{I_c} \tag{8}$$

( $\Phi$  – магнитный поток в зазоре асинхронной машины,  $I_c$  – действующее значение тока статора);  $x_c$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки

при частоте 50 Гц  $w_c$ ;  $x_p$  – приведенное к статорной обмотке индуктивное сопротивление рассеяния роторной обмотки;  $r_c$  – активное сопротивление статорной обмотки;  $z_p$  – приведенное к статорной активное сопротивление роторной обмотки.

Для нашего агрегата  $s_1 = 4$ ;  $s_2 = 2$ ;  $s_3 = 4/3$ .

При записи системы (7) были опущены некоторые слагаемые, обусловленные потерями в стали при частотах 12,5 Гц, 25 Гц и 37,5 Гц (они существенно меньше, нежели при частоте 50 Гц, но даже при этой стандартной частоте ими в схемах замещения асинхронных машин пренебрегают [3, 4]), и добавочными потерями, так как они на порядок меньше указанных на рис. 3 сопротивлений.

Схему рис. 3 путем обычных приемов преобразования цепей можно привести к схеме рис. 4а. Как видим, выходное напряжение каскадного генератора в следствие размагничивающей реакции якоря равно

$$\dot{U}_n \cong \dot{E}'_1 \frac{jx_m}{j(x_m + 0,5x_m)} = \dot{E}'_1 / 3.$$

Учитывая это обстоятельство, при расчете каскадного генератора у его первой ступени – синхронного агрегата – нужно обмотку возбуждения рассчитывать в три раза больше стандартной [5].

Правда, как показали экспериментальные исследования, вместо этого можно к статорной обмотке второй ступени подключить компенсирующий конденсатор  $x_{c1}$  (рис. 4б), сопротивление которого при частоте  $f$  должно быть равно

$$x_{c1} = 0,5 x_m. \tag{9}$$

Учитывая, что величина  $x_m$  у шестиполусной асинхронной машины равна  $2,5z_n$  ( $z_n$  – номинальное сопротивление одной фазы ее нагрузки), нетрудно заключить, что реактивная мощность конденсатора  $x_{c1}$  должна составлять 1,25  $P_n$ , т. е. на 25% больше

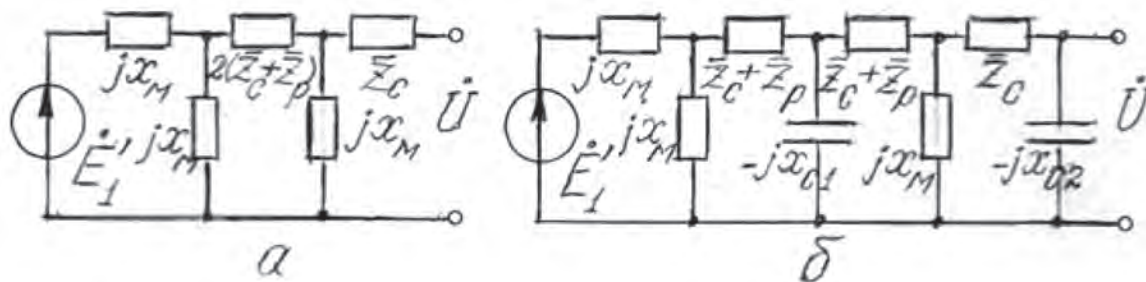


Рис. 4. Приведенная схема замещения каскадного генератора (а), то же с компенсирующими конденсаторами (б)

номинальной мощности каскада.

Для компенсации падений напряжения на индуктивных сопротивлениях рассеяния всех трех асинхронных ступеней каскадного генератора на его выходе была включена еще одна батарея из соединенных треугольником конденсаторов  $x_{c2}$ .

В качестве батареи  $x_{c1}$  были включены три конденсатора К-78-17 60 мкф, 450 В; а  $x_{c2}$  – три конденсатора К-78-17 10 мкф, 630 В. Масса обеих батарей составляла 1,5 кг, что во много раз меньше массы всех четырех асинхронных агрегатов –  $4 \times 56,5 \text{ кг} = 226 \text{ кг}$ .

Точно так же они не сопоставимы по стоимости – 1500 руб. за все конденсаторы и около 100 тыс. рублей за агрегаты. В результате удалось получить мощность каскада 400 Вт ( $V_n = 230 \text{ В}$ ;  $I_n = 1 \text{ А}$ ).

При этом двигатель потреблял при напряжении 37 В и токе 44 А мощность 1628 Вт, потери в его обмотке якоря составляли около 1100 Вт. Следовательно, на валу двигателя мощность равнялась 530 Вт и к.п.д. каскадного генератора равнялся:

$$\eta = \frac{400}{530} \times 100\% = 75,5\%$$

#### Выводы

Проведенные в научно-исследовательской лаборатории кафедры электромеханики УГАТУ испытания позволяют сделать следующие выводы.

Каскадный синхронно-асинхронный бесконтактный генератор может быть использован в качестве тихоходного источника электроэнергии взамен многополюсных синхронных машин.

При проектировании каскада следует его первую ступень – синхронный генератор – выполнить явнополюсным для уменьшения индуктивного сопротивления реакции якоря.

Обмотку возбуждения синхронного генератора следует спроектировать с учетом размагничивающего действия продольной реакции якоря примерно в 2–3 раза больше, чем у стандартных машин соответствующей мощности.

В каскадном генераторе целесообразно применить поперечную емкостную компенсацию после второй ступени и на выходе.

Реактивная мощность первой указанной батареи должна составлять 1,25 мощности генератора, а второй – 0,2 указанной мощности.

Обмотку статора второй ступени каскада следует рассчитывать на напряжение, соответствующее номинальному напряжению стандартных конденсаторов.

#### Список литературы

1. Шапиро С.В. Каскадный синхронно-асинхронный генератор [Текст] / С.В. Шапиро, В.А. Кулинич // Электротехника. – № 1. – 2002 г. – С. 25–28.
2. Патент № 17363 Российская Федерация, МПК7 G01B13/00 Синхронный тихоходный генератор [Текст] / С.В. Шапиро, В.А. Кулинич.; заявитель и патентообладатель Уфимский технологический институт сервиса (RU). – № 2000118870/20; заявл. 17.07.2000; опубл. 27.03.01.
3. Копылов И.П. Электрические машины [Текст] / И.П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х т. Том 1. Учебник для вузов [Текст] / А.В. Иванов-Смоленский; 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 652 с.
5. Гольдберг О.Д. Проектирование электрических машин [Текст] / О.Д. Гольдберг, И.С. Свириденко. – М.: Высшая школа, 2006 г. – 431 с.

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS



**Абдрахманова Г.И.**  
**Abdrakhmanova G.I.**

*аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы»  
Уфимского государственного авиационного  
технического университета,  
Россия, г. Уфа*



**Багманов В.Х.**  
**Bagmanov V.H.**

*доктор технических наук, профессор кафедры  
«Телекоммуникационные системы»  
Уфимского государственного авиационного  
технического университета,  
Россия, г. Уфа*

УДК 621.396

## СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ АНТЕННА НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СТРУКТУР

В статье рассмотрена задача проектирования сверхширокополосной (СШП) антенны на основе применения фрактальных структур. С этой целью исследовано влияние коэффициента масштаба и уровня итерации рассматриваемого фрактала на характеристики излучения. В результате выбрана базовая геометрия, основанная на второй итерации фрактала со значением коэффициента масштаба, равного трем. Антенна запитана при помощи компланарного волноводного порта. Далее проведена пошаговая параметрическая оптимизация геометрии антенны с целью обеспечения функционирования во всей СШП полосе частот. Итоговые размеры разработанной антенны составляют  $26 \times 33$  мм, а диапазон рабочих частот –  $3,229 \div 10,6$  ГГц. Указанные показатели свидетельствуют о возможности удачного применения спроектированной антенны для СШП-приложений.

*Ключевые слова:* сверхширокополосные антенны, фракталы, коэффициент отражения.

## ULTRA-WIDEBAND ANTENNA ON THE BASIS OF FRACTAL STRUCTURES

The development of a new ultra-wideband (UWB) antenna on the basis of fractal structures is described in the paper. The fractal scale factor and iteration level influence on radiation characteristics were investigated for this purpose. The geometry, based on the second iteration level fractal with the value of scale factor, equal to 3, was chosen as a result. The antenna is fed with a coplanar waveguide port. Then the parametric step by step optimization of the antenna geometry was applied for providing operation in all UWB frequency band. The developed antenna size is  $26 \times 33$  mm, and the bandwidth –  $3,229 \div 10,6$  GHz. All these factors proclaim that the antenna could be successfully applied for UWB devices.

*Key words:* ultra-wideband antennas, fractals, reflection coefficient.

Сверхширокополосные (СШП) системы связи являются достаточно новым и перспективным направлением телекоммуникаций, а потому представляют

большой интерес как для разработчиков телекоммуникационного оборудования, так и для конечных пользователей. Особенности передаваемых сигналов

позволяют передавать большие потоки данных на безлицензионной основе, но в пределах ограниченной дальности (5–10 м). Массовое внедрение СШП-технологии сдержано отсутствием необходимой элементной базы, в частности, антенной техники.

Основное направление патентов и исследований в области проектирования антенн для СШП-устройств состоит в применении новых форм и структур с целью миниатюризации и снижения производственных затрат при обеспечении требуемых частотных и энергетических характеристик.

Так, в [1] геометрия антенны построена на основе салфетки Серпинского трапециевидальной формы, размеры антенны –  $25 \times 25$  мм<sup>2</sup>. Два полу-круга, используемые в качестве излучающего эле-

мента и плоскости земли, в первом из которых сделана выемка в форме меандра, составляют антенну размером  $23 \times 23,5$  мм<sup>2</sup> в [2]. Печатная монополярная антенна ( $24 \times 28$  мм<sup>2</sup>), спроектированная на основе треугольного излучающего элемента и плоскости земли с треугольной эквивалентной выемкой на оборотной стороне, представлена в [3].

В данной статье предлагается разработать СШП-антенну на основе кругового монополя, поскольку подобные структуры могут обеспечивать довольно широкую полосу пропускания, упрощение конструкции, малые размеры и снижение затрат при производстве. Требуемый диапазон рабочих частот –  $3,1 \div 10,6$  ГГц по уровню -10 дБ коэффициента отражения  $S_{11}$  [4] (рис. 1).



Рис. 1. Требуемая маска для коэффициента отражения  $S_{11}$

Миниатюризация антенны будет осуществлена за счет применения фрактальной технологии, что также позволит исследовать зависимость характеристик излучения от значения коэффициента масштаба  $\delta$  и уровня итерации фрактала.

Оптимизация разработанной фрактальной антенны далее позволит расширить рабочий диапазон за счет изменения следующих параметров: длины центрального проводника (ЦП) компланарного волновода (КВ), длины плоскости земли (ПЗ) КВ, расстояния «ПЗ КВ – излучающий элемент (ИЭ)». Моделирование антенны и численные эксперименты проводятся в среде «CST Microwave Studio».

За основу взят круговой монополь, диаметр которого составляет четверть длины волны требуемого диапазона:

$$L_{ar} = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f_L}, \text{ м}, \quad (1)$$

где  $L_{ar}$  – длина ИЭ антенны без учета ЦП;  $f_L$  – нижняя граничная частота,  $f_L = f_{min\ uwb} = 3,1 \cdot 10^9$  ГГц;  $c$  – скорость света,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Получаем  $L_{ar} = 24,19$  мм  $\approx$  24 мм. Тогда радиус  $r = 12$  мм и, принимая исходную длину ЦП  $L_f$  равной  $r$ , получаем нулевую итерацию (рис. 2).

ИЭ, ЦП и ПЗ размещены на лицевой стороне диэлектрической подложки толщиной  $T_s$ . При этом расстояния «ПЗ – ЦП»  $Z_v$  и «ПЗ – ИЭ»  $Z_h$  приняты равными 0,76 мм, так как они не должны превышать толщину подложки  $T_s$ . Значения остальных параметров, используемых в процессе моделирования, представлены в табл. 1 (для  $\delta = 2$ ).

Антенна запитана при помощи компланарного волновода, состоящего из центрального проводника и плоскости земли и расположенного перпендикулярно ему компланарного волноводного порта (КВП) (рис. 2).

Ширина ЦП  $W_f$  рассчитана исходя из величины волнового сопротивления  $Z = 50$  Ом [5]:

$$Z = \frac{60\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \cdot \frac{1}{\frac{K(k)}{K'(k)} + \frac{K(k_1)}{K(k_1)}}, \text{ Ом}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{eff}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1 + \varepsilon_r \cdot \frac{K(k')}{K(k)} \cdot \frac{K(k_1)}{K(k_1)}}{1 + \frac{K(k')}{K(k)} \cdot \frac{K(k_1)}{K(k_1)}}, \quad (3)$$

$K$  – полный эллиптический интеграл первого рода;

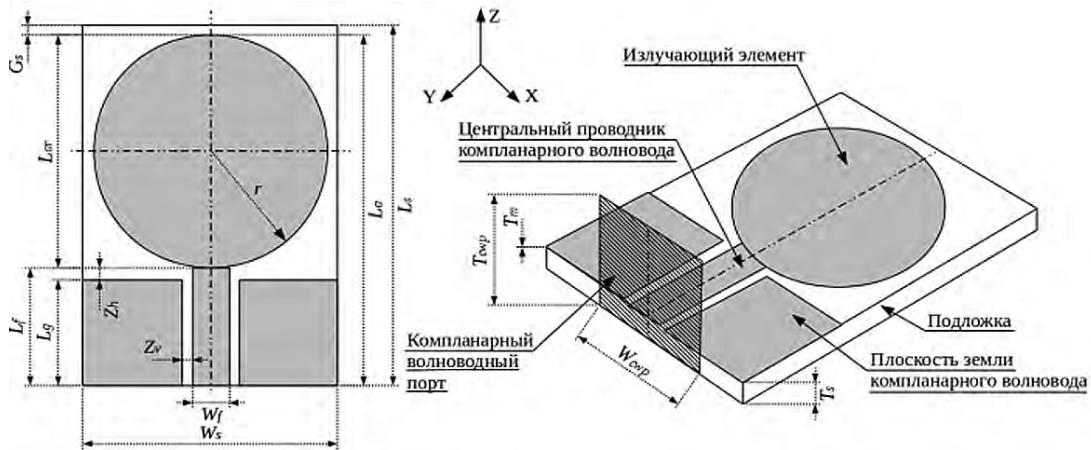


Рис. 2. Нулевая итерация антенны

$$k = \frac{W_f}{W_f + 2 \cdot Z_v}, \quad (4)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2}, \quad k_1' = \sqrt{1 - k_1^2}, \quad (5)$$

$$k_1 = \frac{\text{th}\left(\frac{\pi W_f}{4T_s}\right)}{\text{th}\left(\frac{\pi(W_f + 2 \cdot Z_v)}{4T_s}\right)}. \quad (6)$$

Размеры КВП выбраны следующими [6]:

$$W_{cwp} = 6 \cdot W_f = 12 \text{ мм}, \quad (7)$$

$$T_{cwp} = 5 \cdot T_s = 3,8 \text{ мм}, \quad (8)$$

где  $W_{cwp}$  – ширина КВП (coplanar waveguide port, CWP),  $T_{cwp}$  – толщина КВП.

Таблица 1

Параметры антенны ( $\delta = 2$ )

Название	Описание	Формула	Значение
$L_a$	Длина антенны	$2r + L_f$	36 мм
$W_a$	Ширина антенны	$2r$	24 мм
$L_f$	Длина ЦП	$r + 0,1$	12,1 мм
$W_f$	Ширина ЦП		1,66 мм
$L_g$	Длина ПЗ	$r - T_s$	11,24 мм
$L_s$	Длина подложки	$L_a + G_s$	37 мм
$W_s$	Ширина подложки	$W_a + 2G_s$	26 мм
$G_s$	Зазор подложки		1 мм
$T_m$	Толщина металла		0,035 мм
$T_s$	Толщина подложки		0,76 мм
$r$	Радиус круга 0-й итерации		12 мм
$r_1$	Радиус круга 1-й итерации	$r / 2$	6 мм
$r_2$	Радиус круга 2-й итерации	$r_1 / 2$	3 мм
$r_3$	Радиус круга 3-й итерации	$r_2 / 2$	1,5 мм
$\epsilon_s$	Диэлектрическая проницаемость		3,38
$\text{tg } \delta$	Тангенс угла диэл. потерь подложки		0,0025

Построение антенны основано на применении фрактальной технологии. Последующие итерации антенны образуются за счет размещения кругов меньшего радиуса в элементах предыдущей итерации. При этом коэффициент масштаба  $\delta$  определяет, во сколько раз будут отличаться размеры соседних итераций. Данный процесс для случая

$\delta = 2$  представлен на рис. 3. Так, первая итерация получена за счет вычитания двух кругов радиусом  $r_1$  из исходного элемента. Вторая итерация образована за счет размещения уменьшенных в два раза металлических кругов радиусом  $r_2$  в каждом круге первой итерации. Третья итерация аналогична первой, но радиус при этом  $r_3$ .

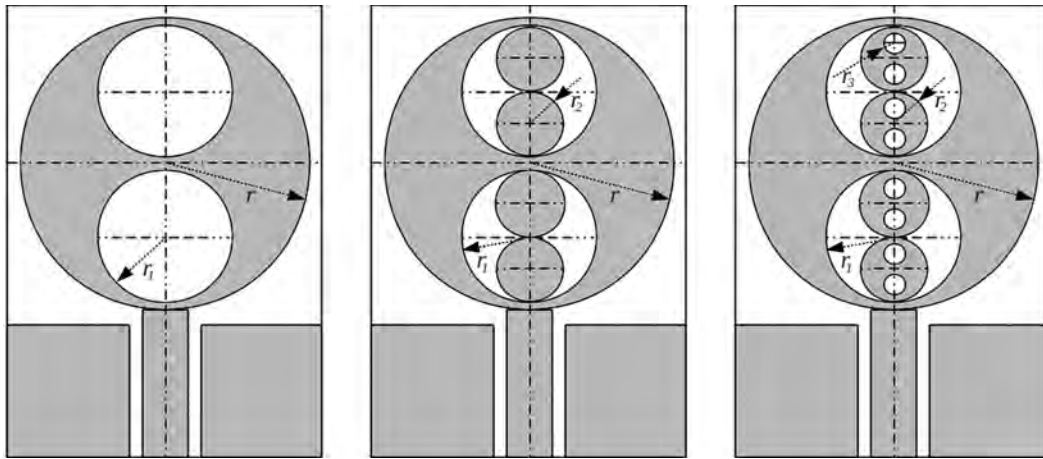


Рис. 3. Первая, вторая и третья итерации антенны ( $\delta = 2$ )

Динамика изменения коэффициента отражения в зависимости от уровня итерации представлена на рис. 4. Каждому новому порядку соответствует одна дополнительная резонансная частота. Так,

нулевой итерации в рассматриваемом диапазоне  $3,1 \div 10,6$  ГГц соответствуют 2 резонанса, первой итерации – 3 и т. д.

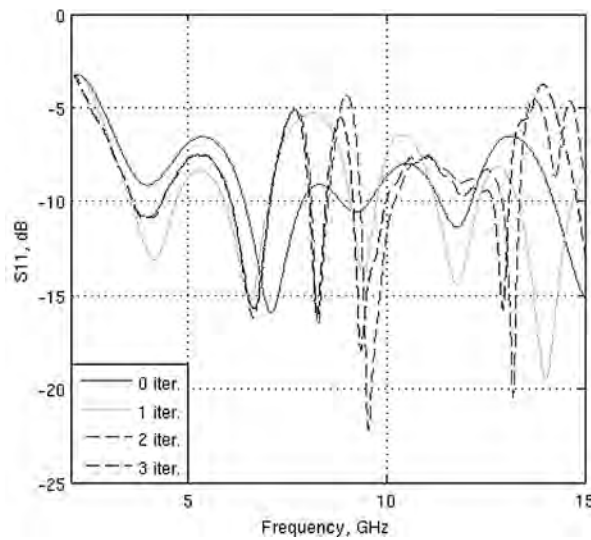


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения от порядка итерации ( $\delta = 2$ )

На основании полученных данных (табл. 2) очевидно, что рабочая полоса частот и глубина резонансов увеличиваются с ростом  $\delta$ . Однако уже для третьей итерации расширение диапазона незначительно по сравнению со второй, имеющей также

меньшие значения  $S_{11}$ . Следовательно, для дальнейшей оптимизации предпочтительнее использовать вторую итерацию для  $\delta = 2$ , что также проще с точки зрения физической реализации.

Таблица 2

Сравнение 0 ÷ 3 итераций по рабочей полосе и резонансным частотам ( $\delta = 2$ )

Порядок итерации	$\Delta f$ , ГГц	$f_{рез}$ , ГГц	$S_{11}$ , дБ
0	1,49; 0,7301	7,0881	-15,9189
	$\Sigma = 2,2201$	9,2337	-10,5915
1	1,1622; 1,1175;	4,1379	-13,1160
	0,6854	6,5517	-15,2401
	$\Sigma = 2,9651$	9,4125	-13,9452



Порядок итерации	$\Delta f$ , ГГц	$f_{рез}$ , ГГц	$S_{11}$ , дБ
2	0,7301; 1,0132; 0,4321; 0,864 $\Sigma = 3,0394$	4,0187	-10,8374
		6,6411	-16,2069
		8,2801	-16,5329
		9,5466	-22,1807
3	0,7748; 0,9834; 0,4321; 0,8493 $\Sigma = 3,0396$	4,0634	-17,9615
		6,6709	-16,0904
		8,2503	-15,7038
		9,3529	-10,8581

Далее предлагается исследовать зависимость коэффициента отражения от значения коэффициента масштаба. Рассмотрим изменение  $\delta$  в диапазоне  $2 \div 6$  с шагом 1 в пределах первой и второй итераций (рис. 5, 6).

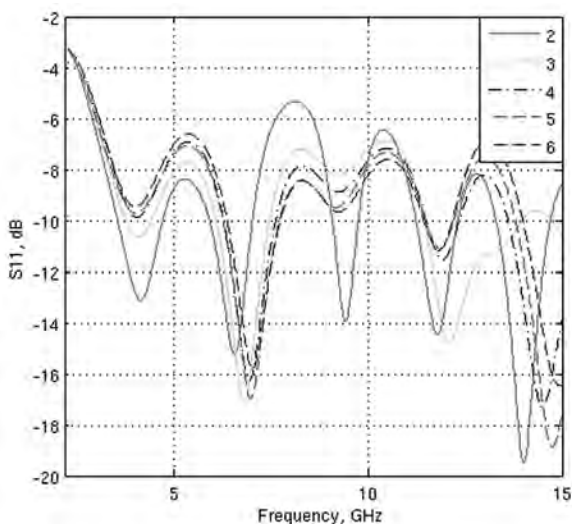


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения от коэффициента масштаба для первой итерации ( $\delta = 2; 3; 4; 5; 6$ )

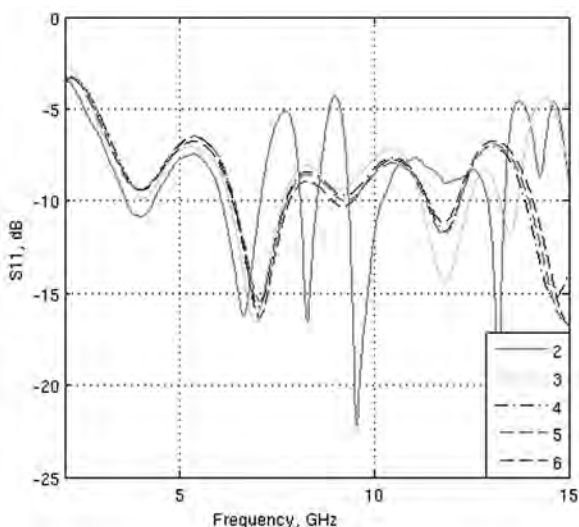


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения от коэффициента масштаба для второй итерации ( $\delta = 2; 3; 4; 5; 6$ )

Интересное поведение графиков состоит в том, что начиная с  $\delta = 3$  характеристики становятся более пологими и гладкими, количество резонансов уменьшается и остается практически постоянным, а рост  $\delta$  сопровождается повышением уровня  $S_{11}$  в четных диапазонах и снижением – в нечетных.

Для первой итерации при  $\delta = 2$  имеют место три глубоких резонанса в диапазоне  $3,1 \div 10,6$  ГГц, но и довольно высокие полки в районе  $7 \div 9$  ГГц. При  $\delta = 3$  – всего два резонанса, но, в общем, полки ближе по уровню к -10 дБ.

В связи с тем, что значительных качественных изменений в пределах  $\delta = 3 \div 6$  нет, с точки зрения простоты физической реализации низкие порядки коэффициента масштаба предпочтительнее ( $\delta = 3$ ).

Для второй итерации при  $\delta = 2$  имеют место четыре резонанса в диапазоне  $3,1 \div 10,6$  ГГц, при  $\delta = 3$  – только два.

Дальнейшая оптимизация будет проводиться для обоих значений  $\delta$  с целью выяснения, какой вариант предпочтительнее для оптимизации – с большим количеством резонансов или с довольно низкими полками.

В данном разделе рассматривается оптимизация антенны на основе второй итерации фрактала со значением коэффициента  $\delta = 3$ . Варьируемые параметры представлены на рис. 2, а диапазоны их изменений – в табл. 3.

Таблица 3

Оптимизируемые параметры антенны

Название	Описание	Диапазон изменений
$Z_h$	Зазор горизонтальный	$\frac{1}{7}T_s, \frac{2}{7}T_s, \dots, \frac{6}{7}T_s$
$L_f$	Длина ЦП КВ	$\Delta L_f = [-6, -5, \dots, +12]$ мм
$L_g$	Длина ПЗ КВ	$\Delta L_g = [-6, -5, \dots, +12]$ мм

Значения горизонтального зазора привязаны к толщине подложки  $T_s$ , так как не могут превышать ее по величине, а также для удобства параметрического задания размеров элементов в процессе

моделирования. Выбор шага  $1/7 \cdot T_s$  обусловлен тем, что это минимальное число, близкое к 0,1 мм, которое может быть реализовано технологически.

Процесс оптимизации включает в себя три шага в соответствии с тремя изменяемыми параметрами. Каждый последующий этап основан на ранее полученных результатах, то есть изменение одного параметра сопровождается фиксированием значений всех остальных.

**Шаг 1.** Горизонтальный зазор  $Z_h$  (расстояние «ПЗ КВ – ИЭ») – первый параметр, подлежащий оптимизации (рис. 7).

Увеличение зазора сопровождается снижением полок в первом диапазоне и ростом – во втором, «золотая середина» – при  $Z_h = 3/7 \cdot T_s$ .

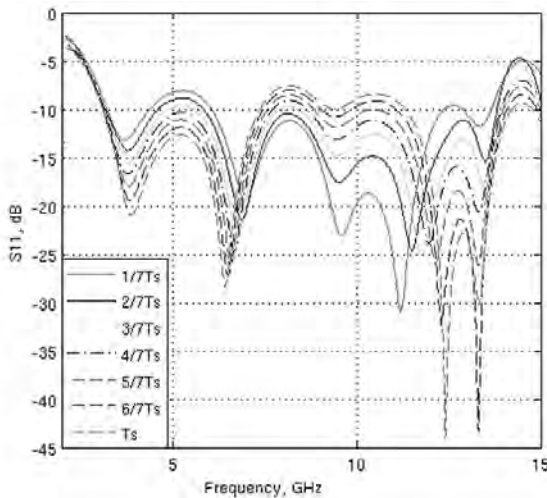


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения от величины  $Z_h$

**Шаг 2.** Второй параметр – длина ЦП КВ  $L_p$ , которая изменяется за счет прибавления величины  $\Delta L_f$  (как положительной, так и отрицательной). Диапазон изменений – от  $-r/2$  до  $+r$ . Ввиду громоздкости графических данных результаты экспериментов представлены на трех отдельных рис. 8, 9, 10.

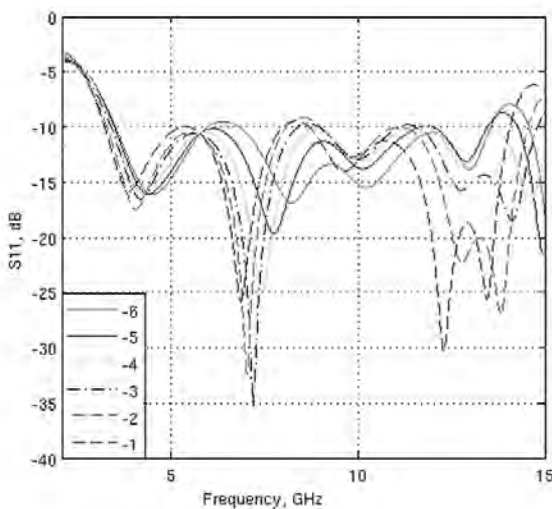


Рис. 8. Зависимость коэффициента отражения от величины  $\Delta L_f$  ( $\Delta L_f = [-6, -5, \dots -1]$  мм)

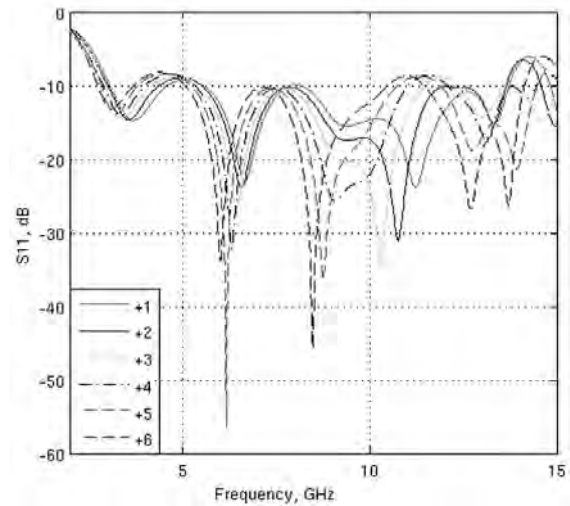


Рис. 9. Зависимость коэффициента отражения от величины  $\Delta L_f$  ( $\Delta L_f = [+1, +2, \dots +6]$  мм)

Чем длиннее ЦП, тем резонансные частоты все больше смещаются в низкочастотную область. Наилучшие результаты получены при  $\Delta L_f = -4$  мм, и таким образом итоговая длина  $L_f$  составляет 8,1 мм.

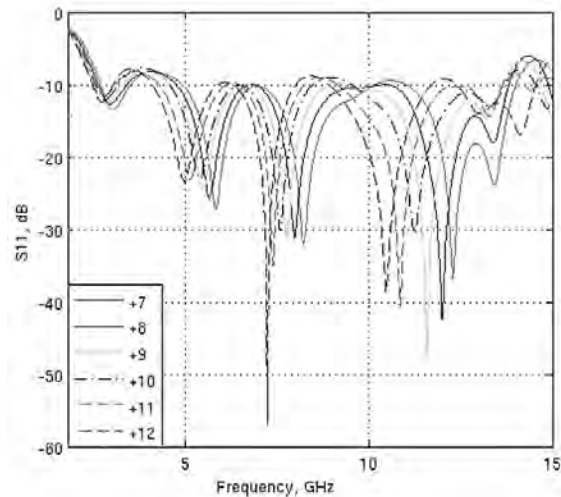


Рис. 10. Зависимость коэффициента отражения от величины  $\Delta L_f$  ( $\Delta L_f = [+7, +8, \dots +12]$  мм)

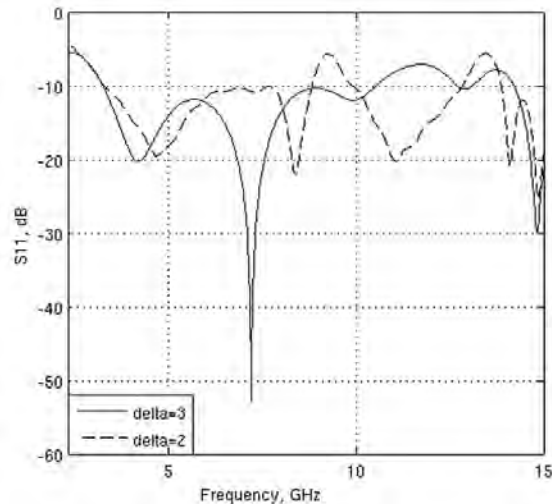
**Шаг 3.** Поскольку длина ПЗ связана с длиной ЦП и горизонтальным зазором соотношением:

$$L_g = L_f - Z_h, \text{ мм}, \quad (9)$$

то оптимальное значение для нее вычисляется автоматически:  $L_g = 8,1 - 3/7 \cdot 0,76 = 7,77$  мм.

На данном этапе оптимизация закончена, полоса частот разработанной антенны составляет  $3,229 \div 10,6$  ГГц по уровню -10 дБ. Далее представлено сравнение величины  $S_{11}$  для двух значений  $\delta$  (рис. 11).

Очевидно, что в случае  $\delta = 2$  имеет место пиковый выброс на частоте 9,249 ГГц, который оказался неустранимым в процессе оптимизации и будет предметом дальнейших исследований.

Рис. 11. Сравнение  $S_{11}$  для  $\delta = 2$  и  $\delta = 3$ 

Излучение поля в дальней зоне представлено на рис. 12.

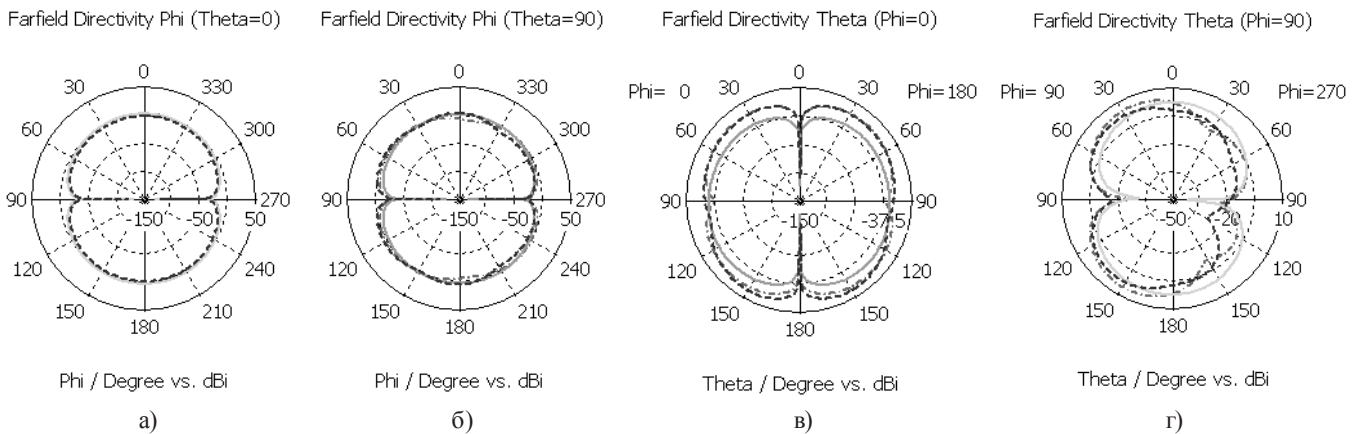


Рис. 12. Диаграммы направленности на частотах:  
3,1 ГГц (сплошная линия); 7,2 ГГц (штрихпунктирная); 10,6 ГГц (штриховая)

В статье представлен новый алгоритм проектирования СШП-антенны, который подразумевает два этапа. Первоначально определяется геометрия антенны на основе фрактальной технологии посредством выбора соответствующего коэффициента масштаба и уровня итерации фрактала. Далее применяется параметрическая пошаговая оптимизация на основе изучения влияния ключевых компонентов антенны на характеристики излучения с целью обеспечения функционирования антенны во всем СШП-диапазоне.

Установлено, рост уровня итерации сопровождается увеличением количества резонансных частот, а возрастание коэффициента масштаба в пределах одной итерации характеризуется более пологим поведением  $S_{11}$  и постоянством резонансов (начиная с  $\delta = 3$ ).

Представленная антенна обеспечивает прием сигналов в полосе частот  $3,229 \div 10,6$  ГГц. Помимо этого она характеризуется всенаправленностью и

малыми размерами  $26 \times 33$  мм<sup>2</sup>, а потому является хорошим кандидатом для СШП-приложений.

*Исследование поддержано грантом Европейского Союза «Erasmus Mundus Action 2» и грантом Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.B37.21.1974). Авторы благодарят профессора Paolo Rocca за полезное обсуждение.*

#### Список литературы

1. Lee S.-S. The Design of fractal antenna for UWB applications [Text] / S.-S. Lee, J.-N. Lee, S.-S. Choi, J.-K. Park // International symposium on antennas and propagation. – Bangkok, 2009. – P. 492–495.
2. Bialkowski M.E. Design of UWB planar antenna with improved cut-off at the out-of-band frequencies [Text] / M.E. Bialkowski, A.M. Abbosh // IEEE Antennas and wireless propagation letters. – 2008. – Vol. 7. – P. 408–410.

3. *Naser-Moghadasi M.* Compact UWB Planar monopole antenna [Text] / M. Naser-Moghadasi, H. Rousta, B.S. Virdee // IEEE Antennas and wireless propagation letters. – 2009. – Vol. 8. – P. 1382–1385.

4. *Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems*

[Text]. – Federal Communications Commission, FCC 02-48. – 2002. – 118 p.

5. *Wadell B.C.* Transmission line design handbook [Text] / B. C. Wadell. – Artech House, 1991. – 544 p.

6. *HF design and analysis: tutorials* [Text] / CST Microwave studio; version 4. – CST, 2002.



*Артюшенко В.М.*  
*Artuschenko V.M.*

*доктор технических наук, профессор,  
проректор по информационным технологиям  
Финансово-технологической академии,  
Россия, г. Уфа*



*Кучеров Б.А.*  
*Kuchеров B.A.*

*аспирант  
Финансово-технологической академии,  
Россия, г. Уфа*

УДК 681.5.034

## **ПОВЫШЕНИЕ ОПЕРАТИВНОСТИ БЕСКОНФЛИКТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППИРОВКОЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ РЕСУРСНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ**

В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с повышением оперативности бесконфликтного управления группировкой космических аппаратов (КА) в условиях ресурсных ограничений путем разработки автоматизированной системы (АС) распределения средств управления (PCY) КА. Приводится краткое описание процесса PCY КА. Рассматривается структура наземного комплекса управления КА с описанием основных ее элементов. Приводится краткое описание процесса проведения сеанса связи с КА. Освещается вопрос возникновения конфликтных ситуаций при PCY КА. Приводится схема взаимодействия органа планирования с абонентами. Сформулированы основные требования к АС PCY КА, приводится ее описание. Предложены варианты обмена с абонентами, проведен их сравнительный анализ. Освещается вопрос разрешения конфликтных ситуаций. Приводится структурная схема программного обеспечения АС PCY КА.

*Ключевые слова:* планирование, космический аппарат, наземный комплекс управления, автоматизированная система распределения средств управления.

## **INCREASING EFFICIENCY OF CONFLICT-FREE CONTROL FOR SPACECRAFT CONSTELLATION WITH RESOURCE RESTRICTIONS**

In this article considers issues related to increasing efficiency of conflict-free control for spacecraft constellation with resource restrictions by developing an automated system (AS) of distribution of control facilities (DCF) for spacecrafts. A brief description of the DCF process for spacecrafts is shown. Consider the structure of the ground control complex for spacecrafts with the description of its main elements. A brief description of the communication session with spacecraft is shown. Addresses the issue of conflict situations while DCF for spacecrafts.

The scheme of interaction with subscribers planning authority is shown. The basic requirements for an AS of DCF for spacecrafts are formulated, its description is shown. The variants of the exchange with the subscribers is shown, their comparative analysis is performed. Addresses the issue of conflict resolution. Flowchart of AS DCF for spacecrafts software is shown.

*Key words:* planning, spacecraft, ground control complex, automated system of distribution of control facilities.

В настоящее время в соответствии с Федеральной космической программой России на 2006–2015 годы проводится большой объем работ по укреплению и развитию космического потенциала Российской Федерации. Целью этих работ является расширение и повышение эффективности использования космического пространства в интересах решения экономических, социальных, научных и других задач. Нарастивание орбитальной группировки в период 2009–2015 годы, с одной стороны, и использование малопунктной (2–4 наземных пункта) технологии управления космическими аппаратами (КА), с другой стороны, предъявляет новые требования к процессу оперативного управления группировкой КА [1, 2].

Одной из основных составляющих процесса оперативного управления группировкой КА является процесс планирования задействования средств наземного комплекса управления (НКУ) КА, заключающийся в распределении средств управления (PCY) КА, а именно их временного ресурса. В свою очередь к процессу планирования задействования средств НКУ также предъявляются новые требования, а именно требования в части оперативности распределения ресурса средств НКУ с целью наиболее полного удовлетворения заявок центров управления полетами (ЦУП) КА на проведение сеансов связи.

Основным принципом планирования задействования средств НКУ КА является принцип коллективного использования НКУ. Данный принцип заключается в том, что одни и те же средства применяются для управления КА различного назначения. Этот принцип обуславливает необходимость централизации функции планирования задействования средств НКУ КА, реализуемой единым органом – органом планирования.

Целью планирования является бесконфликтное распределение средств коллективного доступа (средств НКУ), а именно их временного ресурса, для обеспечения непрерывного, надежного и устойчивого управления КА в условиях ресурсных ограничений. Под конфликтной ситуацией с точки зрения задействования средств НКУ понимается ситуация, когда возникает необходимость задействования одних и тех же средств НКУ, в одно и то же время, для разных КА, а также противоречие заявки существующим ресурсным ограничениям.

Процесс планирования задействования средств НКУ в условиях ресурсных ограничений, влекущих за собой возможное возникновение конфликтных ситуаций, является сложной и трудоемкой задачей, поэтому он должен осуществляться в соответствии с определенной технологией планирования. Наиболее существенное влияние на оперативное управление группировкой КА оказывают оперативное и текущее планирование, которое можно представить в виде нижеприведенной последовательности действий:

- получение заявок от ЦУП КА на задействование средств НКУ для обеспечения управления КА в ходе сеансов связи с ними;

- разработка предложений в план задействования средств (ПЗС) НКУ с учетом ресурсных ограничений;

- принятие решения об утверждении ПЗС НКУ, формирование распоряжений на задействование конкретных средств НКУ, формирование выписок из ПЗС для ЦУП КА;

- доведение распоряжений и выписок до абонентов.

Результаты планирования реализуются в разрабатываемых ПЗС и последующих управляющих воздействиях в виде распоряжений на задействование средств НКУ. Практика показывает, что для повышения оперативности планирования необходима автоматизация вышеприведенных задач путем разработки автоматизированной системы (АС) распределения временного ресурса средств управления КА.

Как известно, для оперативного управления полетом КА и контролем работы его бортовых систем используется НКУ, представляющий собой совокупность наземных радиотехнических и вычислительных средств, с соответствующим методическим и математическим обеспечением. Структурная схема НКУ КА представлена на рис. 1 [3].

В состав НКУ КА входят: центры управления полетом (ЦУП) КА; средства управления КА, расположенные на командно-измерительных пунктах (КИП); система связи и передачи данных (ССПД). НКУ КА состоит из НКУ конкретных КА, то есть из НКУ КА<sub>1</sub>, НКУ КА<sub>2</sub>, ..., НКУ КА<sub>n</sub>. При этом НКУ различных КА могут пересекаться между собой, то есть одно и то же средство управления может входить в состав НКУ нескольких КА.

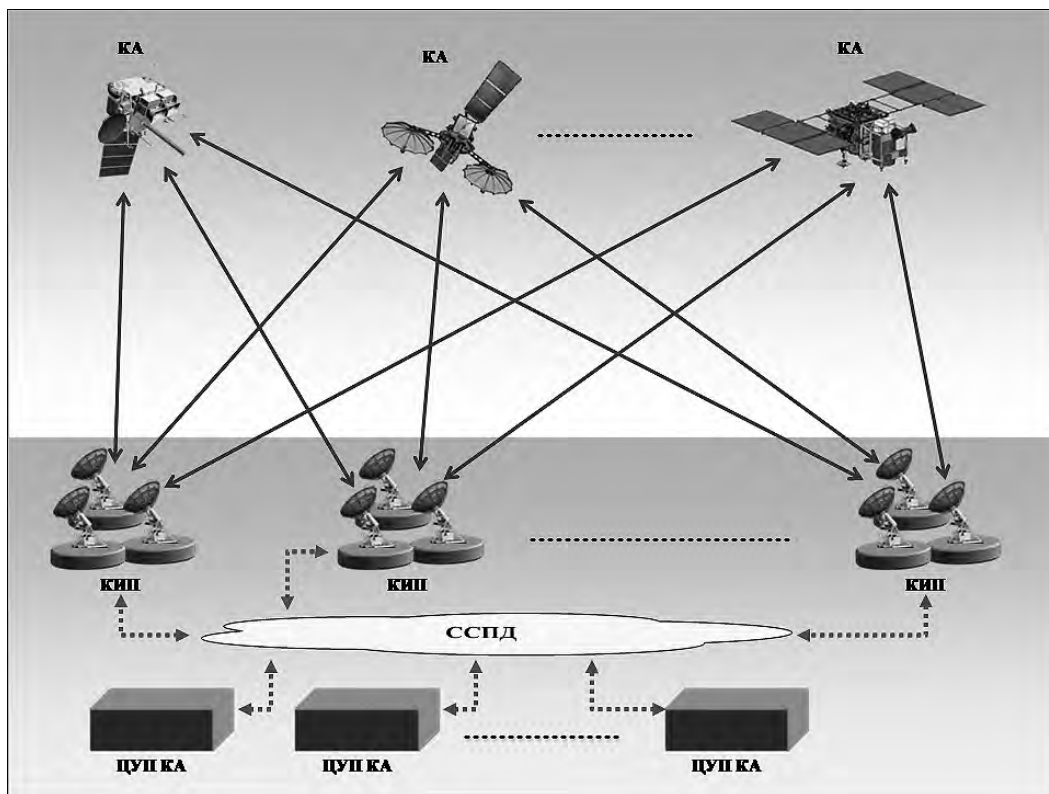


Рис. 1. Схема наземного комплекса управления космическими аппаратами

Центр управления полетом – орган, осуществляющий централизованное оперативно-техническое руководство всем комплексом работ (процессов, операций) по управлению полетами одного или нескольких КА одного типа.

Средства управления КА представляют собой унифицированные командно-измерительные станции, предназначенные как для передачи на КА командно-программной информации, так и для приема с КА телеметрической информации и ряда других задач.

Заметим, что связь между космическим аппаратом и средством управления может осуществляться только в зонах радиовидимости (ЗРВ).

Наряду с ЦУП КА командно-измерительный пункт является основным звеном НКУ КА. На каждом КИП организован пункт управления, осуществляющий общее руководство персоналом средств управления КА и контроль выполнения ими плана задействования средств.

Командно-измерительные пункты расположены равномерно по территории Российской Федерации таким образом, что с них обеспечивается контроль участков орбиты КА ближнего космоса на всех витках, проходящих не только над территорией РФ, но и над приграничными территориями. Кроме того, они позволяют обслуживать КА на геостационарной орбите в интервале долгот подспутниковых точек от  $\sim 28$  до  $\sim 164^\circ$  западной долготы,

включая все точки геостационарной орбиты восточной долготы, что составляет более половины геостационарной орбиты.

В указанном интервале размещены все действующие и планируемые перспективные отечественные геостационарные КА, выводимые как в соответствии с Федеральной космической программой, так и различными коммерческими программами. Такое количество и расположение КИП определяются как задачами обеспечения непрерывности управления КА, так и требованиями дублирования и резервирования. Схематическое расположение КИП представлено на рис. 2.

Для осуществления управления космическим аппаратом ЦУП в зонах радиовидимости проводит сеансы связи с помощью системы связи и передачи данных (ССПД).

Перед каждым сеансом связи осуществляется подготовка к его проведению, во время которой устанавливается соединение между ЦУП КА и средством управления. Затем осуществляется передача на средство управления технологической и другой необходимой информации, после чего осуществляется расчет программы работы аппаратуры станции.

Во время проведения сеанса связи средством управления осуществляется передача командно-программной информации на КА, прием телеметрической информации с КА, измерение текущих нави-

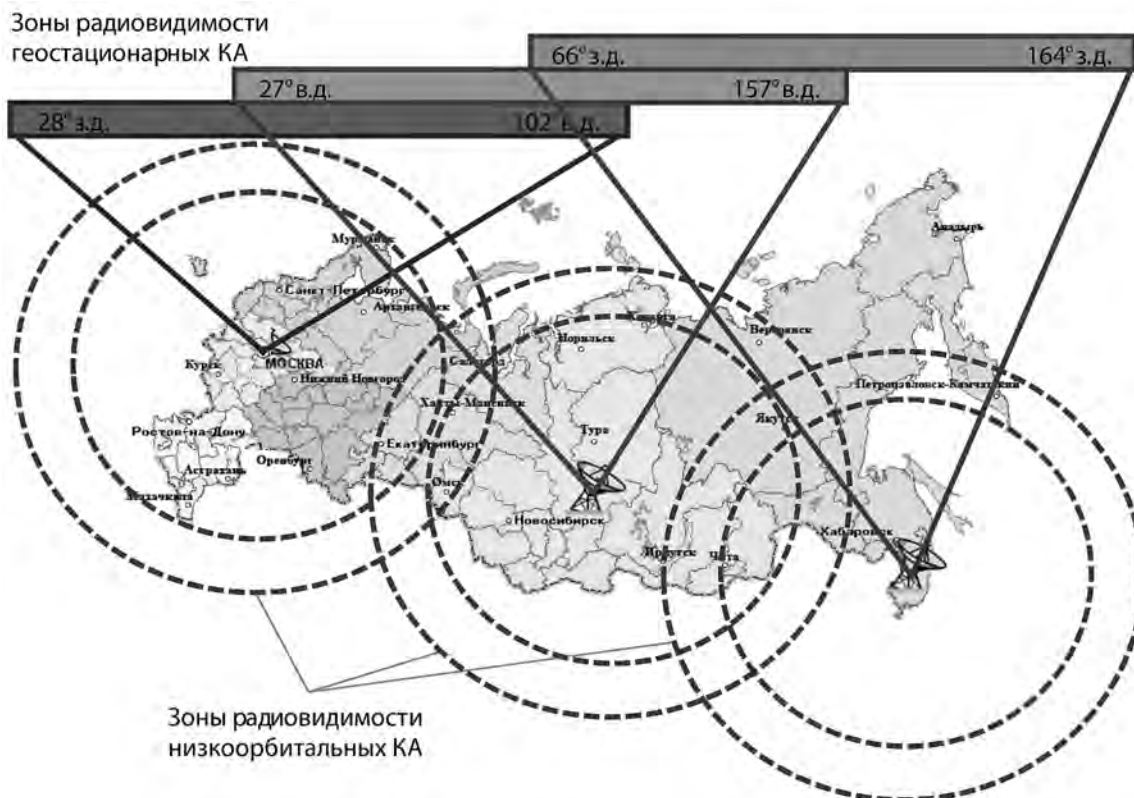


Рис. 2. Схематичное расположение командно-измерительных пунктов

гационных параметров движения КА и т. д. Заметим, что на сеансе связи может выполняться только часть из вышеперечисленных операций. В штатном режиме управление командно-измерительной станцией осуществляется из ЦУП КА. При нештатной ситуации управление станцией может осуществляться персоналом КИП, обслуживающим станцию.

После завершения сеанса связи персонал ЦУП подводит итоги сеанса связи. Осуществляется анализ полученной телеметрической информации. В случае выявления нештатной ситуации выясняются ее причины и составляется перечень мер для ее устранения (парирования). По итогам проведения сеанса связи может быть принято решение о проведении дополнительного (ранее не запланированного) сеанса связи.

В условиях ресурсных ограничений возможно возникновение конфликтных ситуаций при планировании задействования средств управления, когда возникает необходимость задействования одних и тех же средств в одно и то же время для разных КА или противоречие заявки и существующих ресурсных ограничений. Пересечение временных интервалов сеанса связи, указанного в заявке, и планового технического обслуживания средства управления также является конфликтной ситуацией. При увеличении числа КА, находящихся на орбите, возрастает нагрузка на средства НКУ, что приводит к увеличе-

нию количества конфликтных ситуаций.

Для обеспечения бесконфликтного использования средств управления необходимо централизованное планирование их задействования, реализуемое единым органом – органом планирования. Процесс планирования задействования средств управления КА заключается в распределении этих средств, а именно их временного ресурса.

Распределение временного ресурса осуществляется на основании заявок на задействование средств управления, поступающих от ЦУП КА. Каждая заявка сопровождается требованиями со стороны ЦУП КА (по уровню важности проведения той или иной операции на объекте и т. п.), то есть приоритетностью. По мере увеличения числа КА, находящихся на орбите, возрастает и число заявок.

Для построения функциональной модели органа планирования была выбрана методология функционального моделирования и графической нотации на основе стандарта IDEF0 (integrated definition), определена схема взаимодействия органа планирования с абонентами (рис. 3).

По результатам анализа предметной области были сформулированы требования к АС РСУ КА, основными из которых являются:

- просмотр, ввод и редактирование нормативно-справочной информации (сведения о КА, о средствах управления и т. д.);

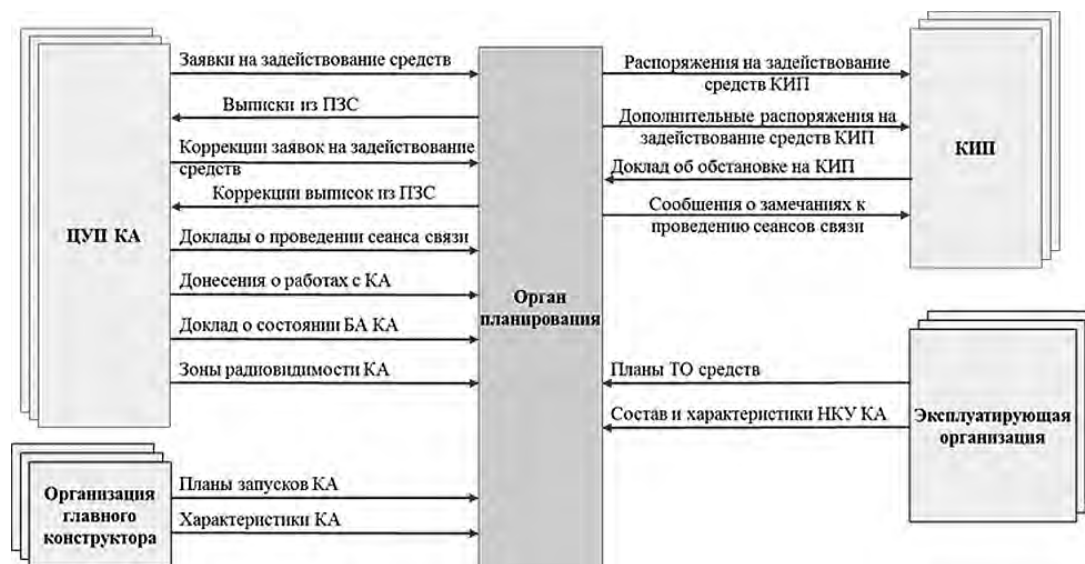


Рис. 3. Схема взаимодействия органа планирования с абонентами

- информационный обмен органа планирования с абонентами;
- формирование и коррекция ПЗС;
- статистическая обработка данных о работе средств управления КА;
- формирование отчетов о работе средств управления КА и сведений о текущем состоянии НКУ КА;
- наличие контекстной справочной системы, позволяющей пользователю в процессе работы получить необходимую помощь;
- защита от несанкционированного доступа при помощи системы прав пользователей и индивидуальных паролей;
- печать входных и выходных документов, а также их экспорт в Microsoft Word.

Исходя из данных, полученных на этапе анализа, был принят ряд проектных решений по разрабатываемой автоматизированной системе, касающихся информационного, технического и программного обеспечения.

Так, в качестве системы управления базами данных (СУБД) была выбрана СУБД Oracle редакции Standard Edition с опцией Real Application Cluster (RAC), в качестве ОС серверов кластера – Oracle

Enterprise Linux, в качестве ОС клиентских компьютеров – Windows. Создан кластер на основе технологии Oracle RAC, состоящий из двух узлов (двух серверов), хранилища данных и коммутатора, объединяющего серверы во внутреннюю сеть, что позволило значительно повысить отказоустойчивость АС.

Для решения задачи информационного обмена органа планирования с абонентами было предложено использовать три варианта обмена.

Первый вариант – обмен через программу-клиента, устанавливаемую на стороне абонента. К достоинствам такого варианта можно отнести простоту и оперативность организации информационного обмена (достаточно установить специальное программное обеспечение (СПО) на существующий или новый компьютер в ЦУП КА), а также отсутствие необходимости доработки СПО ЦУП КА для реализации информационного обмена с органом планирования. Недостатком такого варианта является отсутствие интеграции информационного обмена в работу СПО ЦУП КА, что ведет к дополнительной нагрузке по вводу данных в СПО на оператора ЦУП КА [4].

Второй вариант – обмен непосредственно между базами данных (БД) органа планирования и абонента (рис. 4).

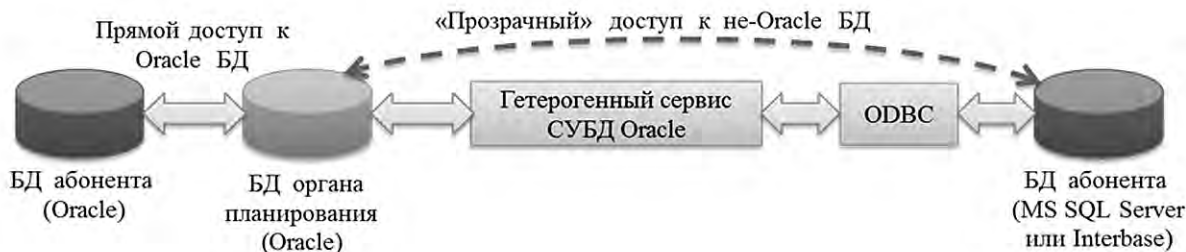


Рис. 4. Схема информационного обмена органа планирования с внешними абонентами непосредственно между базами данных



К достоинствам такого варианта можно отнести возможность интеграции информационного обмена в работу СПО ЦУП КА. К недостаткам – необходимость доработки СПО как со стороны ЦУП КА, так и со стороны органа планирования. Доработка СПО со стороны органа планирования под каждый

ЦУП КА обусловлена тем, что БД каждого ЦУП КА является уникальной, и унификация обмена между БД затруднительна ввиду технических и организационных моментов [4].

Третий вариант – передача xml-документов (рис. 5).

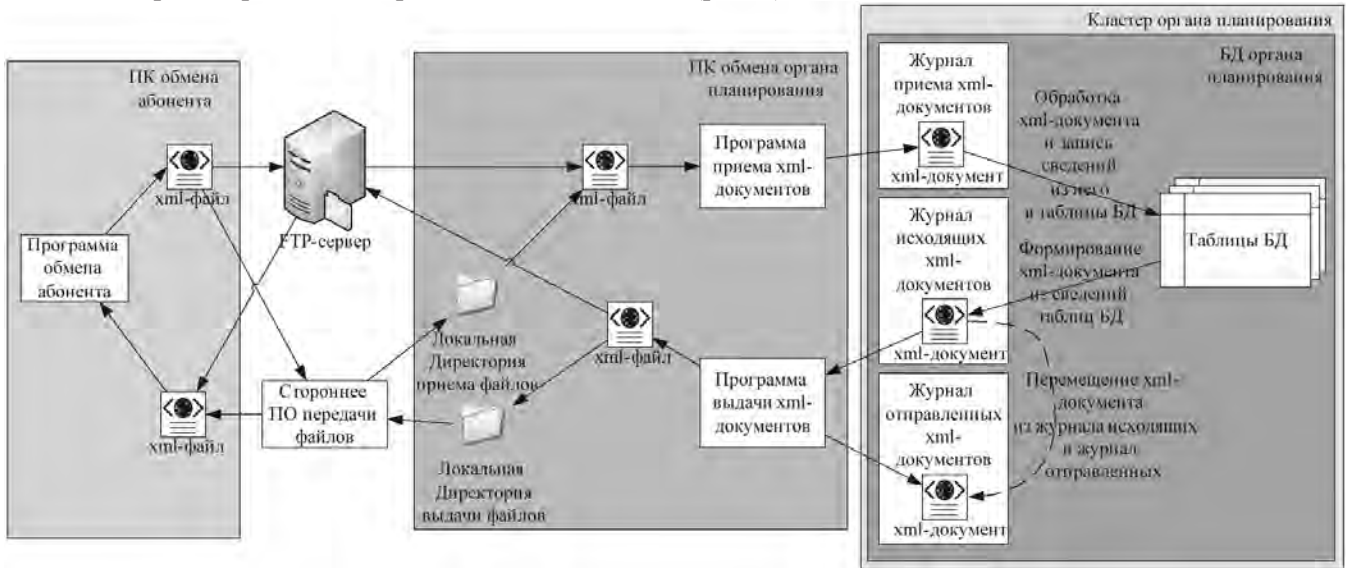


Рис. 5. Схема информационного обмена органа планирования с внешними абонентами xml-документами

Файловый обмен может осуществляться через FTP-сервер или через стороннее ПО передачи файлов, работающее с локальными директориями. Обработка и формирование xml-документов осуществляется в БД. При этом на компьютер обмена органа планирования устанавливаются службы приема и выдачи файлов.

Данный вариант организации информационного обмена является наиболее приоритетным. Его главными достоинствами являются унификация обмена органа планирования с ЦУП КА и возможность интеграции информационного обмена в работу СПО ЦУП КА. К недостаткам следует отнести необходимость доработки СПО ЦУП КА для реализации информационного обмена с органом планирования, а также необходимость в средствах передачи xml-документов (например, FTP-сервер). Возможна комбинация данного варианта организации информационного обмена с предыдущим, то есть передача xml-документов через обменные таблицы БД [4].

При поступлении входных документов осуществляется запись содержащихся в них сведений в БД органа планирования и выполняется контроль их корректности. После записи входных данных в БД они становятся доступными для дальнейшего использования.

После получения заявок (коррекций заявок) от ЦУП КА на задействование средств НКУ орган

планирования приступает к разработке предложений в ПЗС НКУ с учетом ресурсных ограничений, при этом выявляются и разрешаются все конфликтные ситуации [4].

Для разрешения конфликтных ситуаций был выбран алгоритм автоматизированного разрешения конфликтных ситуаций [5], с использованием системы приоритетности. Несмотря на очевидные достоинства, данный алгоритм имеет и недостаток: он позволяет разрешить конфликтную ситуацию лишь путем исключения из ПЗС конфликтного сеанса связи. Однако исключаемый сеанс может быть перенесен оператором на резервную ЗРВ исходя из данных, представляемых АС РСУ КА.

После разрешения конфликтных ситуаций осуществляется утверждение ПЗС (коррекции ПЗС), затем происходит формирование и передача выписок (коррекций выписок) из ПЗС и распоряжений (дополнительных распоряжений) на задействование средств управления внешними абонентами.

Для решения поставленных задач было разработано программное обеспечение АС на базе интегрированной среды Embarcadero C++ Builder XE2 из состава Embarcadero RAD Studio XE2, с использованием Devart Oracle Data Access Components (ODAC), Developer Express VCL, FastReport. Для создания объектов базы данных (хранимых процедур, функций, представлений, триггеров и т. д.) использовался Oracle SQL Developer.

На структурной схеме, представленной на рис. 6, отражены программы и входящие в их состав моду-

ли, составляющие специальное программное обеспечение АС распределения средств управления КА.

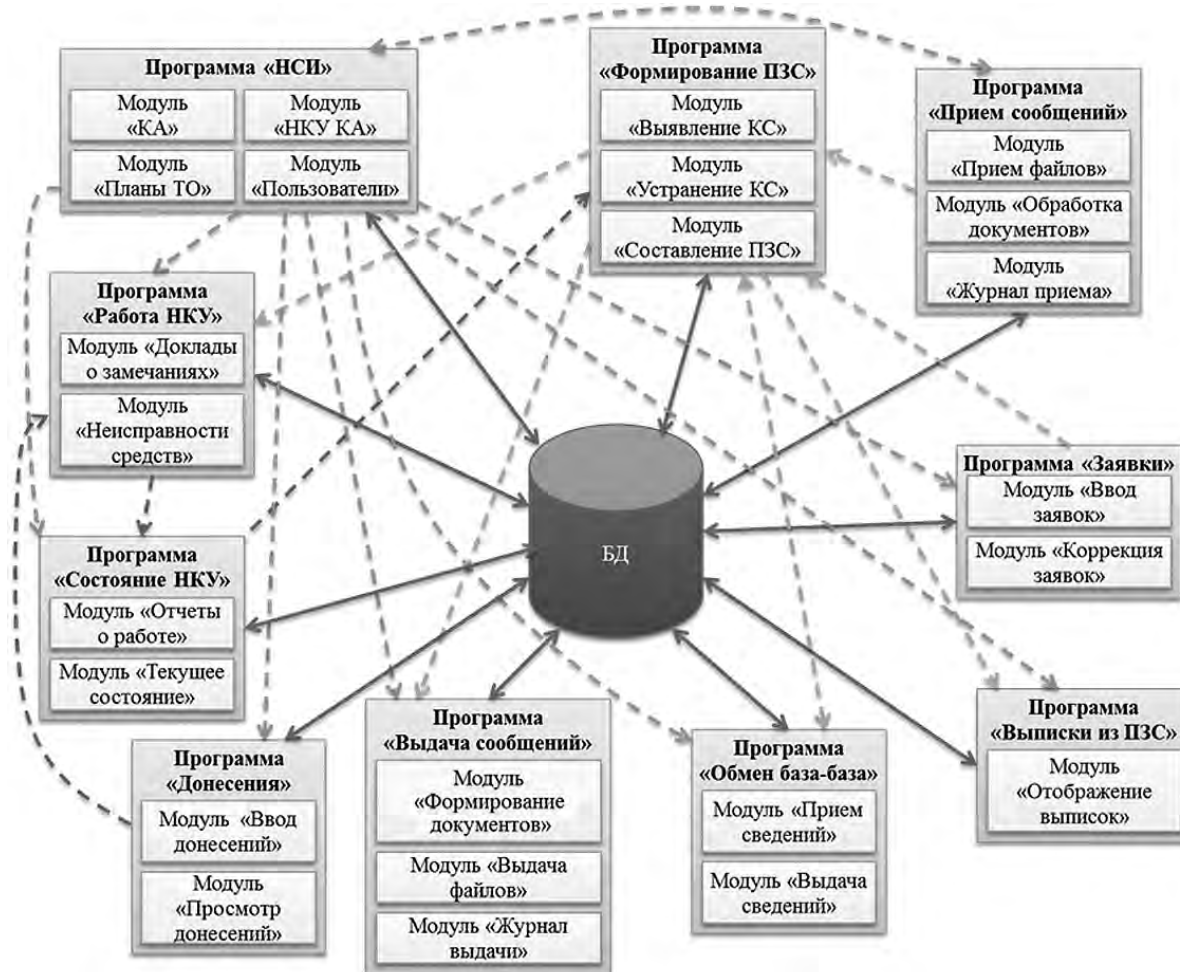


Рис. 6. Структурная схема программного обеспечения

Логическая взаимосвязь программ показана пунктирными линиями, сплошными – взаимодействие между программами, осуществляемое через базу данных органа планирования.

Таким образом, на основании проведенного анализа были сформулированы требования к разрабатываемой автоматизированной системе распределения средств управления космическими аппаратами. Построены инфологическая и даталогическая модели, позволившие спроектировать базу данных автоматизированной системы. Предложены варианты организации информационного обмена органа планирования с абонентами, проведен их сравнительный анализ.

В результате опытной эксплуатации было показано, что разработанная автоматизированная система позволяет значительно повысить оперативность составления и коррекции плана задействования средств наземного комплекса управления космическими аппаратами в условиях ресурсных ограни-

чений. При этом полностью исключается возможность возникновения конфликтных ситуаций.

#### Список литературы

1. Артюшенко В.М. Анализ систем управления космическим летательным аппаратом [Текст] / В.М. Артюшенко, М.И. Видов // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2011): сб. статей II Международной заочной научно-технической конференции / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти: Изд-во ПВГУС, 2011. – С. 18–29.
2. Дудко А.Н. Метод оптимальной организации обработки заявок на проведение сеансов связи с космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения [Текст] / А.Н. Дудко, А.Н. Золотарев, А.О. Литвиненко, Е.П. Сохраный // Космонавтика и ракетостроение. – Королев М.О.: Изд-во ЦНИИМАШ, 2011. – Т. 4. – № 69. – С. 84–91.

3. *Общие* принципы построения наземного комплекса управления. Назначение и область применения наземного комплекса управления [Электронный ресурс] / <http://www.sciential.ru/technology/kosmos/504.html>.

4. *Артюшенко В.М.* Повышение эффективности оперативного управления группировкой космических аппаратов в условиях ресурсных ограничений [Текст] / В.М. Артюшенко, Б.А. Кучеров // Алгоритмические и программные средства в информационных технологиях, радиоэлектронике и телекоммуникациях: сб. статей I Международной заочной научно-технической

конференции. Ч. 1. / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти: Изд-во ПВГУС, 2013. – С. 244–249.

5. *Кучеров Б.А.* Автоматизация процесса оперативного планирования применения и координации использования средств НАКУ КА НСЭН и измерений [Текст] / Б.А. Кучеров // Будущее российской космонавтики в инновационных разработках молодых специалистов: сб. материалов научно-практической конференции молодых ученых и специалистов предприятий ракетно-космической промышленности. Ч. 1. – Королев М.О.: Изд-во НОУ «ИПК Машприбор», 2011. – С. 48–53.



**Бакалов О.В.**  
**Bakalov O.V.**

*старший преподаватель кафедры «Машины и аппараты легкой промышленности» Черниговского государственного технологического университета, Украина, г. Чернигов*



**Чередниченко П.И.**  
**Cherednichenko P.I.**

*доктор технических наук, заведующий кафедрой «Машины и аппараты легкой промышленности» Черниговского государственного технологического университета, Украина, г. Чернигов*



**Бакалов В.Г.**  
**Bakalov V.G.**

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и аппараты легкой промышленности» Черниговского государственного технологического университета, Украина, г. Чернигов*

УДК 678.057.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЕНКИ В ПЛОСКОЩЕЛЕВОЙ ГОЛОВКЕ

Рассматривается математическая модель процесса движения полимера в каналах плоскощелевой головки. Приведены уравнения для определения изменения толщины и ширины пленки при ее вытягивании на участке между головкой и вытяжным валиком. Определено влияние геометрических размеров внутренних каналов головки и технологических параметров проведения процесса на параметры пленки. Сопоставление результатов, полученных на основании предложенной математической модели и на экспериментальной и промышленной установке, показало, что погрешность не превышает (6–8)%. Показано, что предложенная математическая модель может быть использована для определения оптимальных геометрических размеров внутренних каналов плоскощелевой головки и для определения технологических параметров проведения процессов при получении полимерной пленки заданной толщины. Предложен метод для нахождения оптимальных геометрических размеров внутренних каналов плоскощелевой головки, основанный на целевой функции, учитывающей неравномерность толщины пленки и ее отклонения от необходимой толщины.

*Ключевые слова:* моделирование, реология, полимерная пленка, вытягивание.

## SIMULATION PROCESS FOR PRODUCING POLYMER FILM IN THE FLAT-DIE

A mathematical model of the polymer motion in the channels of the flat-die is examined. The equations for determining the change in thickness and width of the film when it is drawing in the area between the head and the drawing

roller were given. The effect of the geometrical dimensions of the head's internal channels and technological parameters of the process on the film's characteristics was found. A comparison of results that were obtained while implementing giving mathematical model on both experimental and production units has shown that an error does not exceed 6–8%. It is shown that given mathematical model can be used to determine optimum geometrical dimensions of the head's internal channels and technological parameters of the process while obtaining a specified thickness of the film. A new method for finding optimum geometrical dimensions of the head's internal channels based on a objective function that taken into account an unevenness of the film and its deviations from necessary thickness was proposed.

*Key words:* modeling, rheology, polymer film, drawing.

Главным требованием к конструкции плоскощелевой головки является ее способность равномерно распределять полимер по всей длине, что определяется коэффициентом равнотолщинности. Известно [1–6], что коэффициент равнотолщинности пленки или ламинированного материала зависит от конструкции плоскощелевой головки и технологических параметров, при которых производится пленка. Известно, что на одной и той же плоскощелевой головке при различных технологических параметрах проведения процессов будет производиться полимерная пленка с различной средней толщиной и различными коэффициентами равнотолщинности. К технологическим параметрам принадлежит тип полимера, температура расплава полимера, входное давление, скорость ламинирования материала. Чтобы определить влияние указанных параметров на толщину пленки, можно проводить исследования на экспериментальной установке или проводить исследование с помощью математической модели движения полимера в плоскощелевой фильере. Следует отметить, что математическое моделирование имеет преимущества, потому что позволяет исследовать не только влияние технологических параметров, но и определить

оптимальные геометрические размеры внутренних каналов плоскощелевой головки.

Анализ публикаций [1–6] показал, что в данный момент не существует математических моделей и расчетных формул, которые позволяют определить геометрические размеры внутренних каналов плоскощелевой головки, которые позволяют производить пленку равной толщины по ее ширине с учетом технологических параметров проведения процесса (давления, температуры).

При разработке математической модели течения полимера расплава в формирующих каналах головки сделаны такие допущения: расплав является несжимаемой жидкостью; течение ламинарное; гравитационные силы настолько малы, что ими можно пренебречь; на месте контакта жидкости со стенками головки нет никакого проскальзывания.

Для моделирования движения полимера в каналах плоскощелевой головки представим ее состоящей из отдельных элементарных геометрических участков. Так, коллектор представим в виде конусных труб разных диаметров, а щели, которые создаются плитками, представим в виде плоских прямоугольных призм (рис. 1). Из этих объектов можно получить практически любой профиль каналов плоскощелевой головки.

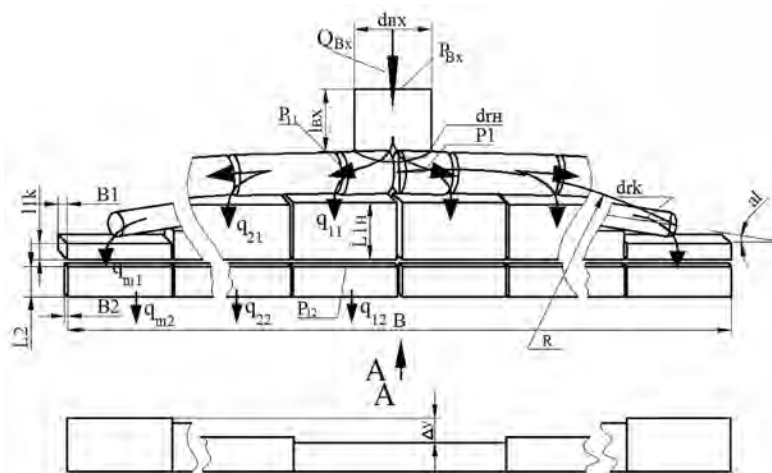


Рис. 1. Расчетная схема плоскощелевой головки:

$d_{bx}$  – диаметр входного патрубка;  $Q_{bx}$  – входной объемный расход;  $P_{bx}$  – входное давление;  $l_{bx}$  – длина входного патрубка;  $P_1$  – давление на входе в коллектор;  $d_{tr}$  – диаметр коллектора на входе;  $d_{rk}$  – диаметр коллектора на выходе;  $P_{11}$  – давление в конце первого участка коллектора;  $P_{12}$  – давление в конце первой широкой призмы;  $\alpha$  – угол наклона коллектора к горизонту;  $B1$  – ширина широкой щели;  $B2$  – ширина узкой щели;  $L_{11}$  – начальная высота широкой призмы;  $l_{1k}$  – конечная высота широкой призмы;  $L2$  – высота узкой призмы;  $B$  – длина головки;  $R$  – радиус кривизны коллектора;  $\Delta y$  – прогиб губки

Основные геометрические обозначения головки, которые используются в математической модели, представлены на рис. 1. Для каждой области можно написать уравнение объемных расходов полимера через поперечный разрез участка, когда известно значение перепада давления на участке, или, наоборот, определить перепад да-

вления при известном значении объемного расхода полимера.

Следует отметить, что для создания равномерности вытекания полимера из головки конечная губка (щель B2) имеет в середине прогиб величиной  $\Delta y$ . В этом случае математическая модель будет иметь вид системы уравнений (1–13).

$$Q_m = \frac{\pi n R^{3n+1}}{(3n+1)} \left( \frac{dp}{2\mu_0 dx} \right)^{1/n} \quad (1)$$

$$Q_{щ} = \frac{\pi n h^{2n+1}}{(2n+1)} \left( \frac{1}{\mu_0} \frac{dp}{dx} \right)^{1/n} \quad (2)$$

$$Q_k = \frac{\pi \mu_0}{2^{2n+3} (n+3)} \left[ \frac{6 \Delta p t g \alpha}{n \left[ \frac{1}{d_2^{3n}} - \frac{1}{d_1^{3n}} \right]} \right]^n \quad (3)$$

$$\Delta p_M = \xi \rho \frac{v^2}{2} \quad (4)$$

$$Q_{BX} = 2 \sum_{i=1}^m q_{i2} \quad (5)$$

$$q_{i2} = q_{i1} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$\mu_0 = A e^{E/RT} \quad (7)$$

$$n = cT^2 + dT + T \quad (8)$$

*Геометрические размеры головки*

$$d_{BX}, l_{BX}, al, drn, drk, B1, B2, l1k, L2, \Delta y, B, \quad (9)$$

$$b = b_0 - l \frac{1-f}{\sqrt{1-(1-f)^2}} \quad (10)$$

$$\delta_1 = \delta_0 \frac{b_0 v_0}{b v_1} \quad (11)$$

$$\text{Условия: граничные:} \quad \begin{array}{l} \text{давление на входе } P_{BX} \\ \text{давление на выходе } P_{B_{\text{вых}}} \end{array} \quad (12)$$

$$\text{начальные: } T = f_T(l_1), \text{ где } l_1 = i \frac{B}{m}. \quad (13)$$

Первые три уравнения – это объемные расходы через сечение трубы (1), через плоскую щель (2) и через коническую трубу (3). Следует отметить, что эти уравнения получены для случая степенной зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига (уравнение 14), которая имеет место для полиэтиленов [1–5]:

$$\tau = \mu_0 \dot{\gamma}^n = \mu_0 \left( \frac{dv}{dx} \right)^n, \quad (14)$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига;  $\mu_0$  – «условная» вязкость;  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига;  $v$  – скорость течения полимера;  $x$  – начальная координата;  $n$  – индекс течения.

Уравнение (4) системы позволяет вычислить местные сопротивления, которые возникают через сужение каналов, повороты и т. д.

Аналитически решить систему уравнений, которая описывает движение полимера по элементарным участкам, из которых состоит плоскощелевая головка, не представляется возможным. Для большинства элементарных участков неизвестными являются расходы и перепады давления на них. Следовательно, необходимо добавить уравнения, которые сделают систему статически определимой. Такими уравнениями являются уравнения баланса расходов в целом

для всей головки (5), в которой  $Q_{BX}$  – расходы на входе в головку;  $q_{i2}$  – расходы на выходе  $i$ -го участка узкой прямоугольной щели;  $2m$  – количество разбиений головки на элементарные призмы по ее ширине, а также уравнение баланса расходов на отдельных участках между широкой и узкой прямоугольными щелями (6), в этом уравнении  $q_{i1}$  – расходы на выходе  $i$ -го участка широкой прямоугольной щели.

Уравнения (7–8) описывают зависимость вязкости и индекса течения от температуры. Уравнения (10–11) позволяют определить ширину  $b$  и толщину  $\delta l$  пленки в результате ее вытяжки [3,7]. Начальные и граничные условия приведены в уравнениях (12–13).

В процессе расчета плоскощелевой головки ее геометрические и технологические параметры процесса формования (давление перед головкой  $P_{BX}$ , давление на выходе из головки  $P_{ВИХ}$ , распределение температур полимера в середине головки по ее длине  $T=fT(l_i)$ ) рассматриваются как известные. В основу расчета положен баланс давлений и баланс расходов при полученных давлениях по всем участкам и по всей головке в целом. Идея такого баланса заключается в том, что задается значение давления  $P_1$  (в пределах от 0 до  $P_{BX}$ ) после первого участка цилиндрической трубы. После этого рассчитываются расход полимера  $Q_{BX}$  на выходе цилиндрической трубы длиной  $l_{BX}$  по первому уравнению (1) системы. Полученные расходы полимера  $Q_{BX}$  распределяются равными частями на два наклоненных конических канала, потому что головка считается симметричной. Расход  $Q_{BX}/2$  и входное давление  $P_1$  известны, что позволяет по уравнению (3) системы рассчитать давление в конце конического канала  $P_{11}$ . Для определения расходов полимера  $q_{11}$  на первом участке широкой щели задаем давление  $P_{12}$  в пределах от 0 до  $P_1$ . Используя уравнение (2) системы, рассчитаем  $q_1$ . Аналогично рассчитаем расход на узкой щели  $q_{12}$  по уравнению (2) системы с учетом того, что давление на входе этой щели  $P_{12}$ , а на выходе из головки избыточное давление  $P_{ВИХ}$  равняется нулю. Учитывая, что затраты на широкой щели и расход на узкой щели будут равными, методом дихотомии необходимо изменять давление  $P_{12}$  таким образом, чтобы выполнялось равенство уравнения (7)  $q_{11}=q_{12}$  с заданной точностью (ошибка не должна превышать значение  $\Delta q=1,0 \cdot 10^{-11}$ ). Следует отметить, что эта разность дает отклонение на выходе меньше 0,0001 % по расходам полимера.

После определения затрат на первом участке щели  $q_{11}$  определим расход на втором коническом канале как разницу  $Q_{BX}/2 - q_{11}$ . После этого можно рассчитать давление в конце второго участка конического канала  $P_{21}$ , процесс расчета повторяют для вто-

рого участка щели и так далее до последнего участка. После проведенных расчетов имеем значения расходов на всех участках на выходе из головки. Далее проводим проверку на равенство расходов на входе и на выходе из головки – уравнение (5) системы. Принимаем точность баланса расходов на выходе и входе из головки ( $\Delta q=1,0 \cdot 10^{-6}$ ), которая обеспечивает ошибку по общему расходу менее 0,01%. Если расход на входе превышает расход на выходе, то величину давления  $P_1$  необходимо увеличить, если, наоборот, расход на входе меньше, чем на выходе, то давление  $P_1$  необходимо уменьшить. Для нахождения значения давления, при котором будет сохраняться с заданной точностью баланс расходов на входе и выходе головки, применим численный метод дихотомии.

Полученные расходы на выходе плоскощелевой головки позволяют рассчитать по уравнениям (10–11) толщину и ширину пленки на выходе при известном значении скорости ( $v_0$ ) наматывания пленки или материала, который ламинируется.

Таким образом, в целом для всей головки на каждом участке будет сохраняться баланс давлений и расходов полимера.

Алгоритм решения поставленной задачи представлен в виде блок-схемы (рис. 2).

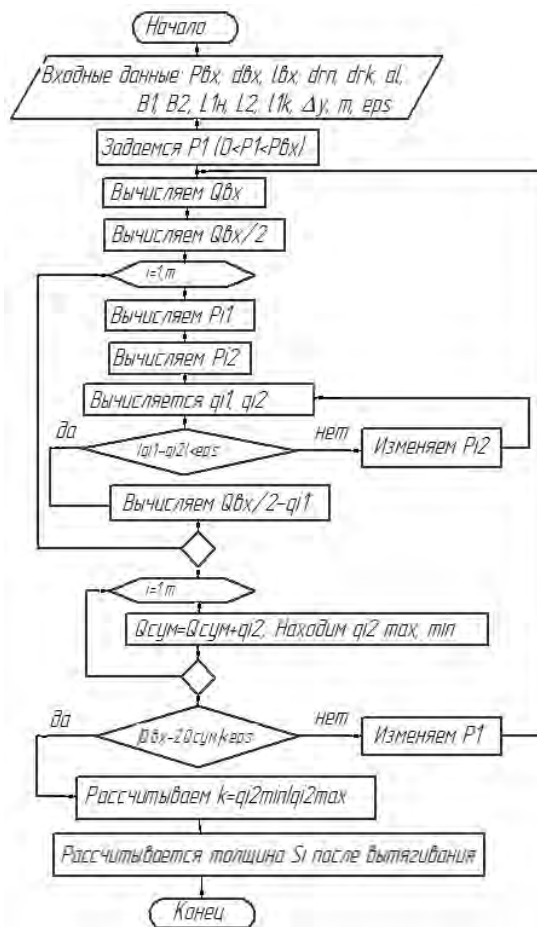


Рис. 2. Принципиальная блок-схема расчета толщины пленки

На основе приведенного алгоритма разработана программа на алгоритмическом языке Delfi (рис. 3) для нахождения давлений и расходов для всей головки при известных значениях геометрических размеров внутренних каналов плоскощелевой головки, где движется расплав полимера и технологических параметров проведения процессов формования пленки. Необходимо отметить, что для оценки равномерности распределения расплава полимера на выходе из головки используем коэффициент

равнотолщинности ( $k$ ), который рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{q_{i2min} b_0 v_0}{q_{i2max} b v_1}, \quad (15)$$

где  $q_{i2min}$ ,  $q_{i2max}$  – расходы минимальный и максимальный соответственно, на выходе из головки;  $b_0$ ,  $b$  – ширина пленочного материала на выходе из головки и на охлаждающем устройстве;  $v_0$ ,  $v_1$  – скорость полимера на выходе из головки и на охлаждающем устройстве.

Расчет толщины пленки по ширине фильеры	
Исходные данные	
Тип полистилена	15802-020
Входной диаметр (м)	0.07
Длина входного канала (м)	0.5
Начальный диаметр рукава (м)	0.068
Конечный диаметр рукава (м)	0.055
Угол наклона рукава	4.4
Первая ширина щели (м)	0.0006
Вторая ширина щели (м)	0.0015
Длина наиболее узкой щели (м)	0.026
Ширина фильеры (м)	2.1
Конечная высота расположения рукава (м)	0.005
Давление начальное (Па)	10000000
Температура (С)	180
Прогиб (м)	0.000008
Скорость бумаги (м/с)	2
Заданная толщина пленки (мм)	20
Расстояние до валика (м)	0.14
Коэффициент трения	0.1

Рис. 3. Программа для расчета толщины пленки по ширине головки

При проведении расчетов в качестве базовых параметров приняты геометрические величины внутренних каналов промышленной плоскощеле-

вой головки, которые приведены в табл. 1, и также указан диапазон их изменений.

Таблица 1

#### Геометрические параметры внутренних каналов плоскощелевой головки

№ п/п	Наименование показателей	Обозначения	Размерность	Базовое значение	Диапазон изменений параметра
1	Входной диаметр трубы подвода полимера	dvx	м	0.07	-
2	Длина трубы подвода	Lvx	м	0.3	-
3	Диаметр рукава начальный	dgn	м	0.068	0.03–0.08
4	Диаметр рукава конечный	drk	м	0.055	0.03–0.06
5	Угол наклона рукава	al	град.	6	4–10
6	Первая ширина щели	B2	м	0.0004	0.0002–0.0007
7	Вторая ширина щели	B1	м	0.0015	0.001–0.008
8	Длина узкой щели	L2	м	0.058	0.02–0.08
9	Ширина головки	B	м	2.1	-
10	Конечная высота размещения рукава	llk	м	0.005	0.002–0.01
11	Прогиб губки головки	Δy	м	0.000008	0.000002–0.00001

Учитывая, что при ламинировании чаще всего используется полиэтилен марки 15802-020, все дальнейшие расчеты проведены для марки этого полиэтилена. Технологические параметры, такие

как входное давление, температура, скорость ламинированного материала, изменялись в диапазонах, приведенных в табл. 2.

Таблица 2

Диапазон изменений технологических параметров

№ п/п	Наименование показателей	Обозначения	Размерность	Базовое значение	Диапазон изменений параметра
1	Входное давление в головке	$P$	МПа	12	10–14
2	Входная температура	$T$	°C	250	230–260
3	Скорость ламинирования	$v$	м/с	1.8	1.6–2.0

Изменяя геометрические размеры головки, можно исследовать, как эти параметры влияют на толщину пленки при ламинировании и на ее равномерность.

Обработка результатов расчетов позволила провести анализ влияния геометрических размеров внутренних каналов плоскощелевой головки на равномерность пленки полимера на выходе из головки, а также исследовать, как изменяется толщина пленки по центру и на краях головки.

На рис. 4 показано, что с увеличением угла наклона коллектора толщина пленки на краях головки не изменяется, а в центре головки резко уменьшается.

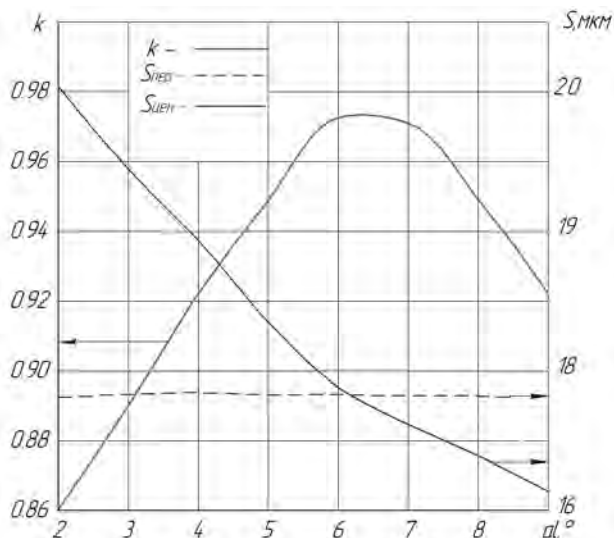


Рис. 4. Зависимость коэффициента равномерности ( $k$ ) и толщины пленки полимера в центре ( $S_{\text{цен}}$ ) и на конце ( $S_{\text{пер}}$ ) головки от угла наклона коллектора ( $\alpha$ )

Из графика видно, что существует оптимальное значение угла наклона рукава ( $\alpha = 6,4^\circ$ ), при котором коэффициент равномерности пленки полимера будет наилучшим (близким к 1).

Влияние узкой ширины щели ( $B2$ ) показано на рис. 5. Увеличение узкой ширины щели приводит

к увеличению толщины пленки в центре головки и на ее концах. При этом существует оптимальное значение ( $B2$ ), при котором значения коэффициента равномерности ( $k$ ) будет наилучшим.

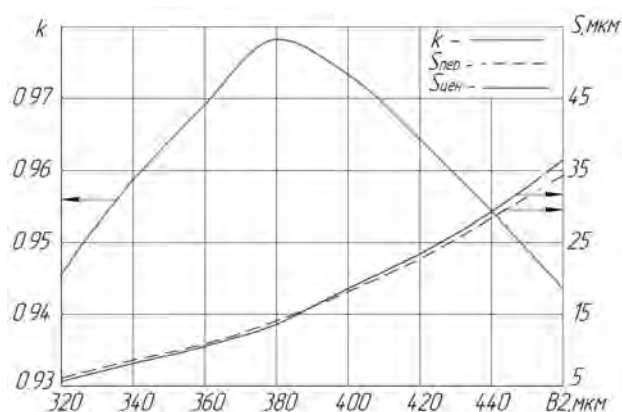


Рис. 5. Зависимость коэффициента равномерности ( $k$ ) и толщины пленки полимера в центре ( $S_{\text{цен}}$ ) и на конце ( $S_{\text{пер}}$ ) головки от первой ширины щели ( $B2$ )

Таким образом, программа позволяет исследовать влияние геометрических параметров головки на ее толщину и равномерность. Расчеты показали, что такие геометрические параметры, как угол наклона коллектора ( $\alpha$ ), конечный диаметр рукава ( $d_{\text{рк}}$ ), первая ( $B2$ ) и вторая ( $B1$ ) ширина щели, значительно влияют на равномерность толщины пленки по ее ширине. Поэтому их расчет при проектировании головки особенно важен. Компенсировать неправильно рассчитанные геометрические размеры внутренних каналов головки прогибом губки не всегда возможно.

Влияние технологических параметров (давления и температуры) на толщину пленки и на равномерность ее распределения по ширине приведено на рис. 6 и 7. Как видно из рисунков, технологические параметры незначительно влияют на коэффициент равномерности ( $k$ ), а их влияние на толщину пленки значительное.



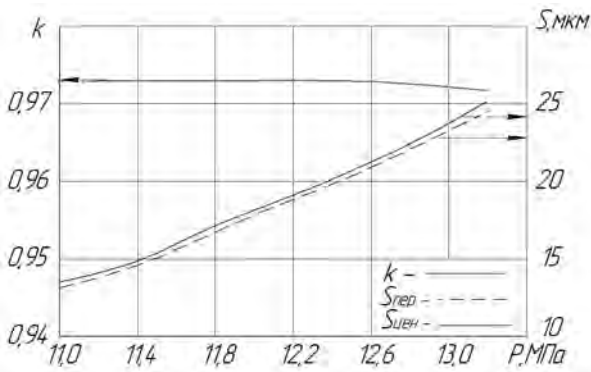


Рис. 6. Зависимость коэффициента равномерности ( $k$ ) и толщины пленки полимера в центре ( $S_{\text{цен}}$ ) и на конце ( $S_{\text{пер}}$ ) головки от давления ( $P$ )

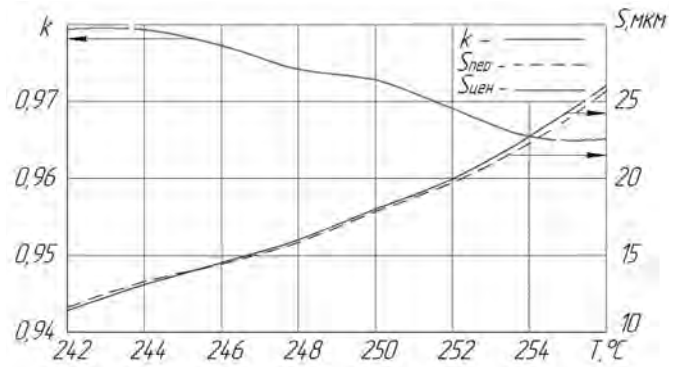


Рис. 7. Зависимость коэффициента равномерности ( $k$ ) и толщины пленки полимера в центре ( $S_{\text{цен}}$ ) и на конце ( $S_{\text{пер}}$ ) головки от температуры ( $T$ )

Учитывая, что приведенные геометрические параметры влияют на расход полимера по ширине головки, найти аналитически их оптимальные значения невозможно. Для определения оптимальных геометрических параметров головки, при которых расход полимера вдоль щели будет одинаковым, необходимо выбрать целевую функцию оптимизации.

В качестве целевой функции оптимизации предлагается уравнение:

$$F = a_1 \cdot (1 - k)^2 + e \cdot \sum_i^{2m} (S_i - S_{\text{задан}})^2, \quad (16)$$

где  $F$  – целевая функция;  $a_1$ ,  $e$  – коэффициенты;  $2m$  – количество разбиений плоскощелевой головки по ширине;  $S_i$  – толщина пленки на  $i$ -м участке;  $S_{\text{задан}}$  – заданная толщина пленки.

Целевая функция состоит из двух составляющих: первая составляющая – это неравномерность толщины пленки, вторая составляющая обеспечивает необходимую среднюю толщину пленки. Использование только первой составляющей приведет к тому, что конечная толщина щели будет равняться нулю.

Значения коэффициентов  $a_1$  и  $e$  определяются конструктором в зависимости от свойств получаемой пленки. При возрастании коэффициента  $e$  накладываются жесткие условия на толщину; при его уменьшении накладываются жесткие условия на равномерность расхода полимера по ширине головки.

Для нахождения оптимальных значений геометрических параметров плоскощелевой головки по уравнению (16) использовался метод покоординатного спуска.

Сопоставление результатов, полученных на основании предложенной математической модели и на экспериментальной и промышленной установке,

показало, что погрешность не превышает (6–8)%. Таким образом, предложенная математическая модель может быть использована для определения оптимальных геометрических размеров внутренних каналов плоскощелевой головки и для определения технологических параметров (давления и температуры полимера) проведения процессов при получении полимерной пленки заданной толщины.

#### Список литературы

1. Рябинин Д.Д. Исследование течения расплавов полимеров в формующих каналах плоскощелевых экструзионных головок: автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст] / Д.Д. Рябинин. – Днепропетровск: Днепропетр. химико-технолог. ин-т, 1974. – 27 с.
2. Сокольский О.Л. Розроблення плоскощільних головок для екструзійного формування листових та плівкових виробів із полімерних композицій: автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст] / О.Л. Сокольский. – Киев: Нац. техн. ун-т України, 2005. – 173 с.
3. Бакалов О.В. Експериментальне дослідження руху полімеру в плоскощільній головці [Текст] / О.В. Бакалов, П.І. Чердніченко // Сб. докладов VI Межд. конф. «Техника и технология химволокна». – Чернигов, 2007. – С. 102–104.
4. Торнер Р.В. Переработка полимеров [Текст] / Р.В. Торнер. – М.: Химия, 1976. – 404 с.
5. Ким В.С. Теория и практика экструзии полимеров [Текст] / В.С. Ким. – М.: Колос, 2005. – 568 с.
6. Микаэли В. Экструзионные головки для пластмасс и резины. Конструкции и технические расчеты [Текст] / В. Микаэли. – СПб.: Профессия, 2007. – 472 с.
7. Шаповал В.М. Механика элонгационного течения полимеров [Текст] / В.М. Шаповал. – М.: Физматлит, 2007. – 176 с.



**Будников А.Н.**

**Vudnikov A.N.**

аспирант кафедры «Информационная безопасность»  
Дальневосточного федерального университета,  
Россия, г. Владивосток

УДК 004.056.53

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАЩИЩЕННОСТИ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОТОКОЛОВ ЭЛЕКТРОННОГО ГОЛОСОВАНИЯ С МАССОВЫМ УДАЛЕННЫМ УЧАСТИЕМ И DRE-СИСТЕМ

Работа посвящена анализу защищенности криптографических протоколов электронного голосования и DRE-устройств от злоумышленника с административными правами доступа к избирательному комплексу. В статье вводится критерий отличия одного класса систем от другого. Помимо этого, в работе представлены две атаки, которые нарушитель такого уровня может провести. В статье показано, что ни протоколы электронного голосования, ни DRE-комплексы не могут ни предотвратить эти атаки со стороны злоумышленника, ни обнаружить их. Для обеих систем представлены защитные меры. Анализ строится на сравнении защищенности протоколов электронного голосования и DRE-комплексов от этих угроз с учетом рассмотренных в статье мер противодействия.

*Ключевые слова:* электронное голосование, криптография, анализ защищенности.

## COMPARATIVE SECURE ANALYSIS OF CRYPTOGRAPHIC ELECTRONIC VOTING PROTOCOLS WITH MASS REMOTE PARTICIPATION AND DRE SYSTEMS

The paper is dedicated to secure analysis of cryptographic e-voting protocols and DRE systems against adversary with administrative access to the election's equipments. Criteria of distinguishing one system from an other is introduced in the article. Also in the paper two attacks for such powerful adversary were presented. It was shown that neither e-voting protocols nor DRE systems could prevent or even detect such attacks. Protection against them were presented for both systems. Secure analysis is base on comparing protection level for e-voting protocols and DRE systems according to the defense steps.

*Key words:* electronic voting, cryptography, secure analysis.

Привлечение криптографии для усовершенствования процедуры выборов обусловлено стремлением преодолеть недостатки существующей системы. При этом преследуются следующие цели: повышение контроля над голосованием со стороны участников и наблюдателей; предотвращение злоупотреблений; исключение «человеческих» ошибок; снижение стоимости сопровождения. Как первые системы автоматической обработки бюллетеней, так и полностью компьютеризированные DRE-комплексы отвечают, по большей части, лишь двум последним целям. Таким образом, они сами подвержены ошибкам и злонамеренным действиям, что и служит основанием для критики таких устройств [1]. В результате ведется поиск решений

этой проблемы с использованием криптографических методов, то есть создаются процедуры верификации выборов.

В данной работе будет представлено сравнение защищенности криптографических протоколов электронного голосования и DRE-систем с учетом всех угроз, которым может быть подвержена та и другая сторона. Защищенность в данном случае будет рассматриваться как способность обеспечить выборы, для которых гарантирован учет одного поданного бюллетеня от любого явившегося избирателя.

Direct-Recording Electronic (DRE) – система с прямой записью голосов, которая представляет собой специализированный компьютер, использующий определенное программное обеспечение

и стандартную операционную систему с ограниченным функционалом.

В силу довольно нечеткого определения DRE-систем необходим критерий для выделения криптографических протоколов электронного голосования в отдельную категорию, поскольку они по своему исполнению также могут представлять собой специализированные ЭВМ. Можно утверждать, что ключевым отличием DRE-комплексов от криптографических протоколов электронного голосования является наличие у последних процедуры верификации. Критерий же использования криптопримитивов не является в данном случае приемлемым, поскольку в том или ином виде они могут быть использованы, например, для установления защищенного соединения, но это не изменяет в значительной степени процесс голосования.

Выделяют следующие типы верификации [2]:

1. Индивидуальная, при которой каждый избиратель может убедиться в том, что его голос учтен.
2. Всеобщая, при которой любой наблюдатель может убедиться в том, что все поступившие голоса посчитаны.
3. Верификация правомочности, при которой любой наблюдатель может убедиться в том, что каждый избиратель подал только один бюллетень.

Интуитивно понятно, что криптографический протокол электронного голосования, в котором реализованы все представленные типы верификации, должен обеспечить максимально защищенное от злонамеренного воздействия волеизъявление. Но есть угрозы, которые не могут быть выявлены ни одной из перечисленных проверок. Далее будут представлены две атаки, позволяющие обойти описанные защитные меры.

Первая из атак нами определяется как «Атака неявившегося избирателя». Одна из целей разработки криптографических протоколов электронного голосования – предоставление возможности массового удаленного участия в выборах. Под «удаленным участием» подразумевается то, что весь обмен данными (передача бюллетеня, отправление бюллетеня в урну и т. д.) происходит без передачи их физического носителя, на котором они хранятся. «Массовый» означает то, что использование удаленного доступа не является исключительным случаем и доступно любому желающему. При этом все проблемы, связанные с предотвращением угроз, возникающих для таких систем, должны быть устранены средствами протокола. Список угроз, от которых он должен быть защищен, достаточно широк, остановимся на ключевых [3]:

1. Тайна голосования должна быть сохранена в не меньшей, чем при традиционных методах, степени.

2. Защита от повторного голосования.
3. Наличие трех процедур верификации.

Сам алгоритм работы протокола будет рассмотрен нами в довольно упрощенной форме [4]. Избиратель сначала аутентифицируется, используя некий секрет, предоставленный ему до начала выборов, затем голосует в соответствии с установленной процедурой. После чего получает квитанцию, которая позволяет ему в будущем удостовериться в том, что его бюллетень учтен. Когда выборы заканчиваются, в общий доступ выкладываются их результаты.

Рассмотрим криптографический протокол электронного голосования с возможностью массового удаленного участия, удовлетворяющий представленным выше требованиям. Пусть существует злоумышленник, обладающий доступом к спискам пользователей и к их аутентифицирующей информации в системе голосования. Тогда он может совершить следующую атаку, которая не будет обнаружена или предотвращена протоколом.

Когда выборы близки к завершению, злоумышленник может выявить лиц, не принявших в них участие, и подменить их аутентифицирующую информацию. После чего атакующий от имени этих избирателей проходит всю процедуру голосования.

Не трудно убедиться, что три описанных типа верификации не могут обнаружить факта голосования за неявившихся избирателей. Заметим, что протоколы, не предусматривающие возможность голосования без физического присутствия на избирательном участке, увеличивают сложность осуществления и вероятность обнаружения такой атаки. Вопрос защиты от данной угрозы будет освещен позже.

Следующая атака нами названа «Атакой деанонимизации».

Рассмотрим криптографический протокол электронного голосования с возможностью массового удаленного участия, удовлетворяющий требованиям, представленным выше. Пусть существует злоумышленник, обладающий правами создателя системы голосования. Тогда он может совершить следующую атаку, которая не будет обнаружена или предотвращена протоколом.

В процессе создания или поддержания системы злоумышленник может внедрить модуль, который будет снабжать бюллетени метками, позволяющими проследить связь «избиратель – бюллетень», что приводит к нарушению анонимности. Данная атака подобно той, что описана для перешифрованных сетей Чаума [5].

Очевидно, что в протоколе не предусмотрена процедура контроля анонимности. Причина заключается в том, что данная задача является более

сложной, чем верификация итогов выборов, и ее решение выходит за рамки самого протокола. Применяемый для контроля учета голосов принцип сравнения входных и выходных данных не пригоден для проверки сохранения анонимности.

Нужно отметить, что описанная атака может быть расширена до атаки внедрения модулей, то есть изменения кода программы с целью обхода систем защиты.

Для предотвращения описанных атак необходим контроль целостности базы данных пользователей и программного кода. При этом мы исходим из того, что в процессе создания пользователей не произошла утечка их аутентифицирующей информации, а программный код был предварительно проверен на отсутствие внедренных модулей. Однако контроль целостности требует наличия доверенного лица, не вовлеченного в процесс обслуживания системы голосования.

Представленные изменения в значительной степени влияют на защищенность криптографических протоколов, поэтому стоит обратить внимание на то, как подобные усовершенствования отразятся на DRE-системах. Внедрение контроля целостности для них также исключит возможность злонамеренного незаметного воздействия, связанного с неправомерной модификацией системы, при условии предварительной проверки DRE-комплекса на отсутствие ошибок и внедренных модулей. Между тем даже корректно работающая DRE-система остается подвержена атаке, которая заключается в попытке проголосовать несколько раз. Очевидно, что любой

комплекс будет защищен от такой угрозы в ее прямом исполнении, но в случае существования некоторого более изощренного пути, не обусловленного эксплуатацией уязвимостей в системе, лишние голоса не будут обнаружены.

В итоге защищенность одной и другой системы в значительной степени зависит от третьего доверенного лица, гарантирующего отсутствие несанкционированных изменений в них. Но даже в этом случае криптографические протоколы предпочтительнее DRE-комплексов, так как процедура верификации позволяет обнаружить ошибки и попытки атак.

#### Список литературы

1. *Lauer T.* The risk of e-voting [Text] / T. Lauer // *Electronic Journal of e-Government*, 2004. – P. 177–186.
2. *Kremer S.* Election verifiability in electronic voting protocols [Text] / S. Kremer, M. Ryan, B. Smyth // *ESORICS'10: 15th European Symposium on Research in Computer Security* 6345, 2010. – P. 389–404.
3. *Chou J.* A novel secure electronic voting protocol based on bilinear pairings [Electronic resource] / J. Chou, Y. Chen, J. Huang – *Electronic data – Cryptology ePrint Archive*, 2006. – URL: <http://eprint.iacr.org/2006/342>.
4. *Advances in cryptographic voting systems* [Text] / B. Adida – Cambridge: Massachusetts institute of technology, 2006. – 254 p.
5. *Pfitzmann B.* Breaking an efficient anonymous channel [Text] / B. Pfitzmann // *Advances in Cryptology – EuroCrypt '94*. – Berlin: Springer-Verlag, 1995. – P. 332–340.



**Мешков И.К.**  
**Meshkov I.K.**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа



**Зайнуллин А.Р.**  
**Zainullin A.R.**

аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа



**Грахова Е.П.**  
**Grahova E.P.**

аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа



**Кутлужаров Р.В.**  
**Kutluyarov R.V.**

аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа

УДК 621.391.037.3

## МЕТОД СИНТЕЗА ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНОЙ ЛИНЕЙНОЙ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В данной статье предлагается разработать метод синтеза прогнозирующего фильтра на основе многомерной линейной экстраполяции для повышения эффективности беспроводных телекоммуникационных систем, а также провести оценку эффективности работы предложенных прогнозирующих фильтров в зависимости от шага предсказания и размерности обучающих векторов для минимизации ошибки предсказания и энтропии восстановленного сигнала. Приводится решение частных случаев для определенного количества элементов вектора предсказания, определяются статистические зависимости размерности вектора предсказания и порядка фильтра от среднеквадратической ошибки (СКО) и энтропии разностного сигнала, на основе экспериментальных данных находится оптимальный шаг предсказания и анализируются полученные результаты.

*Ключевые слова:* дифференциальная импульсно-кодовая модуляция, многомерная линейная экстраполяция, прогнозирующие фильтры, беспроводные телекоммуникационные системы.

## METHOD OF THE SYNTHESIS PREDICTION FILTER BASED ON THE MULTIDIMENSIONAL LINEAR EXTRAPOLATION TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF WIRELESS TELECOMMUNICATION SYSTEMS

In this article is proposed to develop a method of the synthesis prediction filter based on the multidimensional linear extrapolation to improve the efficiency of wireless telecommunication systems, as well as to assess the effectiveness of the proposed predictive filters depending on the prediction step and the dimension of training vectors to minimize the prediction error and the entropy of the reconstructed signal. The solution of the special cases for a number of elements of the vector prediction, determined statistical dependence of the vector dimension and prediction filter order from the mean square error and the entropy of the difference signal, based on the experimental data is founded optimal prediction step and analyzes the results.

*Key words:* differential pulse-code modulation, multidimensional linear extrapolation, predictive filters, wireless telecommunication systems.

Современные тенденции беспроводных систем связи направлены на передачу нарастающего объема информации. При этом требования к частотным ресурсам ужесточаются, а сжатие данных не всегда является выходом из сложившейся ситуации. Актуальным направлением для решения данной проблемы может быть кодирование данных с предсказанием на основе прогнозирующих фильтров. При передаче данных по каналу беспроводной связи возникают трудности, связанные с ограниченной пропускной способностью канала и большой информационной емкостью исходных данных. В данной статье приводится один из способов решения данной проблемы на основе цифрового фильтра. Суть метода заключается в использовании уже известной дифференциальной импульсно-кодовой модуляции (ДИКМ) [1] в совокупности с многомерной линейной экстраполяцией (МЛЭ) [2], что позволяет увеличить информационную пропускную способность канала. Обработка данных с использованием прогнозирующих фильтров является перспективным направлением развития телекоммуникационных систем, так как позволяет без существенной

потери информации экономить частотный и временной ресурс беспроводного канала связи.

В качестве математической основы для разработки метода синтеза прогнозирующего фильтра может быть выбран метод МЛЭ. Подробно данная методика была изложена в [2, 3]. В данной статье приводится решение частных случаев для определенного количества элементов вектора предсказания, а также оценка эффективности предложенных методов.

Метод дифференциальной импульсно-кодовой модуляции с использованием МЛЭ заключается в предсказании значений сигнала исходя из обучающих векторов  $\overline{X}_i$  и коэффициента предсказания  $\lambda$ . Векторы  $\overline{X}'$  состоят из первых членов последовательности значений сигнала:

$$\overline{X}' = \overline{X}_1 + \sum_{i=1}^{N-1} \lambda_i (\overline{X}_{i+1} - \overline{X}_1), \quad (1)$$

где  $a_i$  – члены выборок, состоящих из  $N$  элементов.

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n a_i^3 (a_i^2 - a_i^1) - \sum_{i=1}^n a_i^1 (a_i^2 - a_i^1)}{\sum_{i=1}^n (a_i^2 - a_i^1)^2}. \quad (2)$$

Тогда для частного случая при  $N=2$  формула (2) примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{\sum_{i=1}^n a_i^3 (a_i^{(2)} - a_i^{(1)}) - \sum_{i=1}^n \lambda_2 (a_i^{(3)} - a_i^{(1)}) (a_i^{(2)} - a_i^{(1)}) - \sum_{i=1}^n a_i^{(1)} (a_i^{(2)} - a_i^{(1)})}{\sum_{i=1}^n (a_i^{(2)} - a_i^{(1)})^2}; \\ \lambda_2 &= \frac{\sum_{i=1}^n a_i^3 (a_i^{(3)} - a_i^{(1)}) - \sum_{i=1}^n \lambda_1 (a_i^{(2)} - a_i^{(1)}) (a_i^{(3)} - a_i^{(1)}) - \sum_{i=1}^n a_i^{(1)} (a_i^{(3)} - a_i^{(1)})}{\sum_{i=1}^n (a_i^{(3)} - a_i^{(1)})^2}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Откуда можно вывести уравнение для предсказания данных:

$$\overline{X}' = \overline{X}_1 + \lambda_1 (\overline{X}_2 - \overline{X}_1) + \lambda_2 (\overline{X}_3 - \overline{X}_1), \quad (4)$$

где  $\overline{X}'$  – предсказанный вектор, состоящий из значений сигнала;  $\overline{X}_1, \overline{X}_2$  – обучающие векторы;  $\overline{X}_3$  – вектор новой проектной ситуации, доставляющий минимум ошибки предсказания.

Аналогичным образом были получены выражения для коэффициента предсказания и предсказанных значений вектора  $\overline{X}'$  для  $N=3$  и  $N=4$ .

Оценка эффективности предсказания проводилась в среде имитационного моделирования Matlab 7.11.0 Simulink, где в качестве модулятора и демодулятора ДИКМ использовались фильтры, передаточными коэффициентами которых являлись коэффициенты при векторах сигнала  $\overline{X}$  в формуле (1).

На рис. 1 приведена структурная схема имитационного комплекса с прогнозирующим фильтром.

Разработанная схема позволяет осуществлять квантование и дискретизацию сигналов, реализовы-

вать прогнозирующие фильтры различного порядка и шага предсказания, вычислять прогнозирующие коэффициенты, осуществлять предсказание и восстановление сигнала, оценивать СКО предсказанного сигнала, а также производить оценку полученных данных по качеству и эффективности предсказания, оценивать качество ДИКМ по битовым затратам (энтропии). В качестве тестовых сигналов были выбраны данные геолого-технологического исследования, а именно обороты ротора.

На основании обучающих векторов, состоящих из отчетов исходного сигнала с датчика, были вычислены коэффициенты предсказания  $\lambda$ , которые в дальнейшем использовались для предсказания. В качестве примера рассмотрим вычисление коэффициентов предсказания  $\lambda$  для двух обучающих векторов. Размерность обучающих векторов выбрана согласно неравенству (6) из [3]. Порядок предсказания определяется количеством обучающих векторов. Значения коэффициентов  $\lambda$  для предсказания сигнала с датчика представлены в табл. 1.

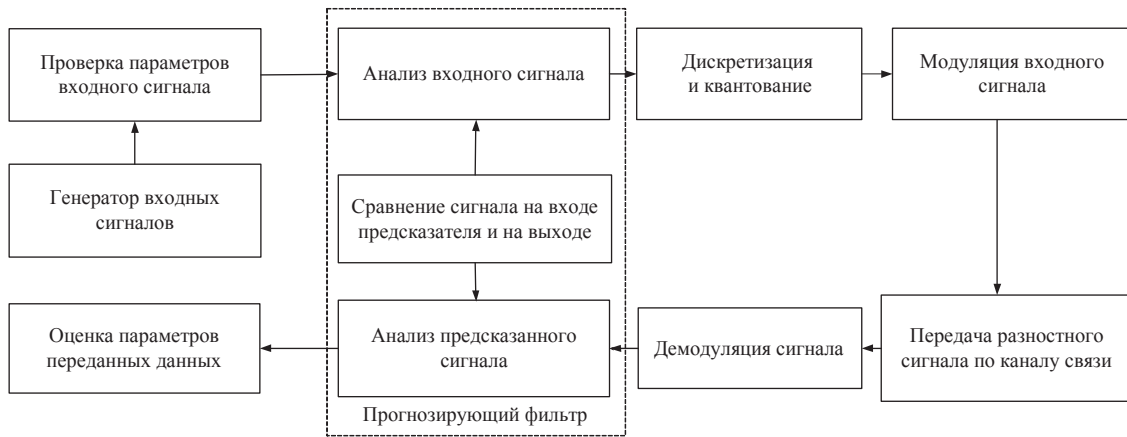


Рис. 1. Структурная схема имитационного комплекса

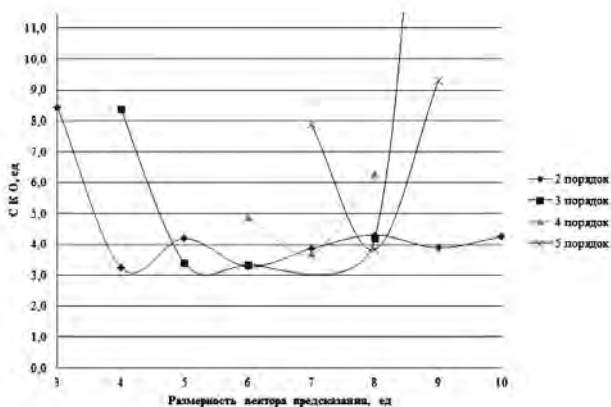
Таблица 1

**Значение коэффициентов  $\lambda$  для различных порядков предсказания сигнала датчика**

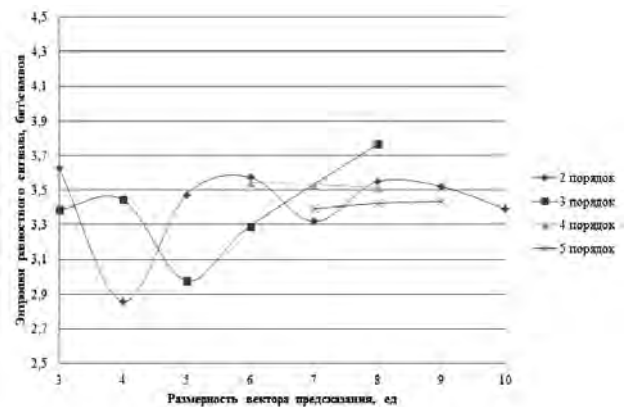
Размерность вектора	3	4	5	6	7	8	9	10
Порядок предсказания								
2	0,877	0,048	-0,146	0,379	0,536	0,639	0,557	0,625
3		-0,173 0,214	0,386 0,439	0,713 -0,514	-0,190 1,335	0,305 -0,183	-0,058 0,559	-0,016 0,962
4			0,615 0,923 -0,050	-0,032 0,539 0,061	0,008 0,944 0,146	0,892 0,293 0,021	0,594 -0,376 0,293	0,465 -0,529 0,736
5			1,087 0,989 -0,542 -0,347	0,730 0,351 0,405 -0,760	-0,119 1,003 0,335 0,023	0,622 1,177 0,320 -0,895	-0,553 0,591 -0,202 0,712	0,504 -0,598 0,565 -0,061

Далее рассчитанные коэффициенты предсказания  $\lambda$  использовались для предсказания сигнала с датчика. На рис. 2 представлены: а) зависимость СКО предсказанного сигнала от порядка предс-

казания и размерности вектора; б) зависимость энтропии разностного сигнала от порядка предсказания и размерности вектора.



а)



б)

Рис. 2. Зависимость: а) СКО предсказанного сигнала от порядка предсказания и размерности вектора; б) энтропии разностного сигнала от порядка предсказания и размерности вектора

При кодировании данных с датчика оборотов ротора на основе ДИКМ без использования МЛЭ

были получены отрицательные результаты по восстановлению сигнала (рис. 3).

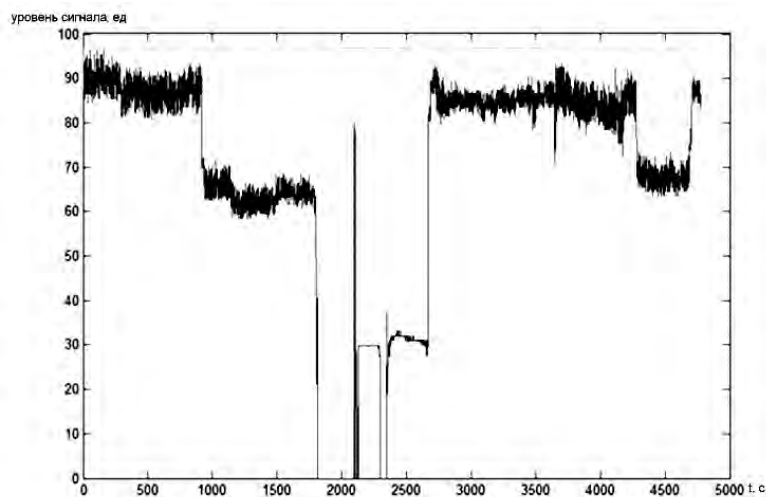


Рис. 3. Исходный сигнал с датчика и предсказанный сигнал с датчика с помощью стандартного варианта ДИКМ (сплошная линия – исходный сигнал, пунктирная – восстановленный)

Анализируя полученные экспериментальные данные, можно сделать вывод о том, что предложенный метод синтеза прогнозирующего фильтра на основе многомерной линейной экстраполяции позволяет снизить битовые затраты на кодирование данных. При этом экспериментально было установлено, что с увеличением шага предсказания эффективность предсказания снижается, оптимальным шагом предсказания необходимо выбирать значения от 1 до 4, при более высоких значениях шага предсказания искажения не позволяют восстановить исходный сигнал. При использовании прогнозирующих фильтров ошибка предсказания и энтропия предсказанного сигнала ниже, чем при стандартном методе предсказания, что позволяет восстановить исходный сигнал с минимальной СКО при заданных параметрах дискретизации и квантования. На рис. 2 приведена зависимость размерности вектора предсказания от СКО и энтропии разностного сигнала, данные показывают, что минимальная СКО для различных порядков лежит в пределах от 5 до 7, а энтропия разностного сигнала имеет наименьшие значения для порядка два и три. При этом наилучшим порядком фильтра предсказания, с точки зрения двух критериев, является второй, так как СКО и энтропия разностного сигнала будут минимальны.

Исследование прогнозирующих фильтров является эффективным средством увеличения про-

изводительности беспроводной системы связи. Полученные результаты могут повысить эффективность работы за счет оптимального кодирования исходных данных. Это позволяет использовать предложенную методику для обработки данных в низкоскоростных беспроводных системах передачи информации: 802.15.4 ZigBee, 802.15.1 Bluetooth, 802.15.1 High Rate WPAN, WiMedia, 802.15.3a.

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.В37.21.1974.*

#### Список литературы

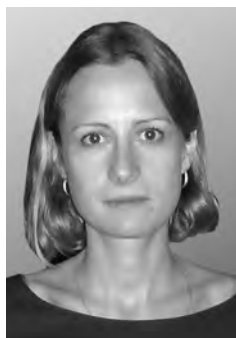
1. Дворкович В.П. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика) [Текст]/ В.П. Дворкович, А.В. Дворкович. – М.: Техносфера, 2012. – 1008 с.
2. Растринин Л.А. Экстраполяционные методы проектирования и управления [Текст]/ Л.А. Растринин, Ю.П. Пономарев – М.: Машиностроение, 1986. – 120 с.
3. Коровин В.М. Метод синтеза авторегрессионных фильтров для повышения эффективности телекоммуникационных систем передачи геологической информации по радиоканалам [Текст]/ В.М. Коровин, А.Х. Султанов, В.Х. Багманов, Н.А. Тарасов // Научно-технический вестник «Курорт». – 2012. – Выпуск 7–8 (217–218). – С. 259–265.





**Осипов В.П.**  
**Osipov V.P.**

кандидат технических наук,  
доцент, ведущий научный  
сотрудник Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки  
Института прикладной  
математики им. М.В. Келдыша  
Российской академии наук,  
Россия, г. Москва



**Сивакова Т.В.**  
**Sivakova T.V.**

младший научный сотрудник  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института прикладной  
математики им. М.В. Келдыша  
Российской академии наук,  
Россия, г. Москва



**Судаков В.А.**  
**Sudakov V.A.**

кандидат технических наук,  
доцент, старший научный  
сотрудник Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки  
Института прикладной  
математики им. М.В. Келдыша  
Российской академии наук,  
Россия, г. Москва



**Трахтенгерц Э.А.**  
**Trahtengerts E.A.**

доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки  
Института проблем управления  
им. В.А. Трапезникова  
Российской академии наук,  
Россия, г. Москва



**Загреев Б.В.**  
**Zagreev B.V.**

кандидат физико-математических наук,  
начальник лаборатории Федерального  
государственного унитарного предприятия  
«Центральный научно-исследовательский  
институт машиностроения»,  
Россия, г. Королев

УДК 519.816

## **МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ НАУЧНО-ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ (МКС)**

В статье рассматривается автоматизация и информатизация формирования программ научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на российском сегменте МКС. Проведен анализ существующих документов, регламентирующих принятие решений в данной предметной области. Выделены основные этапы организации экспертиз с применением компьютеризированной системы поддержки принятия решений. Предложены интернет-платформа и программные средства для обработки и анализа результатов экспертиз заявочной документации. Все сценарии реализуются через соответствующие веб-интерфейсы, в том числе

и для выгрузки собранных данных о поданных заявках и их оценках экспертами для последующей обработки средствами компьютеризированной системы поддержки принятия решений. С использованием сетевых технологий будет развиваться дистанционная экспертиза, выполняемая с применением удаленного доступа к информационным ресурсам специализированных баз данных с результатами реализованных космических экспериментов, которые необходимо развивать и сопровождать. Она может служить площадкой для публикации актуальной информации в Интернете для широкого использования членами экспертного сообщества.

*Ключевые слова:* научно-прикладные исследования, долгосрочная программа космических экспериментов, международная космическая станция, система поддержки принятия решений, экспертное оценивание, база данных, веб-сервер.

## METHODOLOGICAL BASE OF SUPPORT DECISION-MAKING IN THE PLANNING OF SCIENTIFIC AND APPLIED RESEARCH AND EXPERIMENTS ON THE INTERNATIONAL SPACE STATION (ISS)

The article deals with automation and computerization in formation programs of scientific and applied research and experiments planned on the Russian segment of the ISS. Existing documents governing decisions in this domain were analyzed. The main stages of the organization expertise with the use of computerized decision support systems have been identified. Internet platform and software for processing and analyzing the results expertise of application documents was proposed. All scenarios are implemented through appropriate web interfaces, including the unloading of the data collected on submitted applications and their estimates of experts for further processing means a computerized decision support system. By using network technologies will develop remote examination, performed with the use of remote access to the information resources of specialized databases with the results of the realized space experiments that are necessary to develop and maintain. It can serve as a platform for the publication of relevant information on the Internet for general use by members of the expert community.

*Key words:* scientific and applied research, long-term program of space experiments, the International Space Station, a decision support system, expert evaluation, database, web server.

Условия на борту МКС представляют собой специфическую среду для выполнения научных и прикладных исследований. Это особый ресурс космического полета, который можно плодотворно использовать для научных и технических целей.

Оценка состояния исследований в этой области показывает, что в современной России имеются глубокие исторические корни, идущие еще от работ К.Э. Циолковского, наработан значительный задел практических исследований на автоматических спутниках и долговременных орбитальных станций, еще сохранился отряд специалистов на предприятиях Роскосмоса, опытных ученых в РАН и научной молодежи.

В настоящее время, в связи с увеличением количества предложений по новым космическим экспериментам (КЭ), а также КЭ, находящихся в стадии подготовки и реализации, актуальным является повышение эффективности экспертных процедур при выявлении приоритетов и формировании Долгосрочной программы (ДП) научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на российском сегменте (РС) МКС (<http://knts.tsniimash.ru>) [1]. Достигнуть этого, по мнению авторов, возможно путем применения информационных, в том числе сете-

вых, технологий (ИТ) на стадии принятия решений [2, 3] о включении проектов в ДП.

### *1. Предпосылки информатизации и автоматизации*

*А) Широкий спектр проводимых исследований. Большие объемы фактических данных о результатах ранее проведенных исследований*

Советскими и российскими исследователями на борту космических аппаратов (КА) за более чем 30-летнюю историю проведено свыше 1 000 экспериментов по физике невесомости и космическим технологиям. Получены обширные данные по особенностям протекания фазовых переходов в условиях микрогравитации, по результатам выращивания в космосе различных полупроводниковых кристаллов, стекол, новых сплавов, композитов. Разработано разнообразное специальное научное и обеспечивающее оборудование. Выявлено существенное влияние микроускорений на процессы теплопереноса. Разработаны оригинальные системы для их демпфирования. Проведены широкие исследования и по другим направлениям: астро- и геофизике, дистанционному зондированию Земли. Особенно много космических экспериментов проводится

в области биомедицины, биотехнологии и технических экспериментов с целью дальнейшего освоения космического пространства.

*Б) Потребность во всестороннем изучении и анализе приобретенного опыта*

Микрогравитация и другие факторы космического пространства являются весьма сложными и мало изученными явлениями. Опыт проведенных ранее экспериментальных исследований на автоматических и пилотируемых КА говорит о том, что в этой среде могут быть получены как положительные, так и отрицательные результаты. Такая неопределенность создает значительные трудности для инстанций, принимающих решения о финансировании новых экспериментальных исследований. Объективная оценка заявок на КЭ без доступа к информации о ранее полученных результатах, существовании предлагаемых проектов, компетенции и научном авторитете их авторов и т. п. без всестороннего учета научных и технических приоритетов и располагаемых ресурсов крайне затруднительна.

При постановке на борт дорогостоящего оборудования возрастает потребность в актуальных сведениях, необходимых для технико-экономического обоснования КЭ, сопоставления наиболее перспективных направлений отечественных исследований с уровнем работ в мировом научном сообществе.

*В) Высокий уровень развития вычислительной техники и информационных технологий*

Сегодня мы являемся свидетелями бурного роста возможностей вычислительной техники, что определяет прогресс современных средств моделирования и информационных технологий. Появились новые возможности обобщения и критического сопоставления экспериментальных и новейших теоретических данных. Широкое применение сетевых технологий обеспечивает свободный и оперативный доступ к информации через глобальную сеть Интернет. Российские ученые и специалисты, принимающие участие в подготовке, экспертизе и отборе перспективных проектов, реализуемых на борту КА, нуждаются в едином информационном пространстве. Эта потребность имеет объективный характер.

*Г) Недостаточное использование компьютерных средств поддержки принятия решений при формировании ДП КЭ*

Несмотря на бурное развитие и широкое использование информационных технологий в различных областях практической деятельности, в рассматриваемой нами предметной области они носят пока вспомогательный характер. Помимо информационного ресурса Координационного научно-технического совета (КНТС) Роскосмоса (<http://knts.tsnimash.ru>)

следует выделить лишь сайт РКК «Энергия» (<http://www.energia.ru/ru/iss/researches/iss-researches.html>). Здесь поддерживается актуальная база данных (БД) о готовящихся и проводимых на МКС экспериментах. Этого явно недостаточно для эффективной работы экспертного сообщества.

*Д) Приобретен положительный опыт информационного моделирования предметной области микрогравитационных исследований и практического использования компьютеризированных систем поддержки принятия решений*

Исходя из необходимости развития и внедрения информационных технологий и перехода к информационному сообществу, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН вместе с ЦНИИМаш предложили концепцию информатизации и автоматизации, в основе которой лежит идея создания единой информационной среды и интегрированной с ней компьютеризированной системы поддержки принятия решений (СППР) [4, 5]. Идея нашла воплощение в разработанном ИПМ им. М.В. Келдыша РАН интернет-портале [www.microgravity.ru](http://www.microgravity.ru). Были отработаны необходимые технологии информационного моделирования предметной области, созданы необходимые базы данных, предложена процедура экспертизы заявочной документации с применением компьютеризированной СППР, исследованы типовые алгоритмы обработки результатов экспертиз и соответствующее программное обеспечение. Учеными и специалистами ИПМ им. М.В. Келдыша, ИПУ РАН и МАИ, на основании имеющегося опыта создания и практического использования компьютеризированных СППР [2, 3], по заданию и при непосредственном участии ЦНИИМаш в рамках НИР «СППР-1» была отработана методология аналитической обработки результатов экспертиз заявочной документации.

Формирование единого информационного пространства предполагает объединение, стандартизацию и унификацию необходимых информационных, программных и системных ресурсов творческих коллективов, предприятий и компаний, участвующих в формировании и реализации программ КЭ. Единая информационная среда открывает новые возможности для повышения эффективности процедуры формирования ДП КЭ.

Из всего вышесказанного следует, что в настоящее время:

- осознаны предпосылки для информатизации и автоматизации процедуры формирования ДП КЭ на РС МКС;
- предложены реальные пути формирования распределенной информационной среды и развития информационной поддержки российских ученых

и специалистов, принимающих участие в планировании и проведении КЭ на РС МКС [4, 5];

- получен необходимый опыт в создании специализированных информационных ресурсов [6, 7].

Необходимо отметить еще одно важное обстоятельство: на российском рынке нет решения в области информационных систем управления, полностью готового к применению в рассматриваемой области. Это связано с тем, что ведущим направлением деятельности постановщиков КЭ является научно-исследовательский и инновационный процесс. Большинство же представленных на рынке систем ориентировано на производство и торговлю. Функциональность, необходимая в нашем случае, частично может быть реализована в различных готовых системах, однако общего решения для различных предметных областей пока не существует.

*2. Анализ существующего регламента формирования Долгосрочной программы космических экспериментов на РС МКС. Рекомендации и предложения по его оптимизации и автоматизации*

Существующие нормативы, требования к процедуре отбора КЭ и порядок включения экспериментов

в ДП определяются ГОСТом Р 52017-2003 [8] и Приложением 2 к ДП [1]. Предварительный анализ существующих нормативов показал, что они касаются общего порядка формирования ДП КЭ. Рассмотрим составляющие этого процесса более подробно.

Предусмотрено два пути прохождения заявок на КЭ для включения его в ДП КЭ. Первый регламентирован ГОСТом Р 52017-2003 и реализуется при формировании ДП КЭ, второй – определяется Порядком изменения ДП КЭ, который прописан в Приложении к обновленной ДП КЭ версии 2008 г. Отличия в них не принципиальные, и оба регламентируют процедуру, которая представлена на рис. 1. Схема, выполненная в нотации IDEF0 [9], представляет модель процесса формирования ДП КЭ, которая содержит для каждого этапа наименование, входной и выходной потоки данных, регламентирующие (управляющие) условия и механизмы реализации этапов.

Проведение экспертиз профильными секциями КНТС является обязательным. Существующие нормативы регламентируют состав и содержание заявочной документации, подтверждают необходимость проведения экспертиз заявочной документации, определяют участников этого процесса и их роли. В частности,

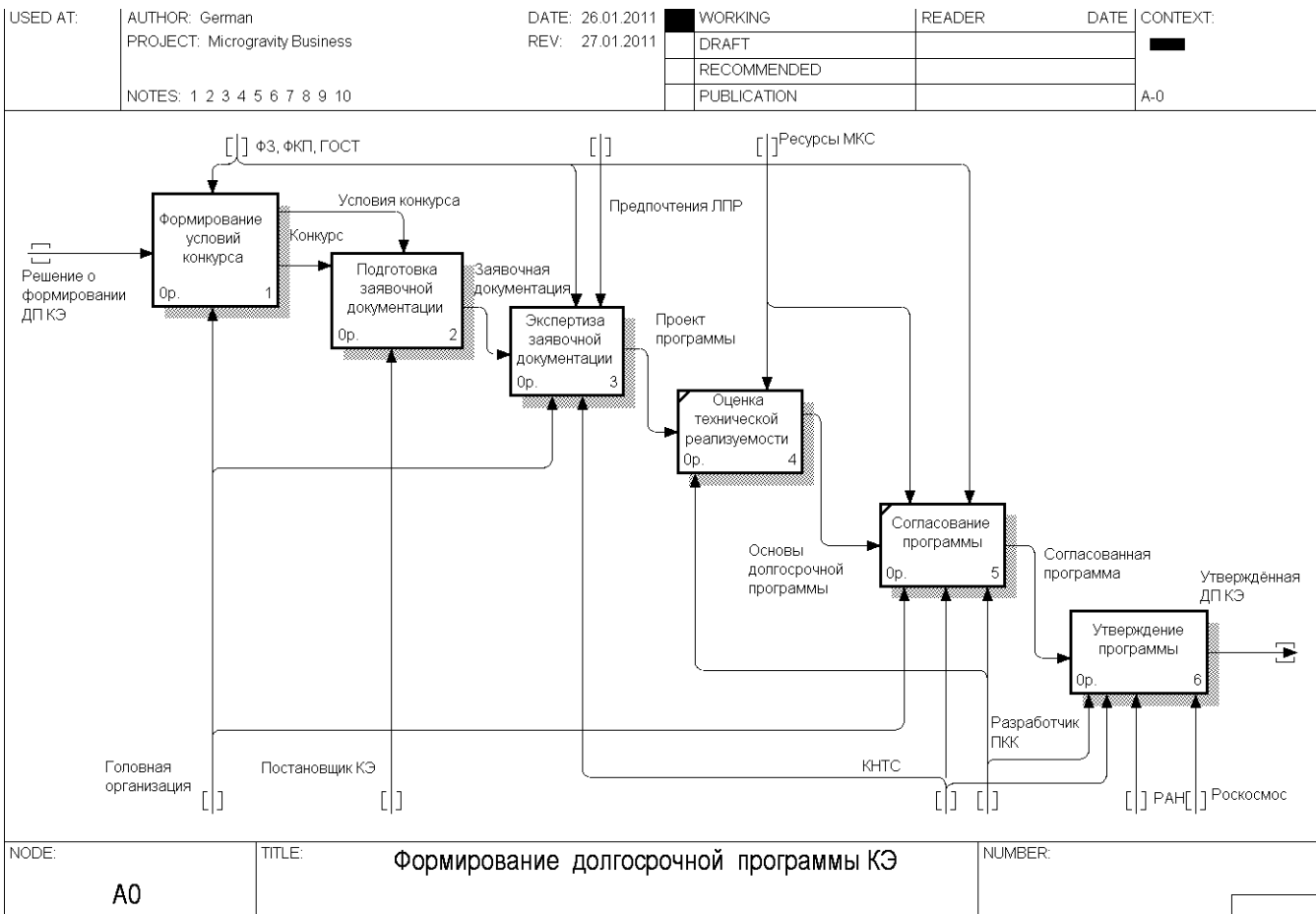


Рис. 1. Схема процессов формирования долгосрочной программы КЭ

головная организация, обеспечивающая деятельность КНТС (ЦНИИМаш), является организатором экспертиз и потребителем ее результатов, а секции КНТС привлекают экспертов и проводят экспертизу.

По результатам экспертиз ЦНИИМаш формирует проект ДП КЭ, который в дальнейшем является основой для формирования загрузки РС МКС и распределения имеющихся на борту ресурсов (энергетика, время занятости экипажа и т. д.).

Предварительный анализ существующих нормативов, проведенный с целью определения исходных предпосылок для информатизации и автоматизации экспертизы заявочной документации, показал следующее.

1. Нормативные документы [1, 8]:

– позволяют формализовать бизнес-процессы прохождения этапов согласования заявки (workflow), который возможно автоматизировать;

– содержат определения сущностей и их атрибутов, необходимых в процессе автоматизации;

– позволяют задать систему фильтрации на основе сформулированных ограничений, то есть определить те заявки, которые не должны рассматриваться;

– определяют параметры заявок, которые могут рассматриваться как критерии оценок, например, научная значимость, реализуемость и т. п.

2. В основе процедуры в соответствии с ГОСТом Р 52017-2003 [8] лежит экспертный анализ заявочной документации. Ввиду необходимости учета многих факторов при формировании экспертной оценки процедуру отбора космических экспериментов следует рассматривать как процесс выработки решения многокритериальной слабоструктурированной или неструктурированной задачи [2–4].

3. Изученная нормативная документация не содержит исчерпывающего списка критериев и правил ранжирования по этим критериям.

4. В настоящее время информация по космическим экспериментам хранится в слабоструктурированном виде. Степень структуризации хорошо прослеживается на сайте <http://knts.tsniimash.ru>.

5. Необходима дальнейшая нормализация входной информации до уровня атрибутов, которые могут рассматриваться как числовые или лексические (качественные) критерии.

6. Актуальной задачей остается создание базы данных экспертного сообщества. Сейчас поиск подходящего эксперта в соответствующей области ведется без привлечения компьютера. Одним из направлений автоматизации наполнения базы по экспертам может быть автоматическое сканирование интернет-баз разнородных систем. Например, из базы по научным статьям <http://elibrary.ru> или

из базы <http://grants.extech.ru> по молодым ученым – победителям грантов. Другим направлением разработки базы экспертного сообщества может стать система ранжирования экспертов. Она позволит по ряду критериев определить ограниченное подмножество экспертов, которые им соответствуют. Здесь будет важно оценивать компетенцию эксперта в данной предметной области и возможную личную заинтересованность в конкретном проекте.

7. Актуальными являются две близкие задачи:

- принятие решения по выбору заявок на проведение новых космических экспериментов на МКС;

- принятие решений о необходимости продолжить или прекратить эксперименты, которые уже ведутся.

8. Анализ существующих заявок показал, что большая их часть может быть отфильтрована по формальным признакам на соответствие нормативам. Для автоматизации подобной фильтрации целесообразно создать систему, реализующую работу с множеством логических выражений на языке первого порядка.

9. Дерево показателей для оценки заявок на космические эксперименты, разработанное ЦНИИМаш, включает как числовые, так и лексические шкалы. Для работы с номинальными лексическими шкалами без их перевода в аддитивную цифровую шкалу целесообразно воспользоваться комбинированными методами выявления предпочтений.

3. Основные этапы организации экспертиз с применением компьютеризированной СППР

Поскольку человеческая оценка имеет субъективную природу, одной из главных задач принятия решений является повышение объективности оценок. Возможный способ повышения объективности – получение коллективных (групповых) экспертных оценок.

Задачи, решаемые малыми группами (МГ) экспертов, характеризуются специализацией предметной области (ПО). Чем более специальный характер имеет анализируемая ПО, тем уже круг участников МГ. В связи с этим очевидными выглядят требования к их профессионализму. И чем более ответственным должно быть принятое решение, тем они выше.

Важным является вопрос и о численности МГ. Малое число участников (2–3 человека) не способствует повышению объективности оценки. Возрастание численности влечет усложнение коммуникаций участников на этапе обсуждения проблемы, усложняет организацию экспертизы и обработку ее результатов.

К определению численности группы, так же как и для многих других задач умозрительного анализа, во многих случаях может быть применена известная оценка [2, 3] размерности  $7 \pm 2$ .

Очевидно, что участники принятия решения могут придерживаться различных точек зрения на рассматриваемую проблему. Поэтому важным фактором группового выбора является поиск согласованных оценок. В соответствии с этим под групповым выбором понимается выработка согласованного решения о порядке предпочтения рассматриваемых объектов на основе индивидуальных мнений членов группы.

Групповой выбор альтернатив может быть основан на принципе большинства (мажоритарный принцип). Несмотря на очевидность применения, он сопряжен с решением ряда проблем, которые будут рассмотрены ниже.

Организация экспертизы зависит от специфики решаемой задачи. Тем не менее имеются достаточно общие этапы решения многих задач [2, 3].

1. Постановка задачи. В этом процессе обычно участвуют лицо, принимающее решение (ЛПР), системный аналитик и возможный исполнитель. Они знакомятся с проблемой, изучают различные источники информации и ставят задачу оценивания.

2. Формирование экспертной группы. Определяется количество и подбирается состав участников группы в соответствии со спецификой решаемой задачи.

3. Оценка компетентности экспертов. В качестве количественной оценки используются весовые коэффициенты экспертов. Их может назначать ЛПР, другие эксперты, либо участники оценивают друг друга. Примером исходной информации для определения весовых коэффициентов экспертов может стать таблица парных сравнений (аналогично турнирной таблице). В ней отражены предпочтения одного эксперта другому в различных парах.

4. Определение способа оценивания. Возможны различная степень анонимности (оценка доступная или недоступная для других), разный регламент оценивания (очная или заочная оценка) или способ представления информации для оценивания.

5. Предъявление информации для оценивания. Желательным является предварительное ознакомление экспертов с информацией, подлежащей оцениванию. Подготовка экспертов к совместной работе способствует улучшению взаимопонимания и экономит время.

6. Выполнение оценивания. В зависимости от принятой процедуры эксперты выставляют индивидуальные оценки либо вырабатывают коллективные в процессе обсуждения предъявленной информации. На основе индивидуальных оценок вычисляются групповые.

7. Оценка согласованности мнений экспертов. Оценивается разброс индивидуальных оценок и сте-

пень близости их к групповой оценке. Если разброс оценок превышает заданный предел (например, выше 20%), делается попытка их согласования. При отсутствии готовности к компромиссным решениям группа может быть расформирована, и осуществляется возврат к п. 2 процедуры. Здесь максимально используются компьютерные методы согласования.

8. Регистрация оценок. Результаты работы экспертов регистрируются на электронном или бумажном носителе и протоколируются с указанием времени выполнения оценки. Это необходимо для того, чтобы эксперт имел возможность впоследствии подтвердить данные им оценки.

9. Экспериментальное исследование. Выполняется проверка принятых решений на модели или на практике. При положительном результате принятое групповое решение утверждается. В противном случае организуется повторная групповая экспертиза с учетом полученной дополнительной информации.

Существенное повышение эффективности процедур принятия решений возможно за счет компьютеризированных СППР, играющих роль «систем-советчиков».

Концепция построения таких систем заключается в следующем:

- Решения, принимаемые ЛПР, носят субъективный характер. Одно и то же решение может быть идеальным для одного пользователя и совершенно не подходить для другого.

- Система поддержки решений должна быть ориентирована на конкретного ЛПР и помогать лично ему. Для этого она должна обладать средствами выявления и формализации системы ценностей пользователя, которая может отображаться в виде следующих его предпочтений на полном множестве альтернатив.

- Процедура ввода субъективной информации, критериев, их «весов» и т. п. должна быть понятна и удобна ЛПР.

- Система должна быть максимально свободна от субъективизма разработчика, то есть ограничения, принимаемые при разработке системы, должны как можно меньше влиять на результат. Если разработчик вынужден принять принципиальное решение, то он должен сформулировать его максимально доступным для понимания пользователя.

- ЛПР не обязано быть специалистом в информатике, то есть может не понимать структуры системы, и от него должны требоваться только обычные навыки работы с компьютером.

Всем перечисленным требованиям к компьютеризированной «системе-советчику» удовлетворяет СППР DSS/UTES, которая была создана на кафедре 302 МАИ

для решения широкого круга слабоструктурированных и неструктурированных задач многокритериального выбора высокой размерности. При этом система имеет возможность настройки на индивидуальные особенности ЛПП [3]. Это обстоятельство становится особенно существенным, когда речь идет об использовании универсальных СППР, ориентированных на работу с различными предметными областями.

4. Информационная среда обеспечения экспертиз в рамках web-проекта

Подготовка и сопровождение процедуры экспертизы и отбора заявок на КЭ связаны с реализацией ряда процессов.

Часть из них регламентируется нормативной документацией [1, 6] (рассылка предложений, проведение экспертизы) (рис. 1). Другая часть определяется процедурой проведения экспертиз. На рис. 2 приведена модель процессов, составляющих экспертизу заявочной документации, выполненной в нотации IDEF0. Диаграмма является составной частью общей модели (рис. 3). Она показывает место информационной среды и компьютерной СППР в процессе экспертизы заявочной документации.

Как видно, в экспертизе участвуют несколько участников: ЛПП, аналитическая группа, эксперты. Этапы процесса реализуются с помощью информационной среды и компьютеризированной СППР,

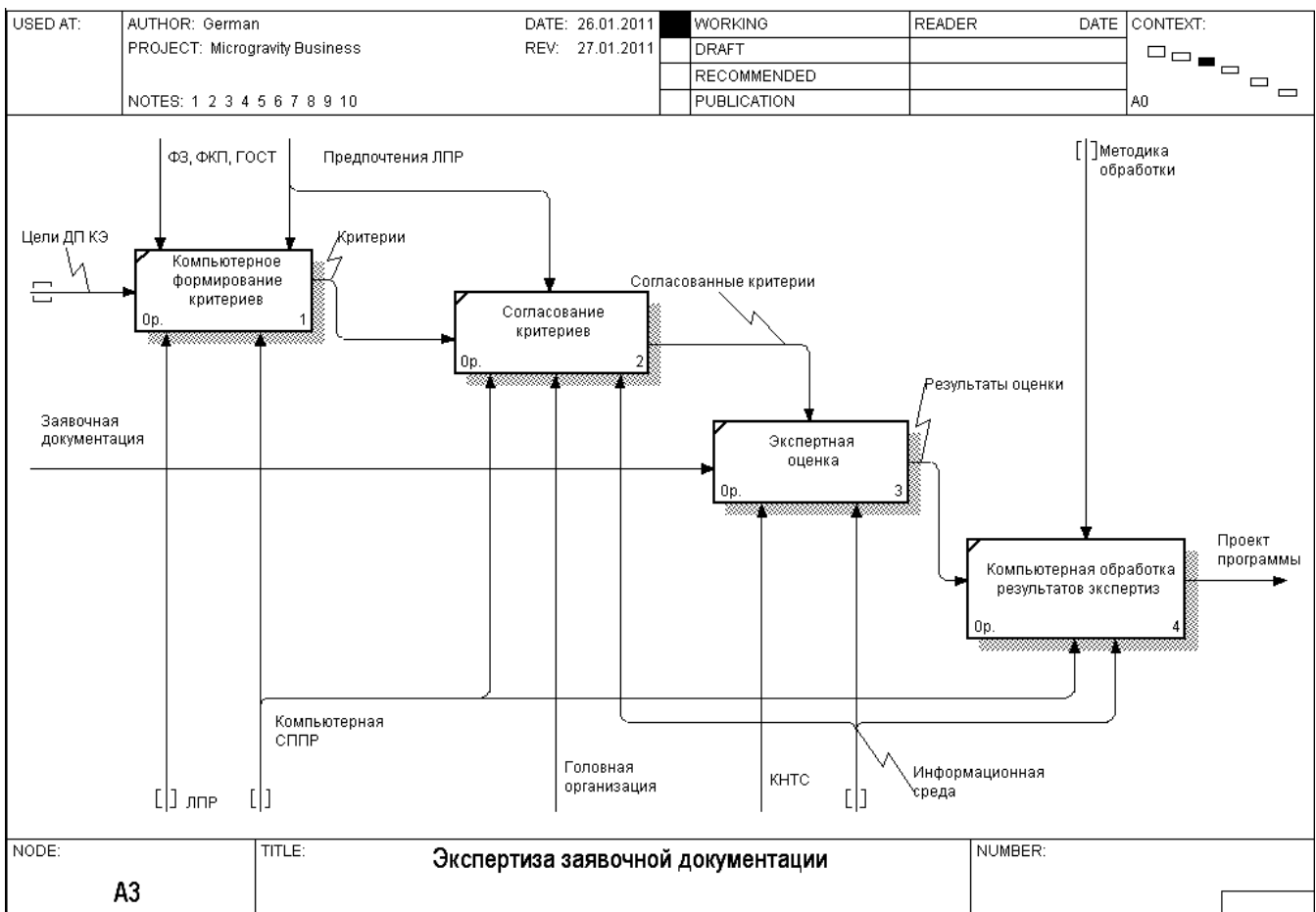


Рис. 2. Схема процесса «Экспертиза заявочной документации»

которые являются компонентами информационной системы. По функциональным признакам информационная среда обеспечивает соответствующими информационными ресурсами внешние запросы к системе, которые реализуются через Интернет, а компьютеризированная СППР поддерживает внутренние (локальные) запросы. Как правило, внешние запросы формируют разработчики заявочной документации и эксперты. Внутренние запросы

осуществляют аналитическая группа и ЛПП. Хранилище данных обеспечивает информацией как внешних потребителей, так и внутренних.

Проект представляет собой классическое серверное web-приложение, работающее по стандартной трехзвенной схеме: «База данных – Сервер приложений – «Тонкий» Клиент». Под «тонким» клиентом подразумевается браузер в сети Интернет, подключенный к системе по протоколам HTTP/HTTPS.

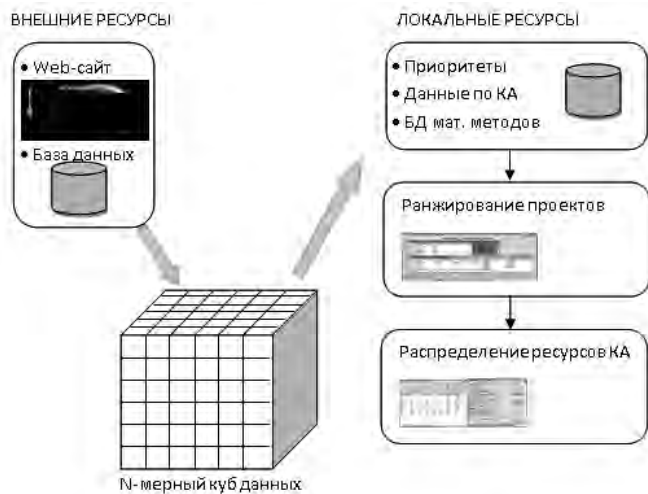


Рис. 3. Схема взаимодействия внешних и внутренних ресурсов

Сервер базы данных обеспечивает хранение всей информации, необходимой для корректного функционирования системы. База данных обслуживается сервером баз данных Microsoft SQL Server 2008, содержит в себе набор связанных таблиц как для хранения основных данных бизнес-модели разрабатываемой системы, так и служебной информации, необходимой для корректного функционирования самого приложения.

Сервер приложения представляет собой службу Internet Information Services, запущенную на выделенном сервере и исполняющую приложение ASP.NET, обеспечивающее все функции системы – доступ к базе данных, манипуляция данными, обслуживание запросов из Web, поддержка функционирования web-служб, рассылка электронной почты и т. п.

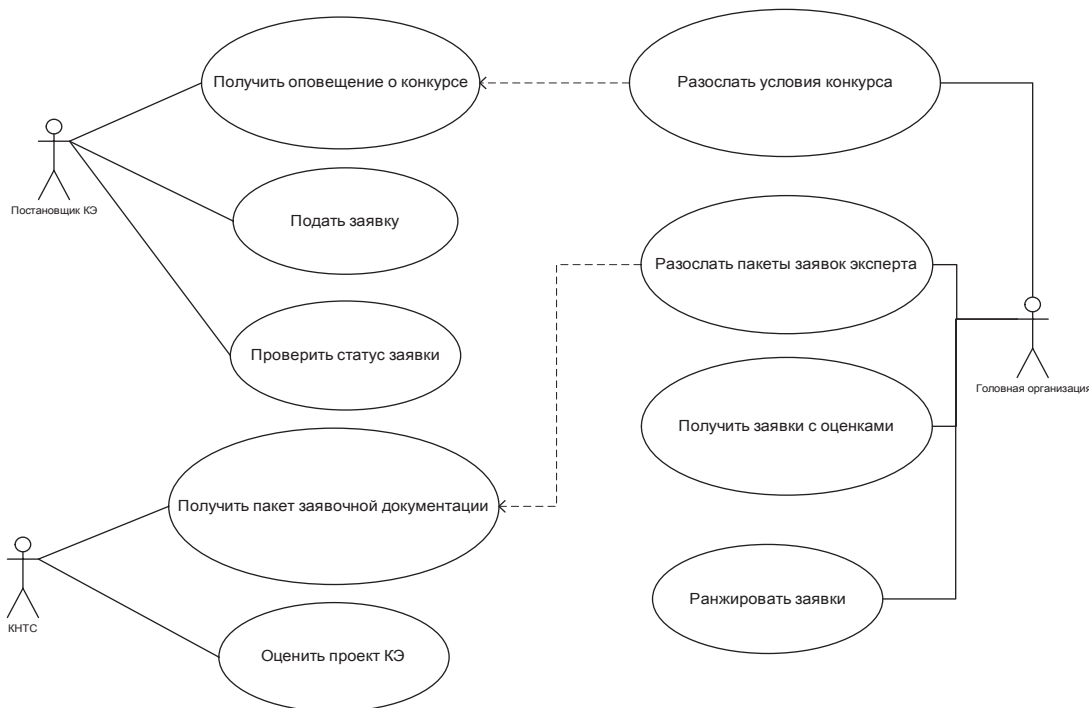


Рис. 4. Диаграмма вариантов использования информационной системы

На рис. 4 указаны основные варианты использования системы для удовлетворения информационных потребностей основных участников. Здесь не указаны вспомогательные сценарии, например, по редактированию личных настроек.

Все сценарии реализуются через соответствующие интерфейсы, в том числе и для выгрузки собранных данных о поданных заявках и их оценках экспертами для последующей обработки средствами компьютеризированной системы поддержки принятия решений. Подробнее ознакомиться с функциональными особенностями информационной среды можно непосредственно по адресу в Интернете <http://knts.tsniimash.ru/DSS/>.

### Заключение

Полученные результаты и приобретенный опыт показали, что назрела необходимость перехода от стадии информационного моделирования и макетирования к стадии разработки полнофункциональной информационной среды с интегрированной СППР.

В рамках системы необходимо реализовать:

- эффективные процедуры формирования электронных заявок на эксперименты с необходимой информационной поддержкой;
- удаленную работу экспертов, участвующих в экспертизе заявочной документации;
- аналитическую обработку результатов экспертиз в виде ранжированных списков КЭ;



- документирование в электронной форме информации о промежуточных и окончательных результатах экспертиз.

Авторы надеются, что проект информационной среды с интегрированной СППР станет динамично развивающейся системой. С использованием сетевых технологий будет развиваться дистанционная экспертиза, выполняемая с применением удаленного доступа к информационным ресурсам специализированных баз данных с результатами реализованных КЭ, которые необходимо развивать и сопровождать. Она может служить площадкой для публикации актуальной информации в Интернете для широкого использования членами экспертного сообщества.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-01-00895 А.*

#### Список литературы

1. Долгосрочная программа научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на российском сегменте МКС [Текст] / Версия 2008 г. – ЦНИИМаш, инв. № 8004-31/1 от 28.11.08 г.
2. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений [Текст] / Э.А. Трахтенгерц. – М.: СИНТЕГ, 1998. – 376 с.
3. Судакова В.А. Поддержка принятия многокритериальных решений по предпочтениям пользователя. СППР DSS/UTES [Текст] / К.А. Афонин, В.В. Бомас, В.А. Судакова. – М.: Изд-во МАИ, 2006. – 170 с.
4. Сивакова Т.В. Компьютерные технологии как средства поддержки принятия решений при выборе рациональных программ микрогравитационных исследований [Текст] / А.В. Гончаров, А.А. Григорьева, К.С. Елкин и др. // Космонавтика и ракетостроение. – 2006. – № 4. – С. 105–112.
5. Осипов В.П. Развитие сетевых ресурсов систем поддержки принятия решений на примере СППР «Микрогравитация» [Текст] / А.А. Григорьева, В.П. Осипов // Материалы VIII Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2010), 25–31 мая 2010 г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. – С. 385–387.
6. Осипов В.П. Создание информационно-аналитической системы для обеспечения исследований в области микрогравитации – насущная задача космического производства [Текст] / В.С. Авдеевский, В.П. Осипов, В.П. Шалимов // Космонавтика и ракетостроение. – 2000. – Вып. 19. – С. 22–27.
7. Осипов В.П. Концептуальные требования к информационно-аналитической системе для обеспечения исследований в области микрогравитации и описание демонстрационного макета [Текст] / В.С. Авдеевский, В.П. Осипов, М.З. Мухоян // Космонавтика и ракетостроение. – 2000. – Вып. 19. – С. 28–35.
8. ГОСТ Р 52017-2003. Аппараты космические. Порядок подготовки и проведения космического эксперимента [Текст]. – М.: ИПК, Изд-во стандартов, 2003. – 19 с.
9. Черемных С.В. Структурный анализ систем: IDIF-технологии [Текст] / С.В. Черемных, И.О. Семенов, В.С. Ручкин. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 208 с.



**Рокка П.  
Rocca P.**

доктор философии,  
доцент Университета Тренто,  
Италия, г. Тренто



**Чириков Р.Ю.  
Chirikov R. Yu.**

аспирант кафедры  
«Телекоммуникационные системы»  
Уфимского государственного  
авиационного технического  
университета,  
Россия, г. Уфа



**Багманов В.Х.  
Bagmanov V.H.**

доктор технических наук,  
профессор кафедры  
«Телекоммуникационные системы»  
Уфимского государственного  
авиационного технического  
университета,  
Россия, г. Уфа

УДК 004.023

## КАЛИБРОВКА ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Данная статья посвящена поиску оптимального набора параметров генетического алгоритма, применяемого для решения задач проектирования больших фазированных антенных решеток. В целях снижения количества активных компонентов в решетке элементы объединяются в подрешетки с выносом общего компонента на вход решетки. Применение подрешеток неправильной формы позволяет снизить уровень нежелательного излучения. В нашей работе мы применяем генетический алгоритм для оптимизации структуры антенной решетки, составленной из подрешеток неправильной формы, с точки зрения уровня боковых лепестков. Как результат, приводятся значения вероятности кроссовера, вероятности мутации хромосомы и вероятности мутации бита, оптимизированные для алгоритма Гви – Лима, основанного на генетическом алгоритме. Данные значения применяются в дальнейших исследованиях.

*Ключевые слова:* ИСЗ, фазированные антенные решетки, генетический алгоритм, подрешетки, уровень боковых лепестков.

## CALIBRATION OF THE GENETIC ALGORITHM PARAMETERS FOR PHASED ANTENNA ARRAY DESIGN

This article is dedicated to the search of the optimal set of parameters of the genetic algorithm used in the design of large phased antenna arrays. In order to decrease the number of active components in the array the elements are joined in subarrays and a common component is put at the subarray input. Use of subarrays of irregular shape allows suppressing the level of undesired radiation. In our work we use the genetic algorithm for optimization of the structure of antenna array, built with subarrays of irregular shape, from the point of view of the sidelobe level. As a result, we show the values of probability of crossover, probability of chromosome mutation and probability of bit mutation, optimized for the Gwee – Lim algorithm, based on the genetic algorithm. These values are used in our further research.

*Key words:* satellites, phased antenna arrays, genetic algorithm, subarrays, sidelobe level.

Генетический алгоритм (ГА) [1] нашел свое применение в различных задачах, в том числе оптимизационных. Независимость от типа задачи и размерности пространства поиска делает его универсальным

эвристическим методом решения. ГА представляет собой итеративный эволюционный алгоритм, в котором значения искомым величин представляются в виде векторов двоичных чисел (битов) – *хромосом*.

Каждая хромосома может состоять из нескольких *генов* – групп битов, представляющих значения отдельных искомым переменных. Каждую такую хромосому необходимо декодировать, то есть извлечь из нее требуемую информацию. В случае отыскания скалярных величин декодирование может быть простым переводом чисел из двоичной системы счисления в десятичную. Однако хромосома может нести информацию более сложного вида. В таком случае необходимо разрабатывать специальный способ декодирования хромосомы для конкретной задачи для последующей оценки и использования найденного решения. Оценка того или иного решения производится вычислением целевой функции. К ней также предъявляются некоторые требования, влияющие на эффективную работу ГА, а именно функция должна быть гладкой и иметь четкую область определения.

В нашей работе [2] мы применяем генетический алгоритм для проектирования больших фазированных антенных решеток (ФАР), составленных из подрешеток неправильной формы типа *полимино* (рис. 1) и предназначенных для связи с низкоорбитальными спутниками. Задача сводится к тому, чтобы отыскать такую структуру ФАР, которая обеспечивала бы минимальный уровень боковых лепестков в диаграмме направленности и имела бы минимум незаполненных участков в своей структуре. Другими словами, решается задача оптимальной двумерной упаковки с дополнительными условиями. Данная задача является дискретной и нелинейной. Более того, выполнение условия наилучшей заполненности решетки не гарантирует выполнение условия минимизации бокового излучения и наоборот. По этим причинам был выбран генетический алгоритм, как наиболее пригодный.

В литературе есть пример использования ГА в задачах оптимальной упаковки. Гви и Лим в своей

работе [3] предложили особый способ декодирования хромосомы, получивший название способа круговой расстановки. Также ими была предложена соответствующая целевая функция. Данный алгоритм под названием алгоритма Гви – Лима (АГЛ) лег в основу нашей работы по проектированию ФАР.

ГА имеет стохастическую природу и его эффективность зависит от значений нескольких специальных параметров. Для каждой конкретной задачи существует оптимальный набор этих параметров, который обеспечивает лучшую конвергенцию. Это вероятность кроссовера  $p_c$ , вероятность мутации  $p_m$  и вероятность мутации бита  $p_{bm}$ . В данной статье мы описываем процесс калибровки данных параметров с целью достижения максимальной эффективности работы алгоритма.

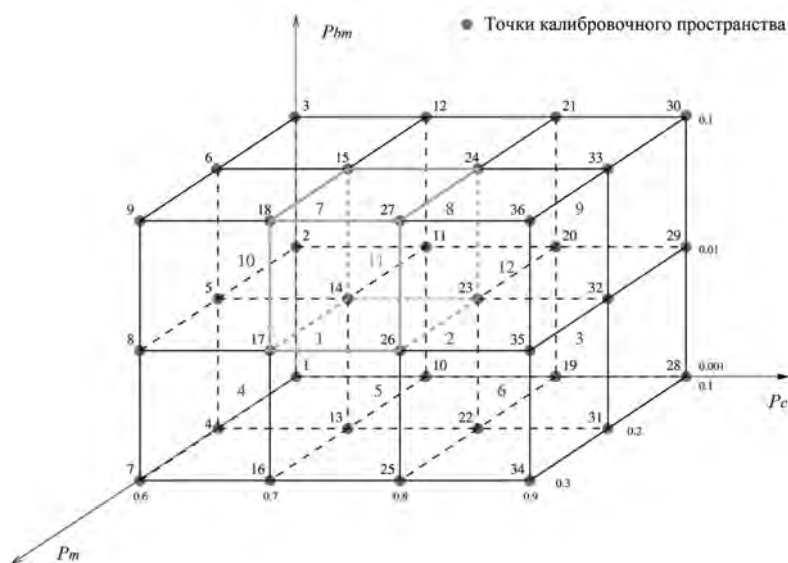
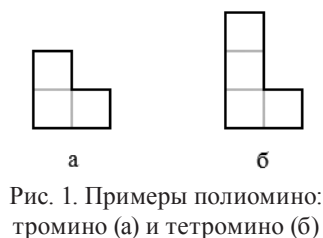
Ввиду стохастической природы генетического алгоритма информация о том, насколько удачно он реализован, поступает от экспериментов. Благодаря этим экспериментам можно найти наиболее подходящие диапазоны значений для каждого параметра ГА. В данной релизации приняты следующие диапазоны:  $0,6 < p_c < 0,9$ ;  $0,1 < p_m < 0,3$ ;  $0,001 < p_{bm} < 0,1$ . Процесс калибровки проходит в два этапа в разных масштабах. На первом этапе для того, чтобы обойти все комбинации параметров, диапазоны были дискретизированы с большими интервалами:

$$p_c \in \{0,6; 0,7; 0,8; 0,9\};$$

$$p_m \in \{0,1; 0,2; 0,3\};$$

$$p_{bm} \in \{0,001; 0,01; 0,1\}.$$

После проведения симуляции для этих комбинаций были получены 36 значений. На рис. 2 показано первоначальное калибровочное пространство, где параметры являются системой координат. Точками обозначены проведенные симуляции. Числа 1–10, 12 определяют номера подпространств, ограниченных точками значений параметров.



ГА используют в своей работе случайные величины. В работе использован генератор псевдослучайных чисел (ГПСЧ), который должен быть инициализирован конкретным числом, называемым зерном  $s$ . Если ГПСЧ инициализируется одним и тем же зерном, он будет выдавать одинаковые последовательности случайных чисел. По этой причине мы запускаем эксперименты с несколькими разными зернами в каждой точке первоначального калибровочного пространства. Мы используем  $S = 10$  разных значений  $s$ :  $s \in \{10, 20, \dots, 100\}$ . В результате получаем  $s$  решений для каждой точки  $i$  в пространстве:  $\Phi_i^S = \{\Phi_i^1, \Phi_i^2, \dots, \Phi_i^S\}$ . Затем для каждой точки рассчитывается среднее значение целевой функции (1) и среднеквадратичное отклонение (2):

$$\Phi_i^{avg} = \frac{\sum_{s=1}^S \Phi_i^s}{S}; \tag{1}$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^S (\Phi_i^s - \Phi_i^{avg})^2}{S}}. \tag{2}$$

Для более точной калибровки на втором этапе мы увеличиваем масштаб. Первоначальное калибровочное пространство разбивается на 12 кубов. Мы вычисляем среднее значение целевой функции  $\Phi_{cj}^{avg}$  среди 8 вершин, принадлежащих одному кубу  $j$ , где  $j = 1, \dots, 12$ . Затем выбирается куб  $j_M$  с наибольшим средним значением  $\Phi_{cj}^{avg} = \max(\Phi_{cj}^{avg}, j = 1, \dots, 12)$

и рассматривается как калибровочное пространство на втором этапе.

Допустим, что выбранный куб определен отрезками  $p_c \in [a_c; b_c]$ ,  $p_m \in [a_m; b_m]$ ,  $p_{bm} \in [a_{bm}; b_{bm}]$ . Диапазоны параметров на втором этапе будут определены следующим образом:

$$p_c \in \left\{ a_c; \frac{a_c + b_c}{2}; b_c \right\};$$

$$p_m \in \left\{ a_m; \frac{a_m + b_m}{2}; b_m \right\};$$

$$p_{bm} \in \left\{ a_{bm}; \frac{a_{bm} + b_{bm}}{2}; b_{bm} \right\}.$$

Теперь там  $3 \times 3 \times 3 = 27$  точек. Как и прежде, мы вычисляем целевую функцию в каждой точке с 10 разными зернами, находим среднее значение в каждой точке и выбираем одну с наибольшим средним значением. Ее координаты и будут оптимальными параметрами ГА.

Мы вычисляем целевую функцию без учета боковых лепестков. В каждом эксперименте используются следующие параметры: количество элементов вдоль оси  $XM = 64$ , количество элементов вдоль оси  $YN = 64$ , тип полиомино – октомино  $L$ -формы, размер популяции  $P = 10$ , число итераций  $K = 100$ . На рис. 3 показаны значения целевой функции в каждой точке первоначального калибровочного пространства. В таблице 1 приведены средние значения целевой функции для каждого из 12 кубов.

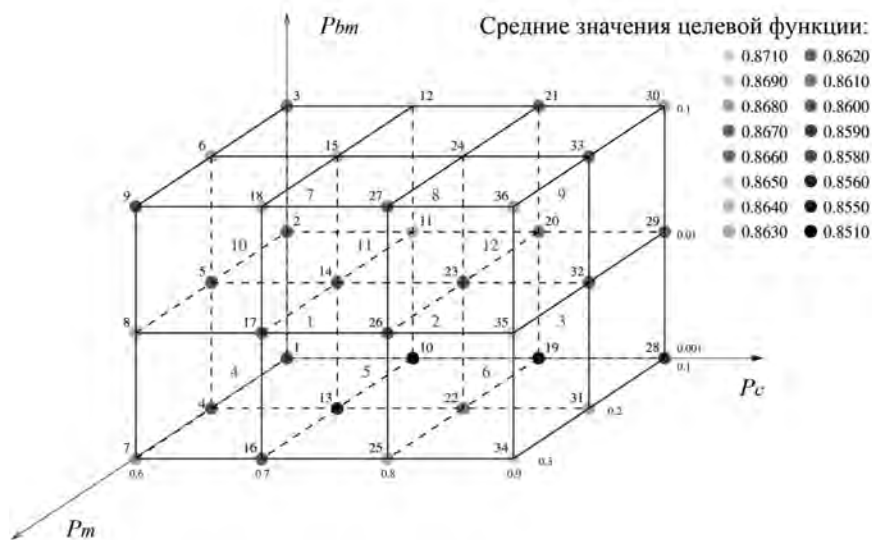


Рис. 3. Первый шаг калибровки

Таблица 1

Средние значения ЦФ для первого шага калибровки

$j$	$\Phi_{cj}^{avg}$	$a_c \div b_c$	$a_m \div b_m$	$a_{bm} \div b_{bm}$
1	0,8922	0,6 ÷ 0,7	0,1 ÷ 0,2	0,001 ÷ 0,01
2	0,8921	0,7 ÷ 0,8	0,1 ÷ 0,2	0,001 ÷ 0,01
3	0,8917	0,8 ÷ 0,9	0,1 ÷ 0,2	0,001 ÷ 0,01

$j$	$\Phi_{cj}^{avg}$	$a_c \div b_c$	$a_m \div b_m$	$a_{bm} \div b_{bm}$
4	0,8923	0,6 ÷ 0,7	0,2 ÷ 0,3	0,001 ÷ 0,01
5	0,8917	0,7 ÷ 0,8	0,2 ÷ 0,3	0,001 ÷ 0,01
6	0,8919	0,8 ÷ 0,9	0,2 ÷ 0,3	0,001 ÷ 0,01
7	0,8917	0,6 ÷ 0,7	0,1 ÷ 0,2	0,01 ÷ 0,1
8	0,8919	0,7 ÷ 0,8	0,1 ÷ 0,2	0,01 ÷ 0,1
9	0,8916	0,8 ÷ 0,9	0,1 ÷ 0,2	0,01 ÷ 0,1
10	0,8920	0,6 ÷ 0,7	0,2 ÷ 0,3	0,01 ÷ 0,1
11	0,8919	0,7 ÷ 0,8	0,2 ÷ 0,3	0,01 ÷ 0,1
12	0,8918	0,8 ÷ 0,9	0,2 ÷ 0,3	0,01 ÷ 0,1

Средние значения целевой функции у кубов различаются незначительно. Однако видно, что куб номер 4 имеет лучшее среднее значение целевой функции:  $\Phi_{c4}^{avg} = 0,8923$ . Дальнейшие эксперименты проводятся для выбранного куба номер 4 с соблюдени-

ем приведенных выше правил. В каждой точке нового калибровочного пространства вычисляются значения целевой функции с разными зёрнами, средние значения и СКО. На рис. 4 показаны средние значения для всех точек второго калибровочного пространства.



Рис. 4. Второй шаг калибровки

Точка номер 11 имеет наибольшее среднее значение целевой функции  $\Phi_{c11}^{avg} = 0,8950$ . Она соответствует набору параметров  $p_c = 0,65$ ,  $p_m = 0,2$ ,  $p_{bm} = 0,005$ . Это откалиброванные параметры ГА для алгоритма Гви – Лима.

Таким образом, в данной работе описано и обосновано применение генетического алгоритма для задачи проектирования больших фазированных антенных решеток. В качестве имплементации ГА рассматривается алгоритм Гви – Лима. Показан путь отыскания оптимальных параметров ГА, таких как вероятность кроссовера, вероятность мутации и вероятность мутации бита.

Начиная с рекомендованных в литературе значений данных параметров, был проведен ряд экспериментов по отысканию оптимальной точки в трех-

мерном калибровочном пространстве. Описанный способ калибровки параметров ГА может быть применен и в других типах задач.

#### Список литературы

1. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence / J.H. Holland. – U Michigan Press, 1975. – 188 p.
2. Chirikov R.Y. Polyomino Subarraying Through Genetic Algorithms / P. Rocca, R.Y. Chirikov, R.J. Mailloux // IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Chicago, USA. – 2012. – P. 1–2.
3. Gwee B.H. Polyominoes tiling by a genetic algorithm / B.H. Gwee, M.H. Lim // Computational Optimization and Applications Journal. – 1996. – № 6. – P. 273–291.



**Романченко А.Ф.**  
**Romanchenko A.F.**

*доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Сервис транспортных систем»  
Уфимского государственного университета  
экономики и сервиса,  
Россия, г. Уфа*



**Мухамадиев А.А.**  
**Mukhamadiev A.A.**

*кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Информационно-измерительная техника»  
Уфимского государственного авиационного  
технического университета,  
Россия, г. Уфа*

УДК 621.317

## **ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ФИЛЬТРАЦИЕЙ ПОМЕХ ЗА СЧЕТ ОРГАНИЗАЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛА**

В статье предлагается формировать информационные характеристики первичных преобразователей с фильтрацией помех за счет организации преобразования сигналов. При этом для преобразования сигналов предлагается перейти в область нестационарных процессов. Показаны методы организации нестационарного энергетического состояния первичных преобразователей за счет коммутации входного воздействия и дополнительной энергетической составляющей. Классифицированы варианты коммутационного функционирования первичных преобразователей. Проанализировано изменение энергетического состояния информационной системы при отсутствии коммутационных воздействий на первичные преобразователи. Рассмотрена система организации преобразования входного воздействия, позволяющая решать проблемы независимости выходного информативного сигнала от воздействия помех. Выявлена зависимость чувствительности от помех в схемах преобразования первичных преобразователей. На основе предложенной организации коммутационного режима преобразования входного сигнала показана возможность устранения влияния «белого» шума на выходной контролируемый сигнал первичных преобразователей.

*Ключевые слова:* сигнал, первичный преобразователь, преобразование, фильтрация, помехи, энергетическое состояние.

## **FORMATION OF INFORMATION CHARACTERISTICS OF PRIMARY CONVERTERS WITH A FILTRATION OF HINDRANCES AT THE EXPENSE OF THE ORGANIZATION OF TRANSFORMATION OF A SIGNAL**

The article offers information form characteristics of transducers with noise filtering through the organization of signal transduction. As for the conversion of signals is proposed to move to the area of non-stationary processes. The methods of non-stationary energy state organization transducers due to switching of the input action and an additional energy component. Classified options for switching the operation of transducers. Analysis the change of the energy state of an information system in the absence of switching effects on the transducers. We consider the system of organization transformation input action to address issues of independence informative output signal from interference. The dependence of the sensitivity of the interference patterns in the transformation of transducers. Based on the proposed organization of the switching mode conversion of the input signal is shown the possibility of eliminating the influence of «white noise» in the controlled output signal transducers.

*Key words:* signal, the transducer, conversion, filtering, noise, energy state.

Проектирование систем управления сложными объектами неразрывно связано с поиском методов и технических средств снижения уровня влияния помех на информационные характеристики первичных преобразователей (ПП), контролирующих параметры технологических процессов. Потеря информации о параметрах управляемых технологических процессов на начальных этапах ее преобразования на дальнейших этапах ее преобразования не может быть восстановлена аппаратными и программными средствами.

Проблема повышения информационной производительности может эффективно решаться, если найти возможности по уменьшению уровня помех на выходе ПП за счет перспективных методов преобразования сигналов в информационной системе ПП.

Один из перспективных принципов при организации преобразования входных сигналов заключается в переходе в область нестационарных процессов [1, 2], организуемых на ПП, при выделении полезной информации о входных воздействиях на ПП из значений характеристик нестационарных энергетических процессов, генерируемых в ПП.

Такие процессы преобразования входных воздействий могут быть организованы методом организации нестационарного энергетического состояния ПП за счет коммутации: входного воздействия (рис. 1, а); дополнительной энергетической составляющей (рис. 1, б). В этом случае формируется выходной импульс изменения выходного сигнала  $Y$  совместно с наложенными на него помехами  $P_o$ .

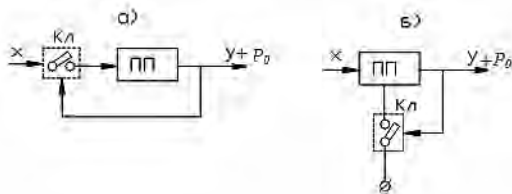


Рис. 1. Методы организации нестационарного энергетического состояния ПП за счет коммутации: а) входного воздействия; б) дополнительной энергетической составляющей

Возможны различные варианты (рис. 2) коммутационного функционирования ПП с учетом всех возможностей ее информационной системы. При этом возможны варианты коммутации и по промежуточным сигналам  $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$  информационной системы ПП.

Изменение энергетического состояния ПП осуществляется между уровнями значений  $y_1$  и  $y_2$  (перепад  $\Delta y$ ), что позволяет генерировать параметры «прогноза»  $\alpha$  конечного энергетического состояния ПП через интервалы времени  $t_0$ . При этом значение  $y_0$  соответствует конечному установившемуся энергетическому

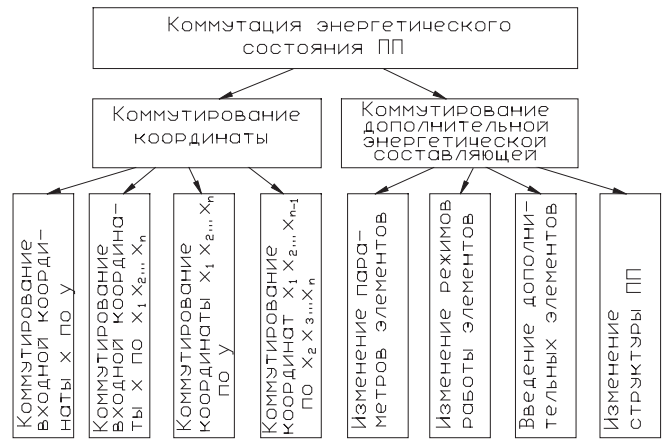


Рис. 2. Варианты коммутационного функционирования ПП

состоянию информационной системы, функционально связанному с уровнем контролируемой входной координаты  $x$ . Полезная информация выделяется из характеристик  $t_1, t_2$  и  $t_0$  выходного импульса. Кривые 1, 2, 3 показывают характер изменения энергетического состояния информационной системы при отсутствии коммутационных воздействий на ПП (рис. 3).

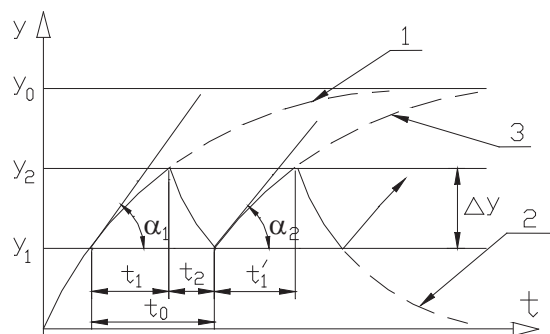


Рис. 3. Характер изменения энергетического состояния информационной системы при отсутствии коммутационных воздействий на ПП

Рассматриваемая система организации преобразования входного воздействия позволяет решать проблемы [3, 4] независимости выходной информативной координаты  $t_0$  от воздействия помех  $P_o$ .

Под действием помех на выходе схемы преобразования будет формироваться, наряду с полезным выходным сигналом, помеха  $P_o$ , которая в общем случае будет складываться из двух составляющих:

$$P_o = P_q + \epsilon, \tag{1}$$

где  $P_q$  – мощность помех, формирующихся под действием доминирующей составляющей;  $\epsilon$  – мощность помехи в виде «белого шума» с равномерной спектральной составляющей.

При дальнейшем рассмотрении процесса формирования характеристик информационной системы ПП важным является случай, когда

$$P_q \gg \epsilon, \tag{2}$$

и основная задача заключается в устранении влияния  $P_q$  на процесс выделения полезной информации на выходе информационного канала. Влияние составляющей  $\varepsilon$  помехи, как видно из неравенства (2), в этом случае будет существенно меньше на фоне доминирующей помехи и на данном этапе не рассматривается.

При всех вариантах воздействия полезного сигнала и помех на информационную систему очевидным является преимущественно различный характер воздействия [3] полезного сигнала  $x$  и помех  $P_q$  на характеристики выходного импульса ПП (рис. 4).

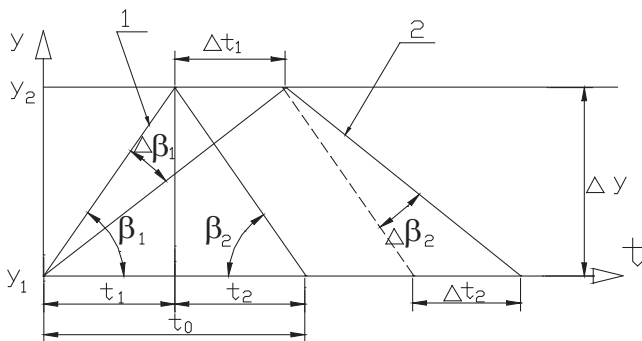


Рис. 4. Характер воздействия полезного сигнала  $x$  и помех  $P_q$  на характеристики выходного импульса ПП

При изменении значений полезного сигнала  $x$  и помехи  $q_0$  исходный выходной импульс 1 (см. рис. 4) изменяет свою форму и примет состояние 2.

Из рис. 4 видно, что

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\Delta y}{t_1},$$

$$\operatorname{tg} \beta_2 = \frac{\Delta y}{t_2},$$

откуда следует

$$t_1 = \frac{\Delta y}{\operatorname{tg} \beta_1} = \frac{\Delta y}{\dot{y}_1(t) |_{t=0}},$$

$$t_2 = \frac{\Delta y}{\operatorname{tg} \beta_2} = \frac{\Delta y}{\dot{y}_2(t) |_{t=0}}.$$

При изменении действия доминирующей помехи на  $\Delta q$  ( $\Delta P_q$ ) меняется крутизна кривых  $y_1(t)$  и  $y_2(t)$  переходных процессов изменения энергетического состояния между уровнями  $y_1$  и  $y_2$  на углы  $\Delta \beta_1$  и  $\Delta \beta_2$ . Это приводит к изменению составляющих  $t_2$  и  $t_1$  выходного импульса длительностью  $t_0$  на  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ :

$$\Delta t_1 = \frac{d[\dot{y}_1(t)]}{dq} \Delta q,$$

$$\Delta t_2 = \frac{d[\dot{y}_2(t)]}{dq} \Delta q.$$

Длительность выходного импульса  $t_0$  не будет меняться при действии доминирующей помехи  $\Delta q$ ,

если выполняется условие:

$$\Delta t_1 = -\Delta t_2$$

или

$$\frac{d[\dot{y}_1(t)]}{dq} = -\frac{d[\dot{y}_2(t)]}{dq}.$$

Чувствительность  $S_q$  схемы преобразования ПП по помехе  $q$  может быть представлена в виде

$$S_q = \frac{d[\dot{y}_1(t)] + d[\dot{y}_2(t)]}{dq},$$

и очевидно, что для обеспечения нечувствительности длительности импульса  $t_0$  от составляющих  $q$  необходимо, чтобы выполнялось условие

$$S_q = 0.$$

С учетом очевидной взаимосвязи частоты  $f_k$  коммутации с длительностью импульса:

$$f_k = \frac{1}{t_0}.$$

Тогда соотношение для чувствительности схемы преобразования по частоте  $f_k$  коммутации от доминирующей помехи находится в виде

$$S_q^f = \left( \frac{1}{t_1 + t_2} \right)^2 \cdot \left( \frac{dt_1}{dq} + \frac{dt_2}{dq} \right)$$

или

$$S_q^f = f_k^2 \left( S_q^{t_1} + S_q^{t_2} \right),$$

где:  $S_q^{t_1}$  – чувствительность по времени  $t_1$  относительно помехи  $q(P_q)$ ;  $S_q^{t_2}$  – чувствительность по времени  $t_2$  относительно помехи  $q(P_q)$ .

Функции преобразования полезного сигнала  $x$  и помехи  $P_q$  информационной системой разные вследствие различий в их физическом характере воздействия, либо различных точек приложения, и является очевидным:

$$S_x^{t_1} \neq S_x^{t_2},$$

где  $S_x^{t_1}$  – чувствительность ПП по времени составляющей  $t_1$  относительно полезного сигнала  $x$ ;  $S_x^{t_2}$  – чувствительность ПП по времени составляющей  $t_2$  относительно полезного сигнала  $x$ .

Таким образом, при рассматриваемом режиме коммутации энергетического состояния информационной системы ПП длительность импульсного сигнала  $t_0$  (выходная координата ПП в коммутационном режиме функционирования) будет зависеть от изменений выходного сигнала  $\Delta x$  и не будет зависеть от изменений доминирующей помехи  $\Delta q$ .

Вышеприведенный подход к устранению влияния доминирующей погрешности  $P_q$  на длительность  $t_0$  выходного импульса может быть распространен и на другие режимы коммутации [1].

Организация коммутационного режима преобразования входного сигнала позволяет также устранить



влияние «белого» шума  $\varepsilon$  на выходную контролируемую координату ПП [4].

Действительно, выходной сигнал ПП, с наложенным на него «белым» шумом, на выходе ПП изменяется, как показано на рис. 5.

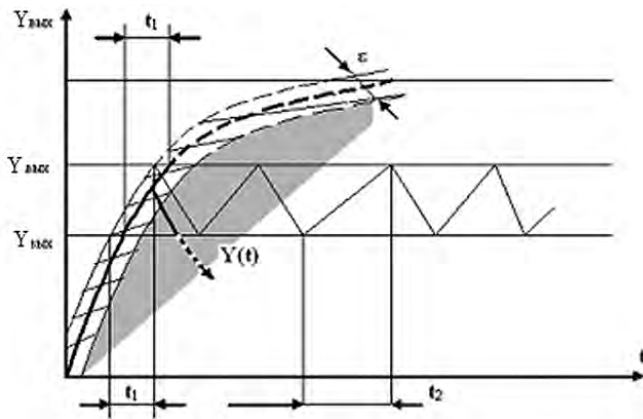


Рис. 5. Выходной сигнал ПП

В реальных условиях на выходной полезный сигнал  $Y_{\text{вых}}$  накладывается помеха  $\varepsilon$ , которую часто очень сложно выделить и отфильтровать традиционными известными методами. Однако при рассматриваемой организации преобразования входного сигнала на выходе ПП во времени изменяется (см. рис. 2) суммарный (результрующий) сигнал  $Y_{\text{вых}} + \varepsilon$ . При этом, как видно из рис. 1, скорость изменения результирующего выходного сигнала и полезного сигнала  $Y_{\text{вых}}$  между фиксированными уровнями  $Y_{\text{вых}}'$  и  $Y_{\text{вых}}''$  одинакова. Следовательно, и время изменения результирующего выходного сигнала и полезного выходного сигнала будет равно одному и тому же значению  $t_1$ .

При этом необходимо, чтобы соблюдались следующие условия:

- уровень помехи  $\varepsilon$  на интервале регистрации полезного входного сигнала не должен меняться;
- действующая помеха  $\varepsilon$  не должна влиять на динамику изменения энергетического состояния системы преобразования.

Характер формирования и физическая природа действующих наряду с полезным сигналом помех обеспечивают в большинстве известных технических случаев выполнение вышеприведенных условий.

После регистрации контролируемого параметра  $t_1$ , однозначно связанного с уровнем входного воздействия, система преобразования приводится в исходное энергетическое состояние, то есть выводится на исходный уровень энергетического состояния, обеспечивающего уровень выходного сигнала  $Y_{\text{вых}}'$ . После этого повторяют процесс нарастающего изменения энергетического состояния

с достижения результирующим выходным сигналом уровня  $Y_{\text{вых}}''$ , при котором снова осуществляется коммутация энергетического состояния системы преобразования. Новое значение  $t_2$  интервала изменения результирующего выходного сигнала  $Y_{\text{вых}} + \varepsilon$  между уровнями значений  $Y_{\text{вых}}'$  и  $Y_{\text{вых}}''$  будет характеризовать новое значение входного воздействия и не будет зависеть от уровня действующих помех  $\varepsilon$ .

Предложенная организация преобразования входного сигнала дает эффект при наличии помех с равномерной спектральной плотностью.

Необходимо, в процессе преобразования информации, в условиях нестационарного энергетического состояния ПП, технически обеспечивать выделение тех изменений в динамических характеристиках информационной системы ПП, которые зависят от значения входной координаты и не зависят от уровня действующих, наряду с полезным входным сигналом, помех. При этом осуществляется рост отношения «полезный сигнал / шум» и возрастает информационная производительность ПП.

Следует иметь в виду, что рост информационной производительности (пропускной способности) ПП при создании условий для фильтрации помех как доминирующих, так и малого уровня с равномерной спектральной составляющей осуществляется без изменения конструктивных особенностей преобразователя, что часто снимает ограничения по технологическим факторам.

#### Список литературы

1. Романченко А.Ф. Информационно-измерительные системы нестационарного энергетического состояния [Текст] / А.Ф. Романченко. – Уфа: УТИС, 2000. – 173 с.
2. Романченко А.Ф. Принцип высокоскоростного преобразования информационных потоков первичными преобразователями [Текст] / А.Ф. Романченко // Вестник АН РБ. – 2005 г. – Том 10. – № 2. – С. 12–15.
3. Романченко А.Ф. К вопросу фильтрации помех при преобразовании сигнала [Текст] / А.Ф. Романченко, Р.Р. Тазетдинов // Инновации и перспективы сервиса: Сб. матер. Межд. научн. техн. конф. – Уфа: УГАЭС, 2006 г. – С. 15–17.
4. Патент № 2351937 Российская Федерация, МПК7 G01 P 5/12, G01N25/00. Способ преобразования сигнала [Текст] / А.Ф. Романченко, Р.Р. Тазетдинов; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимская государственная академия экономики и сервиса» (ГОУ ВПО «УГАЭС») (RU). – № 2008107232/09; заявл. 26.02.2008; опубл. 10.04.2009. – Бюл. № 10.



**Тугашова Л.Г.**  
**Tugashova L.G.**

*старший преподаватель кафедры  
«Автоматизация и информационные технологии»  
Альметьевского государственного нефтяного института,  
Россия, г. Альметьевск*

УДК 681.1

## **ВИРТУАЛЬНЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ**

Рассматривается задача создания виртуальных анализаторов показателей качества для массообменных процессов установок ректификации. Приведен обзор методов определения фракционного состава сырья и продуктов на установках подготовки и переработки нефти и газа.

Построены модели виртуальных анализаторов процесса ректификации с применением регрессионных методов и искусственных нейронных сетей. Регрессионная модель получена с применением метода наименьших квадратов. Для решения задачи выбраны многослойные нейронные сети прямого распространения и обобщенно-регрессионные нейронные сети.

Сети исследовались на обучающей и контрольной выборках. Моделирование проводилось с использованием программного пакета MatLab. Определена оптимальная архитектура искусственных нейронных сетей, реализованная в системе Simulink.

Показано, что в результате сравнения регрессионных и нейросетевых моделей наиболее точной является обобщенно-регрессионная сетевая модель. Приведен пример использования полученных результатов в учебном процессе при создании модели системы управления с применением программно-технических средств компании YOKOGAWA.

*Ключевые слова:* регрессионная модель, нейронные сети, ректификация, алгоритм обучения, виртуальный анализатор.

## **VIRTUAL ANALYZERS INDICATORS OF THE QUALITY OF THE RECTIFICATION PROCESS**

There is considered the problem of creating a virtual analyzers of quality indicators for mass transfer processes installations rectification. Provides an overview of methods of definition of fractional composition of raw materials and products treatment plants and oil and gas processing.

The models of virtual analyzers rectification process using regression methods and artificial neural networks. The regression model is obtained by the method of least squares. For solving the task selected multilayer neural network of direct distribution and generalized regression neural network.

The network has been studied in training and the control samples. The simulation was performed using the software package MatLab. Determination of the optimal architecture of artificial neural networks, implemented in the Simulink.

It is shown that a comparison of regression and neural network models is the most accurate is generalized regression network model. An example of using the obtained results in the educational process when creating a model of the control system with the use of program-technical means of YOKOGAWA.

*Key words:* regression model, neural networks, rectification, learning algorithm, virtual analyzer.

В настоящее время при оценке состава сырья и качества выходных продуктов ректификационных установок используются лабораторные анализы, данные поточных анализаторов. Однако результаты

анализов, получаемых в заводских лабораториях, не всегда обладают необходимым уровнем полноты и оперативности и не могут использоваться для управления качеством в реальном времени.

Технологический процесс периодически отклоняется от оптимальных рабочих параметров, и требуется его подстройка. Работа установки поддерживается не только за счет общих параметров процесса, но составом потоков. Необходимо обеспечить неизменность свойств получаемых продуктов, что определяется лабораторным анализом [1].

Для решения этой задачи в системе управления используются промышленные анализаторы состава потоков. Достоверность результатов анализов, полученных в химических лабораториях, может определяться человеческим фактором, состоянием лабораторного оборудования, особенностями отбора проб. Если проба многокомпонентная, ее составляющие обладают разной летучестью и другими физико-химическими свойствами. Результатом яв-

ляется невозможность сохранить истинное фазовое состояние пробы при ее доставке в лабораторию, измерение на потоке может быть точнее. Однако стоимость поточных анализаторов высока, требует дорогостоящего эксплуатационного обслуживания.

В табл. 1 приведены некоторые методы определения фракционного состава сырья и продуктов на установках переработки нефти и газа, подготовки нефти.

В качестве альтернативы предлагается применять виртуальные анализаторы, которые определяют текущие свойства сырья и продукции по математической модели. Виртуальный анализатор (ВА) использует статистическую информацию (данные с датчиков) о технологических параметрах процесса и предназначен для повышения эффективности управления.

Таблица 1

Метод	Государственный стандарт или ТУ в России (США)
Газохроматографический метод определения распределения компонентов по диапазону кипения сырой нефти	ГОСТ Р 54291-2010 (ASTM D5307-97)
Определение фракционного состава разгонки по Энглеру	ГОСТ 2177-99 (ASTM D86)
Определение фракционного состава нефти по кривой истинных температур кипения (ИТК)	ГОСТ 11011-85 (ASTM D2892-99)
Широкая фракция легких углеводородов (ШФЛУ)	ТУ 38.101524-93
Фракция нормального бутана	ТУ 0272-026-00151638-99
Углеводородный газ	ГОСТ 14920
Определение давления насыщенных паров (ДНП)	ГОСТ 1756-2000 (ASTM D323)

При создании ВА используются гибридные нейронные сети, метод наименьших квадратов, метод группового учета аргументов (МГУА), гребневая регрессия и др.

В статье приводится пример создания виртуального анализатора ректификационной колонны по содержанию изобутана с применением регрессионных и нейросетевых методов.

*Расчет материального и теплового баланса колонны ректификации*

Для расчета ректификационной колонны можно использовать алгоритм, основанный на расчете однократного испарения на контактной ступени. Ступень разделения представлена в общем виде, то есть на нее подводится или с нее отводится материальный поток и тепло, и, таким образом, тарелка питания колонны, узел подачи флегмы, конденсатор паров верха и кипятильник являются ступенью разделения под своим определенным номером. Схема аппарата однократного испарения приведена на рис. 1 [2].

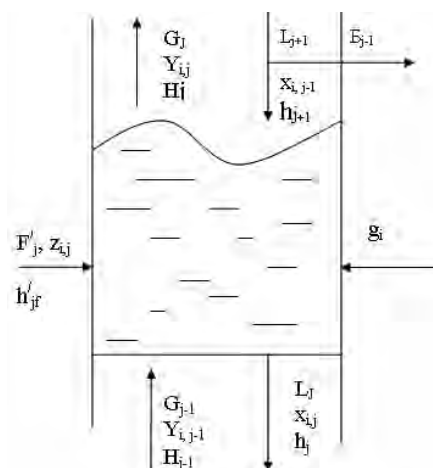


Рис. 1. Потоки аппарата однократного испарения

На каждой ступени равновесие фаз описывается уравнением парожидкостного равновесия:

$$Y_{ij} = k_{ij} X_{ij}, \text{ при условиях } \sum_{i=1}^n y_{ij} = 1, \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad (1)$$

где  $k$  – константа фазового равновесия;  $i$  – номер компонента,  $j$  – номера тарелки.

Для «j»-й тарелки полная система уравнений материального и теплового балансов и условия могут быть представлены в виде [2]:

$$F_j z_{ij} = G_{j-1} Y_{ij-1} + (L_{j+1} - B_{j+1}) X_{ij+1} + F'_j z'_{ij} \quad (2)$$

$$F_j = G_{j-1} + (L_{j+1} - B_{j+1}) + F'_j \quad (3)$$

$$F_j = G_j + L_j; F_j z_{ij} = G_j y_{ij} + L_j x_{ij} \quad (4)$$

$$F_j h_{jf} = G_{j-1} H_{j-1} + (L_{j+1} - B_{j+1}) h_{j+1} + F'_j h'_{jf} \quad (5)$$

$$F_j h_{jf} = G_j H_j + L_j h_j + g_j, \quad (6)$$

где  $F$  – количество питания однократного испарения, кгмоль/час;  $F'$  – количество питания тарелки, кгмоль/час;  $G$  – количество пара, кгмоль/час;  $L$  – количество жидкости, кгмоль/час;  $B$  – количество жидкости, кгмоль/час;  $Y$  – состав пара, моль/моль;  $X$  – состав жидкости, моль/моль;  $H$  – теплосодержание пара, ккал/кгмоль;  $h$  – теплосодержание жидкости, ккал/кгмоль;  $h_f$  – теплосодержание питания,

ккал/кгмоль;  $g$  – количество тепла, подаваемого или отводимого, ккал/час.

По приведенной системе уравнений, зная состав, количество и температуру пара с «j» тарелки ( $G_{j-1}, y_{j-1}, t_{j-1}$ ), состав, температуру и количество жидкости с «j+1» тарелки ( $L_{j+1}, x_{j+1}, t_{j+1}$ ), а также исходные данные по питанию и количеству тепла, подводимого со ступени разделения, можно определить состав, количество и температуру потоков, покидающих тарелку.

Решение системы (1)–(6) ввиду трудоемкости не используется для модели виртуального анализатора (ВА).

### Построение регрессионной модели виртуальных анализаторов

В табл. 2 приведены средние значения технологических параметров для создания ВА.

Таблица 2

Параметр	Температура верха, °C X1	Расход верхнего продукта, т/ч X2	Давление верха, кгс/см <sup>2</sup> X3
Значение	56	32	1,54

Построим регрессионную модель с применением метода наименьших квадратов (МНК). Представим зависимость в следующем виде:

$$\hat{Y} = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i; \quad (7)$$

где  $k$  – количество факторов.

Расчет коэффициентов модели выполняется по формуле:

$$C = (D^T \cdot D)^{-1} \cdot D^T \cdot Y. \quad (8)$$

Матрица базисных функций  $D$  составлена из строк вида  $\langle 1 \ x_1^i \ x_2^i \ \dots \ x_n^i \ x_1^i \cdot x_2^i \cdot x_3^i \ \dots \rangle, i = 1, 2, \dots, N$ .

С использованием формул (7)–(8) по табл. 2 получена следующая зависимость:

$$Y = -10.521X1 + 2.645X1 - 4.531X2 + 11.659X3.$$

При необходимости аппроксимационные свойства модели можно улучшить, добавив в нее компоненты типа  $X_i^2$  и  $X_i X_j$ :

$$\hat{Y} = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i < j} a_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2 + \dots$$

Формула (8) соответствует процедуре классического регрессионного анализа, при котором сначала определяются все элементы обучающей выборки (экспериментальные данные), а затем по ним вычисляются коэффициенты регрессии. Известна также процедура последовательного регрессионного анализа, при котором коэффициенты регрессии последовательно уточняются по мере добавления обучающей выборки.

Для оценки качества полученной модели определяют коэффициент множественной корреляции:

$$R = \sqrt{1 - \frac{(N-k)S_{ocm}^2}{(N-1)S_y^2}} = \sqrt{1 - \frac{\sum_{k=0}^{N-1} (y_k - \hat{y}_k)^2}{\sum_{k=0}^{N-1} (y_k - \bar{y})^2}}, \quad (9)$$

где  $S_{ocm}^2 = \frac{1}{N-k} \sum_{k=0}^{N-1} (y_k - \hat{y})^2$  – остаточная дисперсия;

$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} (y_k - \bar{y})^2$  – дисперсия относительно среднего.

Квадрат коэффициента множественной корреляции называют коэффициентом множественной детерминации.

### Выбор архитектуры нейронных сетей

Нейросетевые модели применяются в самых различных областях для решения задач классификации, кластеризации, регрессии и других. С математической точки зрения нейронные сети (НС) осуществляют отображение вектора входных переменных в вектор выходных. Свойства этого отображения определяются топологической структурой НС: числом уровней, количеством элементов каждого уровня, значениями синоптических связей (весов).

Алгоритм обучения означает процедуру, в которой используются правила обучения для на-

стройки весов. Наиболее распространенные алгоритмы обучения нейронных сетей: обратное распространение; Левенберга – Марквардта; сопряженных градиентов; методы переменной метрики; генетический алгоритм.

После того, как определено число слоев и число элементов в каждом из них, нужно найти значения для весов сети, которые бы минимизировали ошибку прогноза, выдаваемого сетью. Этот процесс представляет собой подгонку модели, которая реализуется сетью, к имеющимся обучающим данным. Ошибка для конкретной конфигурации сети определяется путем прогона через сеть всех имеющихся наблюдений и сравнения реально выдаваемых выходных значений с целевыми значениями.

Для решения задачи выбраны следующие НС:

1. Многослойные нейронные сети прямого распространения.

2. Обобщенно-регрессионные нейронные сети.

Сети исследовались на обучающей и контрольной выборках. Совокупность исходных данных представляет собой значения случайной величины, распределенной по равномерному закону.

В сети прямого распространения в качестве активационной функции используется сигмоид:

$$y = F(S) = \frac{1}{1 + \exp(-a \cdot s)},$$

где  $a$  – некоторая положительная постоянная.

Обобщенно-регрессионная нейронная сеть (GRNN) является разновидностью сетей с радиальными базисными элементами. Сети моделируют функцию с помощью одного промежуточного слоя, то есть нет необходимости выбирать число слоев. Параметры линейной комбинации в выходном слое можно оптимизировать с помощью методов линейной оптимизации (например, метода золотого сечения). Однако сети обладают плохими экстраполирующими свойствами.

Первый слой данной сети состоит из так называемых радиальных нейронов. Нейроны данного слоя реализуют нелинейные зависимости в соответствии с соотношением [3]:

$$o_r = \varphi_r(\vec{x}) = \varphi\left(\frac{\|\vec{x} - \vec{c}_r\|}{\lambda_r}\right), \quad (10)$$

где  $o_r$  – выходной сигнал  $r$ -го нейрона;  $\vec{x}$  – входной сигнал сети (данный сигнал подается на каждый нейрон рассматриваемого слоя);  $\lambda_r$ ,  $\vec{c}_r$  – постоянные параметры могут настраиваться в процессе обучения.

В качестве  $\varphi(\cdot)$  используется функция Гаусса.

Второй слой осуществляет взвешенное суммирование выходных сигналов первого слоя [3]:

$$y = \frac{\sum_{r=1}^M o_r \cdot w_r}{\sum_{r=1}^N o_r}, \quad (11)$$

где  $w_r$  – веса, настраиваемые при обучении,  $M$  – число нейронов первого слоя,  $y$  – выходной сигнал сети.

#### Построение нейросетевой модели в MatLab

При создании модели ВА используются данные технологического процесса и заводской лаборатории: расход верхнего продукта, температура верха колонны, давление в колонне, в качестве выходного параметра принято содержание изобутана в выходном продукте. Данные передаются из Excel в Matlab. На обучающей выборке происходит корректировка весов. Каждый цикл итерации включает проверку расхождения заданного выхода и отклика сети. Если расхождение велико, то с помощью специальных алгоритмов обучения веса корректируются и начинается новый цикл обучения. Рассчитываются ошибки, получаемые в результате нейросетевого моделирования.

Процесс обучения нейросетевой модели реализуем с использованием однонаправленной сети, обучаемой с применением алгоритма обратного распространения ошибки. Моделирование проводится с использованием программного пакета MatLab.

Сначала выполняется приведение данных к нормальному закону распределения [4]:

```
[pn,meanp,stdp] = prestd(p);
```

```
[tn,meant,stdt] = prestd(t);
```

где  $p$ ,  $t$  – матрицы входного и выходного векторов;  $pn$ ,  $tn$  – матрицы приведенных векторов.

Новая однонаправленная сеть формируется с помощью функции:

```
net = newff (minmax(pn),[3,16,1],{'logsig' 'logsig' 'purelin'},'trainlm');
```

где  $pn$  – сформированный входной вектор из обучающей выборки; 'logsig' – сигмоидная функция активации входного и скрытого слоев; 'purelin' – линейная функция активации выходного слоя.

Новая обобщенно-регрессионная сеть формируется с помощью функции:

```
net = newgrnn(pn, tn).
```

Для решения задачи выбираем трехслойную однонаправленную сеть. Нейросетевая модель содержит 3 нейрона во входном слое (по числу компонентов входного вектора), 16 нейронов с функцией активации logsig и 1 нейрон в выходном слое (по числу компонентов выходного вектора) с функцией активации purelin. В качестве обучающего алгоритма выбран алгоритм Левенберга – Маркара (trainlm).

Задаем функцию оценки функционирования mse (сумма квадратичных отклонений):

```
net.performFcn = 'mse'.
```

После инициализации выполняем обучение созданной сети с помощью следующей функции:

```
net = train(net, pn, tn).
```

Для моделирования сети используется функция:

```
an = sim(net, pn).
```

Для того чтобы применить обученную сеть для обработки данных, необходимо использовать функцию sim:

```
an = sim(net, pn),
```

где an – результат анализа в виде набора выходных векторов; pn – сформированный входной вектор из обучающей выборки.

Восстановление данных, которые были масштабированы к нормальному закону распределения, выполняет функция:

```
a = poststd(an,meant,stdt),
```

```
t = poststd(tn,meant,stdt).
```

Для многослойной сети прямого распространения функции активации первого и второго слоя нейронов выбраны сигмоидальными, выходного слоя – линейными (рис. 2).

Проверить качество обучения можно вычислением линейной регрессии между выходом сети и целями (рис. 3):

```
[m,b,r] = postreg(a2(1,:),t(1,:)).
```

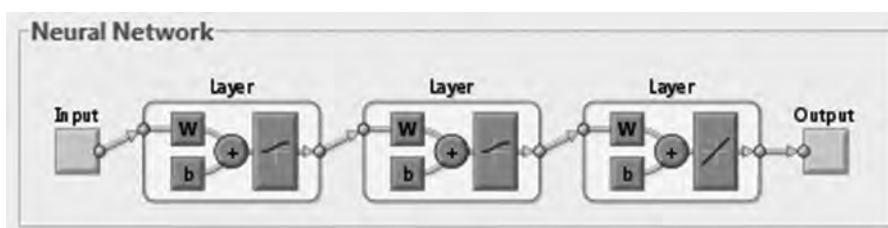
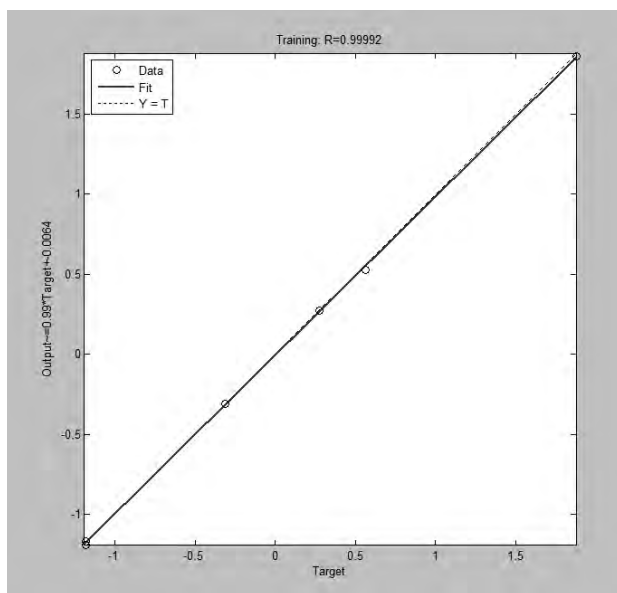
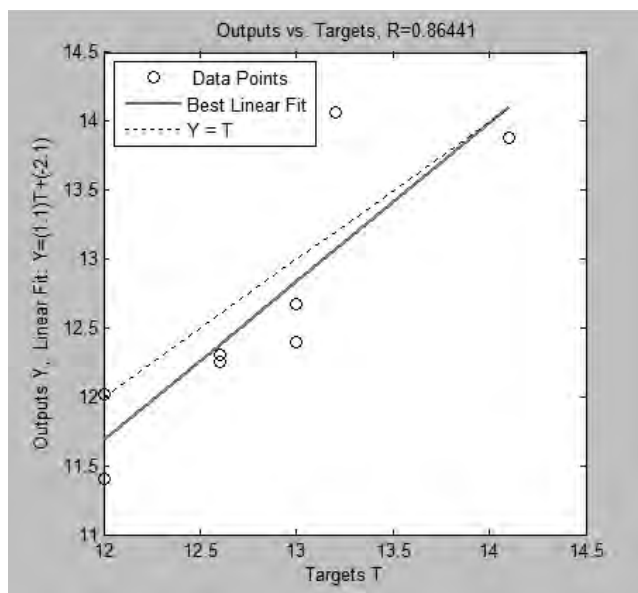


Рис. 2. Структура сети прямого распространения



а)



б)

Рис. 3. Линейная регрессия по обучающей (а) и контрольной выборке (б)

Для визуального представления полученной нейросетевой модели в Simulink (рис. 4а) воспользуемся функцией gensim:

```
gensim(net,-1).
```

Особенностью обобщенно-регрессионной сети (GRNN) является высокая скорость обучения. Первый слой – это радиальный базисный слой (рис. 4б). Второй слой – это линейный слой

с числом нейронов (рис. 4в). Из графика на рис. 5 видно, что обучение сети завершено после 16 эпох и при этом значение среднеквадратичной ошибки минимальное.

#### Заключение

Таким образом, при оценке качества продуктов на ректификационных установках применяются сле-

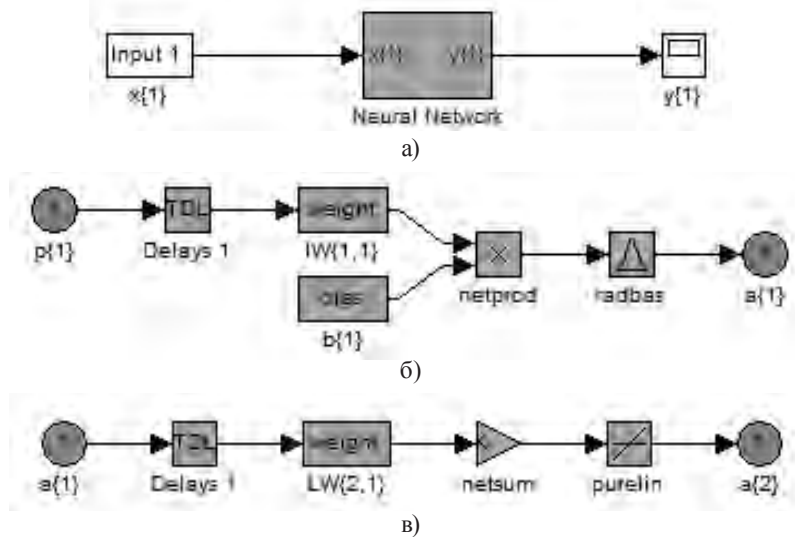


Рис. 4. Структура обобщенно-регрессионной сети в системе Simulink

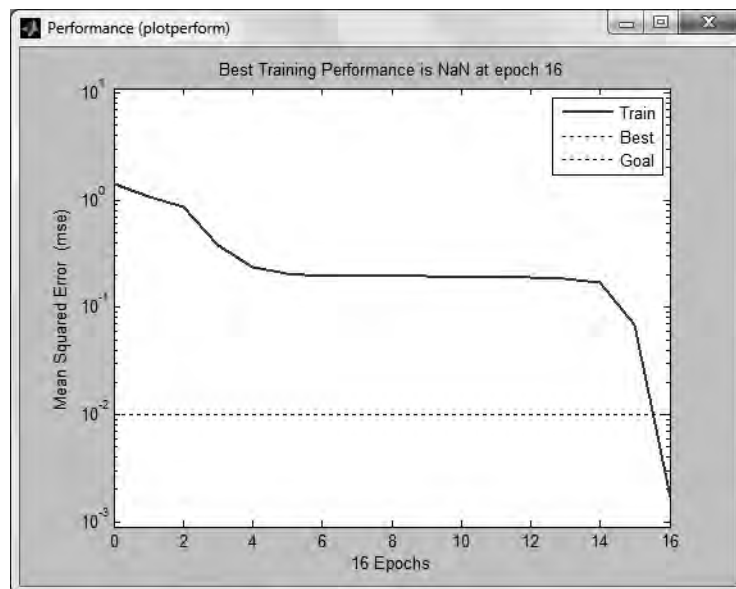


Рис. 5. Значение среднеквадратичной ошибки

дующие способы контроля показателей качества: лабораторные анализы, данные поточных анализаторов, данные виртуальных анализаторов. Следует отметить низкую оперативность лабораторных анализов. Суммарная погрешность приборов снижается из-за необходимости отбора пробы и ее доставки в лабораторию.

В табл. 3 представлены коэффициенты детерминации моделей виртуальных анализаторов показателей качества, построенных различными методами. В результате сравнительного анализа регрессионных и нейросетевых моделей при использовании в качестве критерия коэффициента детерминации видим, что наиболее точной является обобщенно-регрессионная сетевая модель.

Таблица 3

Метод	Коэффициент корреляции		Коэффициент детерминации	
	Обучающая выборка	Контрольная выборка	Обучающая выборка	Контрольная выборка
Метод наименьших квадратов (МНК)	0,781	0,684	0,609	0,467
Сеть прямого распространения	0,997	0,864	0,994	0,746
Обобщенно-регрессионная сеть	0,998	0,871	0,996	0,758

Полученные результаты использовались в учебном процессе при создании модели системы управления с применением программно-технических

средств компании YOKOGAWA. На рис. 6 для примера показан тренд технологического параметра в системе System View.

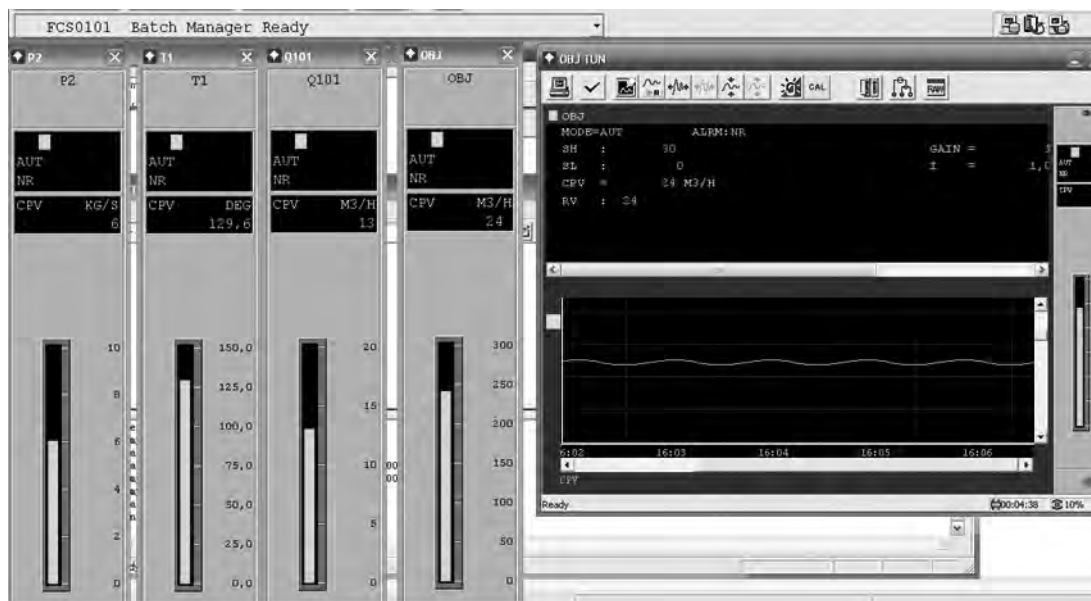


Рис. 6. Тренды в System View

#### Список литературы

1. Дуго Г.Б. Исследование моделей виртуальных анализаторов массообменного технологического процесса ректификации [Текст]/ Г.Б. Дуго, Н.Б. Дуго, И.С. Можаровский, А.Ю. Торгашов // Моделирование систем. – 2011. – № 4 (30). – С. 384–387.

2. Технологический регламент на проектирование установки получения бензина АИ-92. Этап 2. – Казань: ВНИИУС, 2004.

3. Усков А.А. Гибридные нейросетевые методы моделирования сложных объектов: Монография [Текст]/ А.А. Усков, С.А. Котельников, Е.М. Грубник, В.М. Лаврушин. – Смоленск: Смоленский филиал АНО ВПО ЦС РФ «Российский университет кооперации», 2011. – 132 с.

4. Медведев В.С. Нейронные сети MATLAB 6 [Текст] / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин; под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.

5. Костенко А.В. Виртуальный анализатор сырьевых потоков [Текст] / А.В. Костенко, А.А. Мусав, А.В. Тураносов // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2006. – № 1. – С. 35–44.

6. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика [Текст] / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2002. – 382 с.

7. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей [Текст] / Р. Каллан: пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 287 с.



# НАНОЭЛЕКТРОНИКА И КВАНТОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ NANOELECTRONICS AND QUANTUM DATA SYSTEMS



**Журавлева Н.А.**  
**Zhuravleva N.A.**

*кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Экономическая информатика»  
Уфимского государственного авиационного  
технического университета,  
Россия, г. Уфа*



**Доломатов М.Ю.**  
**Dolomatov M.Yu.**

*кандидат технических наук, доктор химических  
наук, профессор кафедры «Физика»  
Уфимского государственного университета  
экономики и сервиса, руководитель лабора-  
тории «Электроника и нанотехнологии»,  
Россия, г. Уфа*

УДК 004; 553.98; 52-36; 536; 51-7

## ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ РЕСУРСОВ МОЛЕКУЛ В МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ

Проблема происхождения природных органических систем – аминокислот, нуклеотидов и других строительных элементов жизни, а также природных углеводородных систем, к которым относятся нефть и газ, актуальна не только с фундаментальной, но и с практической точки зрения, так как доступные разработки углеводородные ресурсы месторождений планеты неуклонно истощаются. На основе стохастических термодинамических моделей оценки ресурсов молекул в межзвездной среде разработана информационная система оценки ресурсов молекул в межзвездной среде, включающая базу данных и алгоритм прогнозирования ресурсов углеводородных систем и биологически активных веществ. Для расчетов использованы методы математической статистики и статистической термодинамики. С помощью программы определены ресурсы различных соединений.

*Ключевые слова:* информационная система, межзвездная среда, ресурсы молекул, углеводородные системы, термодинамика, прогноз.

## INFORMATION SYSTEM OF AN MOLECULES RESOURCES IN THE INTERSTELLAR ENVIRONMENT ASSESSMENT

Problem of an origin of natural organic systems – amino acids, nucleotides and other construction elements of life and as natural hydrocarbonic systems to which oil and gas belong it is actual not only with fundamental, but also from the practical point of view because hydrocarbonic resources of our planet are steadily exhausted. On the basis of stochastic thermodynamic models of an assessment of molecules resources in the interstellar environment was the information system of an assessment of molecules resources in the interstellar environment developed.

The program allows to resources forecasten of hydrocarbonic systems and biologically active compounds and a database to adden. In calculations were methods of mathematical statistics and statistical thermodynamics used. Resources of various compounds were using the program defined.

*Key words:* Information system, interstellar environment, molecules resources, hydrocarbonic systems, thermodynamics, forecast.

Проблема оценки ресурсов природных органических систем в межзвездной среде – аминокислот, нуклеотидов и других строительных элементов жизни, а также природных углеводородных систем, к которым относятся нефть и газ, актуальна не только с фундаментальной, но и с практической точки зрения, так как доступные разработке углеводородные ресурсы месторождений планеты неуклонно истощаются.

Недостатком лабораторных опытов, направленных на формирование молекул в приближенных к космическим условиям, является то, что в лаборатории невозможно воспроизвести весь комплекс космических воздействий. Поэтому особое внимание в последние годы уделяется компьютерным экспериментам.

При этом на ЭВМ рассматриваются этапы термодинамической, космохимической и динамической эволюции допланетного газопылевого диска из планетезималей – мельчайших зародышей планет. С помощью вычислительных методов проводится имитационное моделирование образования и эволюции субдиска, пылевых сгущений и первичных планетезималей [1], исследуются процессы эволюции солнечного допланетного облака [2]. Сложные задачи решаются, как правило, численными методами химической кинетики на микро- и макроскопических масштабах с применением алгоритмов метода Монте-Карло [3].

Задачей компьютерных исследований является создание численных моделей химической кинетики образования органических молекул в межзвездных химически активных газопылевых средах. Эти модели включают каталитические реакции на поверхности газопылевых оболочек, а также химический обмен между пылевой и газовой системой. Существенным препятствием на пути таких исследований является отсутствие знаний о поведении вещества в экстремальных условиях космоса. Законы химической кинетики, известные в лабораторных условиях, трудно перенести в космические масштабы и среды с колоссальным гравитационным, радиационным и электромагнитным воздействием. Поэтому актуальными являются термодинамические исследования, которые не требуют изучения элементарных стадий процесса образования молекул. В частности, задачей данного исследования

является разработка информационной системы на основе феноменологической термодинамической модели вероятности существования органических веществ исходя из астрофизических данных.

Задачей исследования является разработка информационной системы оценки ресурсов молекул в межзвездной среде – с целью прогнозирования ресурсов углеводородных систем и биологически активных веществ в межзвездной среде на основе равновесных термодинамических моделей распределения состава органического и неорганического вещества.

Обоснование и предпосылки предлагаемой равновесной термодинамической модели распределения органического вещества в межзвездной среде приведены в работах [4–9].

В соответствии с термодинамикой многокомпонентных систем с хаосом химического состава [4] модель имеет вид:

$$P_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\left[\frac{\Delta F - Fs}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\right]^2}, \quad (1)$$

где  $P_i$  – вероятность образования молекул ГМО с определенной свободной энергией образования;  $\Delta F$  – свободная энергия образования  $i$ -го соединения;  $Fs$  – средняя свободная энергия образования всех молекулярных соединений;  $\sigma^2$  – соответствующая дисперсия нормального распределения.

Кроме того, модель включает оценку ресурсов с учетом данных астрономии по численности небесных тел [10] в видимой части Вселенной по формуле:

$$M_i = xF(p_i) Q_{ГМО} N_g M_o, \quad (2)$$

где  $p_i$  – вероятность существования  $i$ -й молекулы в ГМО;  $F(p_i)$  – соответствующая функция распределения вероятности;  $Q_{ГМО} = 1 \div 10^6$  – среднее число ГМО в Галактике;  $N_g = 10^{10}$  – число галактик в видимой части Вселенной;  $M_o = 2 \cdot 10^{30}$  кг – масса Солнца, которая может быть принята за единицу массы в таких макроскопических масштабах;  $x = 1$  – коэффициент, учитывающий потери органических молекул в процессах звездообразования и их воспроизводство при взрывах Сверхновых.

Результаты расчетов по используемой модели, полученные еще в 2002–2004 гг. [4, 5], подтверждаются рядом работ [11–14].

Входящая в информационную систему база

данных построена на данных астрофизических наблюдений межзвездных молекулярных облаков в ИК и радиообласти электромагнитного спектра [15]. Представленная в данной работе информационная система прогноза ресурсов веществ в межзвездной

структуре выполнена в среде Delphi 7, позволяет вести базу данных. Блок-схема алгоритма расчета представлена на рисунке 1, схема базы данных отображена на рисунке 2, интерфейс программы показан на рисунках 3, 4.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета ресурсов вещества в межзвездной среде

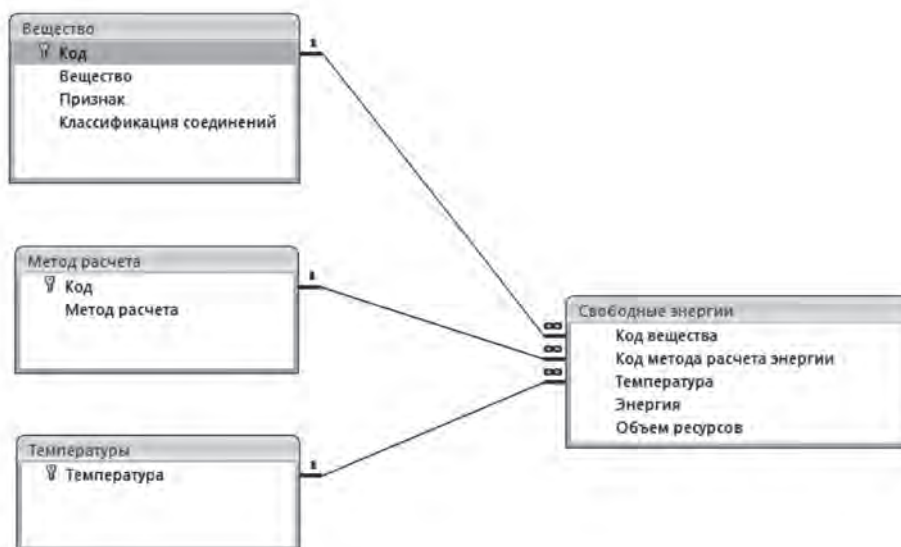


Рис. 2. Схема базы данных информационной системы по оценке и прогнозированию ресурсов вещества в межзвездной среде

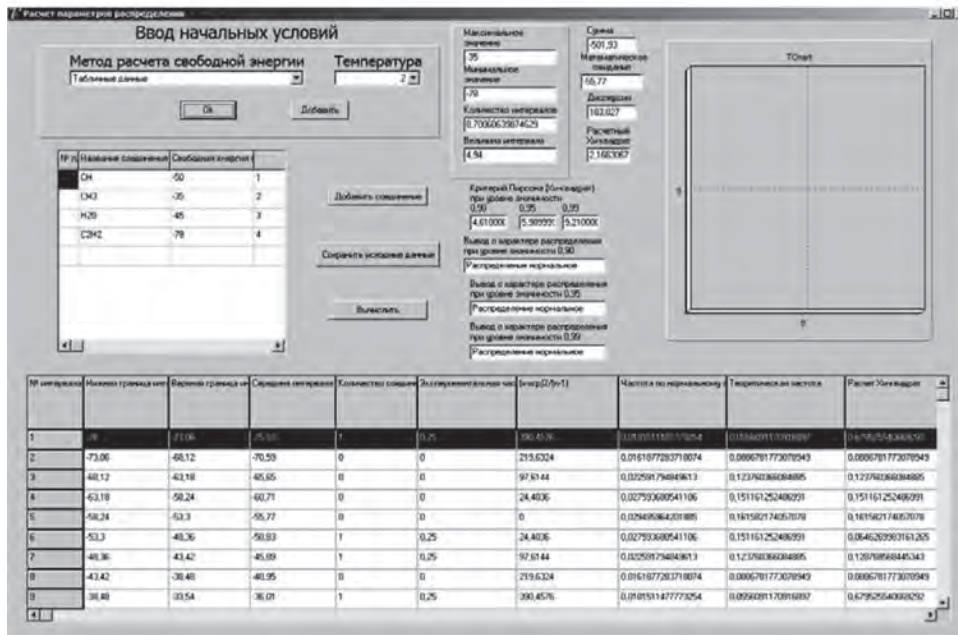


Рис. 3. Интерфейс программы по оценке и прогнозированию ресурсов вещества в межзвездной среде

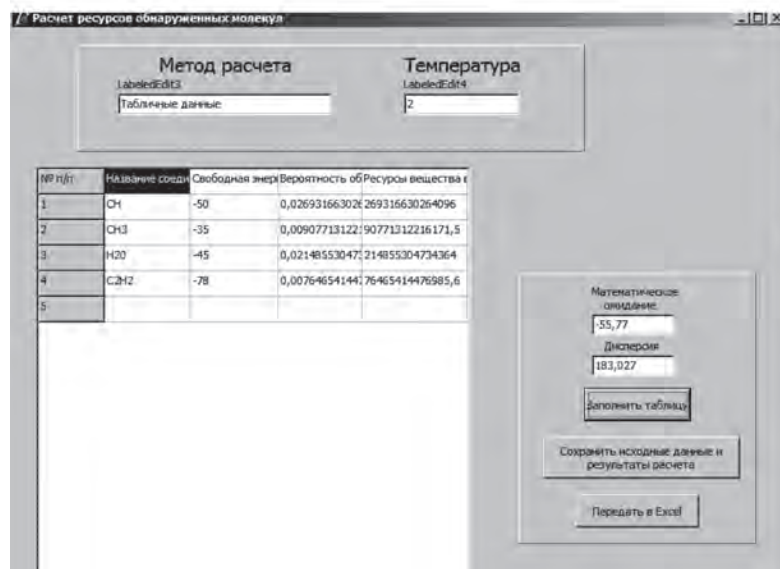


Рис. 4. Интерфейс программы по оценке и прогнозированию ресурсов вещества в межзвездной среде

Разработка информационной системы по предлагаемой модели позволит спрогнозировать ресурсы молекулярного вещества в межзвездной среде.

*Список литературы*

1. Makalkin A.B. Modeling formation of self-gravitating dust condensations and original planetesimals in a protoplanetary disk [Text] / A.B. Makalkin, I.N. Ziglina // The third Moscow Solar System Symposium. – Moscow: Space Research Institute, 2012. – 3MS3-PC-03.
2. Marov M.Ya. Turbulence and selforganizing: problems modelling of space and environments [Text]

/ M.Ya. Marov, A.V. Kolesnichenko. – Berlin: Springer, 2012. – 563 p.

3. Цветков В.И. Кинетический метод Монте-Карло для моделирования астрохимической кинетики: химия водорода в диффузных облаках [Текст] / А.Г. Цветков, В.И. Шематович // Астрономический вестник. – 2010. – Том 44. – № 3. – С. 195–208.

4. Долматов М.Ю. Фрагменты теории реального вещества [Текст] / М.Ю. Долматов. – М.: Химия, 2005. – 208 с.

5. Dolomator M.Yu. Features of equilibrium thermodynamics complex systems with chaos of chemical constitutions and allocation of organic matter

in the space [Electronic resource] / M.Yu. Dolomatov // Abstracts of International Conference on Complex Systems (ICCS2004). – URL: <http://www.necsi.edu/events/iccs/openconf/author/abstractbook.php>.

6. *Доломатов М.Ю.* Закономерности распределения органических молекул в межзвездной среде и космическое происхождения нефти. Развитие гипотезы Соколова-Эйгенсона [Текст] / М.Ю. Доломатов, Н.А. Журавлева // Межрегиональный сборник «Нефтегазопереработка-2012»: материалы междунар. научно-практ. конф. – Уфа: ГУП «Институт нефтехимпереработки Республики Башкортостан», 2012. – С. 9–15.

7. *Доломатов М.Ю.* Статистические модели распределения состава органических веществ в гигантских молекулярных облаках [Текст] / М.Ю. Доломатов, Н.А. Журавлева // Научные технологии. – 2012. – № 6. – С. 32–37.

8. *Dolomatov M.Yu.* The Thermodynamic Models of Molecular chemical compound Distribution in the Giant Molecular Clouds Medium/ M.Yu. Dolomatov, N.A. Zhuravleva // Applied Physics research. – 2012. – Vol. 4 – № 4.

9. *Доломатов М.Ю.* Закономерности распределения органических молекул в межзвездной среде и космическое происхождение нефти. Развитие ги-

потезы Соколова-Эйгенсона [Текст] / М.Ю. Доломатов, Н.А. Журавлева // Материалы 1-й Всероссийской конференции по глубинному генезису нефти «Кудрявцевские Чтения» – Москва: ОАО «ЦГЭ», 2012.

10. *Лекции по радиоастрономии* [Электронный ресурс] / Г.М. Рудницкий. – URL: <http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Rudnickij/index.htm>.

11. *Julian Chela-Flores* The Science of Astrobiology [Text] / Chela-Flores Julian // Cellular Origin and Life in Extreme Habitats and Astrobiology. – Vol. 20.– 2011.

12. *Whittet D.C.B.* Planetary and Interstellar Processes relevant to the Origins of Life [Text] / D.C.B. Whittet. – Kluwer Academic Publishers, 1997. – 316 p.

13. *Sun Kwok* Mixed aromatic–aliphatic organic nanoparticles as carriers of unidentified infrared emission features [Text] / Kwok Sun, Zhang Yong // Nature. – 2011. – vol. 479. – № 3 – P. 80–83.

14. *Cami J.* Detection of C60 and C70 in a Young Planetary Nebula Science [Text] / J. Cami, J. Bernard-Salas, E. Peeters, Malek S. Elizabeth // Science. – 2010– Vol. 329. – № 5996. – P. 1180–1182.

15. *Universität zu Köln.* Molecules in Space [Electronic resource]. – URL: <http://www.astro.uni-koeln.de/cdms/molecules>.



**Доломатов М.Ю.**  
**Dolomatov M.Yu.**

*кандидат технических наук, доктор химических наук, профессор кафедры «Физика» Уфимского государственного университета экономики и сервиса, руководитель лаборатории «Электроника и нанотехнологии», Россия, г. Уфа*



**Шуткова С.А.**  
**Shutkova S.A.**

*аспирант кафедры «Физика» Уфимского государственного университета экономики и сервиса, Россия, г. Уфа*



**Кавьев А.Г.**  
**Kaviev A.G.**

*старший научный сотрудник Института нефтепереработки, Россия, г. Уфа*



**Юсупов Э.А.**  
**Yusupov E.A.**

*старший научный сотрудник Института нефтепереработки, Россия, г. Уфа*



**Гордеев В.Н.**  
**Gordeev V.N.**

*старший научный сотрудник Института нефтепереработки, Россия, г. Уфа*



**Челноков Ю.В.**  
**Chelnokov Yu.V.**

*старший научный сотрудник Института нефтепереработки, Россия, г. Уфа*

УДК 541.1.

## **ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И СВОЙСТВ АМОРФНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ АСФАЛЬТЕНОВ**

Методом электронной феноменологической спектроскопии исследованы электронные спектры асфальтенов различного происхождения. Результаты исследования показывают, что асфальтены крекинг-остатка и гудрона западно-сибирской нефти проявляют свойства полупроводников (ПИ = 4,70÷4,74 эВ; СЭ = 2,07÷2,10 эВ), а асфальтены гудрона и асфальта деасфальтизации западно-сибирской товарной нефти, асфальтены нефти Сургутского месторождения и асфальтены нефти месторождения Киенгоп являются диэлектриками (ПИ = 5,17÷5,85 эВ, СЭ = 1,61÷1,89 эВ). Это свидетельствует о возможности их применения в качестве материалов с широким диапазоном электропроводящих и донорно-акцепторных свойств. Полученные экспериментальные данные подтверждаются исследованием температурной зависимости удельного сопротивления асфальтита, выделенного из гудрона западно-сибирской нефти в Добен-процессе. Исследования температурных зависимостей концентрации парамагнитных центров и удельной проводимости асфальтита в твердом состоянии при температурах, меньших температуры размягчения (180 °С), показывают, что в молекулярной форме (диамагнитная фаза) асфальтенов преобладают диэлектрические свойства, а свободно-радикальная форма (парамагнитная фаза) играет роль легирующей добавки, повышающей электропроводность. Энергия активации электропроводности (1,38 эВ) свидетельствует

об экситонной природе процесса переноса электронов в полупроводнике.

*Ключевые слова:* нефтяные асфальтены, электронная спектроскопия, удельное сопротивление, электропроводящие свойства, твердый асфальтит.

## FEATURES OF CONDUCTIVITY AND PROPERTIES OF AMORPHOUS SEMICONDUCTORS ON THE BASE OF ASFALTENES

Phenomenological method of electron spectroscopy studied the electronic spectra of asphaltenes of different origins. Results of the study show that the asphaltenes cracking residue and tar West Siberian oil behave as semiconductors ( $IP = 4,70 \div 4,74$  eV,  $EA = 2,07 \div 2,10$  eV), and asphaltenes tar and asphalt deasphalting West Siberian tank oil asphaltenes Surgut oil fields and oil deposits Kiengopasphaltenes are insulators ( $IP = 5,17 \div 5,85$  eV,  $EA = 1,61 \div 1,89$  eV). This suggests the possibility of their use as materials with a wide range of conductive and donor- acceptor properties. The experimental data are confirmed by the study of the temperature dependence of the resistivity asphaltite extracted from tar West Siberian oil Doben-process. The temperature dependences of the concentration of paramagnetic centers asphaltite and conductivity in the solid state at temperatures below the softening temperature ( $180$  °C) show that molecular form (diamagnetic phase) asphaltenes predominate dielectric properties, and a free-radical form (paramagnetic phase) plays dopant conductivity improver. Activation energy ( $1,38$  eV) indicates the excitonic nature of the transfer of electrons in the semiconductor.

*Key words:* petroleum asphaltenes, electronic spectroscopy, specific resistance, electroconductive properties, firm asphaltite.

Современные органические наноматериалы – углеродные нанотрубки, графены, фуллерены и другие – получают в результате сложных и дорогостоящих технологических операций. Поэтому поиск более дешевых органических материалов для электроники и электротехники является важной задачей химической технологии. Определенную перспективу имеют нефтяные асфальтены, поскольку в их молекулах аналитическими методами установлено наличие замещенных нафтоароматических, полисопряженных ароматических фрагментов и неспаренных электронов, которые присутствуют в органических электропроводящих структурах. По имеющимся на сегодняшний день данным, содержание асфальтенов в нефти составляет  $0,1$ – $5\%$  масс., в природных асфальтах и битумах – до  $75\%$  масс., в высококипящих фракциях процессов нефтепереработки – до  $30\%$  масс. [1, 2]. Кроме того известно, что асфальтены в нефтяных дисперсных системах находятся в виде разнообразных надмолекулярных структур размером от  $1$  до  $1000$  нм [3], что позволяет рассматривать их в качестве перспективного объекта нанотехнологий. В  $1980$ – $2000$  гг. с применением спектроскопических, электрических и квантово-химических методов была показана возможность использования асфальтенов различного происхождения в качестве органических электропроводящих материалов [4–7].

В качестве объектов исследования выделены асфальтены западно-сибирской и удмуртской нефтей, а также асфальтены высококипящих фракций западно-сибирской товарной нефти: гудрона,

крекинг-остатка и асфальта деасфальтизации. Выделение асфальтенов проводили по методу И.Р. Хайрудинова [8].

Относительная плотность, среднечисловая молекулярная масса и коксуемость по Конрадсону определялись по методике БашНИИ НП с применением электронной адсорбционной спектроскопии. Физико-химические свойства выделенных образцов асфальтенов изучены стандартными методами [9]. Результаты приведены в таблице 1.

Электропроводность асфальтита Добен-процесса, который содержит до  $90\%$  асфальтенов, определялась на стандартной лабораторной установке [10]. Для обеспечения однородности образца производилось измельчение асфальтита на шаровой мельнице с последующим прессованием в таблетки под давлением  $6$  МПа. Исследования концентрации парамагнитных центров (ПМЦ) проводились методом ЭПР на модифицированном спектрометре ЭПА-2 с рубиновым эталоном по методике Ф.Г. Унгера [11].

Для оценки эффективных потенциалов ионизации (ПИ) и сродства к электрону (СЭ) наночастиц асфальтенов использовались методы электронной феноменологической спектроскопии (ЭФС) [10, 11]. Электронные абсорбционные спектры поглощения асфальтенов в растворе толуола при концентрациях  $0,01$ – $0,02$  г/л регистрировались в видимом и УФ-диапазоне от  $310$  до  $770$  нм.

Методом ЭФС исследованы электронные спектры асфальтенов различного происхождения (рис. 1).

Физико-химические свойства асфальтенов

Показатели	Асфальтены				
	дистиллятного крекинг-остатка гудрона западно-сибирской нефти	гудрона западно-сибирской товарной нефти	асфальта западно-сибирской нефти	нефти Сургутского месторождения	нефти месторождения Киенгоп
Относительная плотность	1,283	1,252	1,151	1,043	1,012
Коксуемость по Конрадсону, % масс.	68,5	69,5	43,5	50,3	54,2
Молекулярная масса, а.е.м.	3122	1875	1324	1596	1059
Концентрация парамагнитных центров, $\cdot 10^{19}$ спин/г	62,2	55,5	40,8	25,0	17,1

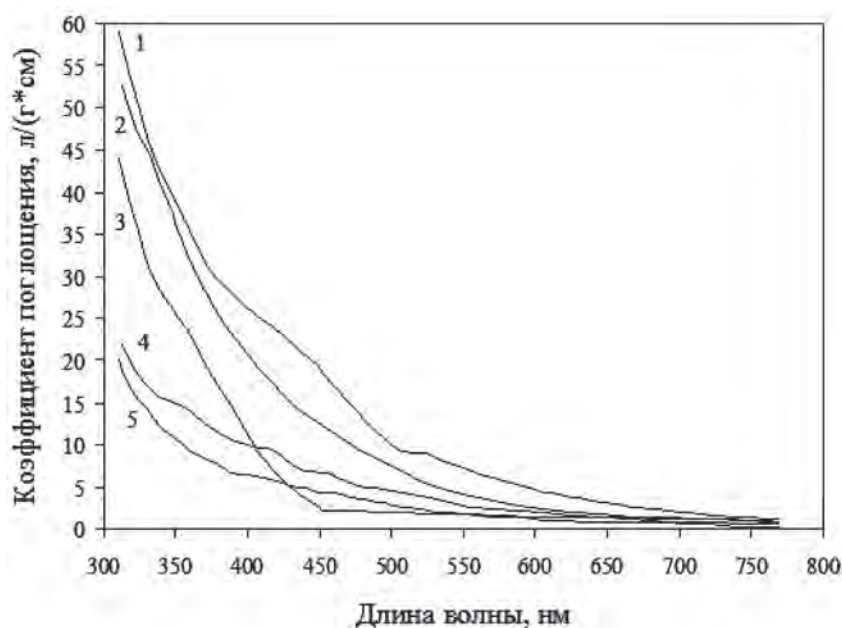


Рис. 1. Спектры поглощения в ближней УФ и видимой областях различных асфальтенов: 1 – крекинг-остатка западно-сибирской товарной нефти, 2 – гудрона западно-сибирской нефти, 3 – асфальта западно-сибирской товарной нефти, 4 – нефти Сургутского месторождения, 5 – нефти месторождения Киенгоп

Данные таблицы 2 показывают, что асфальтены крекинг-остатка и гудрона западно-сибирской нефти проявляют свойства полупроводников (ПИ = 4,70÷4,74 эВ; СЭ = 2,07÷2,10 эВ), а асфальтены гудрона и асфальта деасфальтизации западно-сибирской товарной нефти, асфальтены нефти Сургутского месторождения и асфальтены нефти месторождения Киенгоп являются диэлектриками (ПИ =

5,17÷5,85 эВ, СЭ = 1,61÷1,89 эВ) [14].

Полученные экспериментальные данные подтверждаются исследованием температурной зависимости удельного сопротивления асфальтита, выделенного из гудрона западно-сибирской нефти в Добен-процессе (рис. 2). При увеличении температуры от 293 до 393 К удельное сопротивление уменьшается от  $1,2 \cdot 10^{11}$  до  $2,6 \cdot 10^6$  Ом·м.



Таблица 2

**Характеристики электронной структуры асфальтенов по методу ЭФС**

Асфальтены	Эффективные		Ширина запрещенной зоны, эВ
	ПИ, эВ	СЭ, эВ	
Крекинг-остатка дисцилляционной фракции	4,70	2,08	2,62
Крекинг-остатка западно-сибирской нефти	4,74	2,07	2,67
Гудрона западно-сибирской нефти, $T_{кип} > 450$ °C	4,70	2,10	2,60
Гудрона западно-сибирской нефти $T_{кип} > 400$ °C	5,58	1,72	3,87
Асфальта западно-сибирской нефти	5,17	1,89	3,28
Нефти Сургутского месторождения	5,47	1,76	3,70
Нефти месторождения Киенгоп	5,85	1,61	4,24

Исследованы температурные зависимости концентрации парамагнитных центров и удельной проводимости асфальтита в твердом состоянии при температурах, меньших температуры размягчения (180 °C). Согласно данным таблицы 3 при увеличе-

нии температуры от 30 до 160 °C происходит увеличение концентрации ПМЦ от  $6,6 \cdot 10^{18}$  до  $10,6 \cdot 10^{18}$  спин/г и увеличение удельной проводимости от  $1,21 \cdot 10^{-11}$  до  $3,41 \cdot 10^{-5}$  (Ом·м)<sup>-1</sup>.

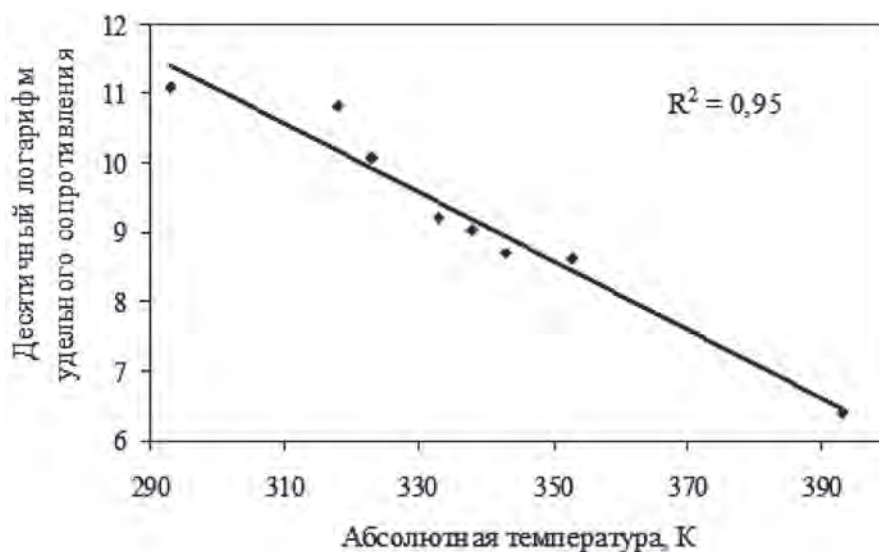


Рис. 2. Температурная зависимость десятичного логарифма удельного сопротивления асфальтита

Рост электропроводности с увеличением температуры означает, что в твердой фазе увеличивается количество свободных стабильных радикалов, так как происходит гомолитический распад слабых

углерод-углеродных связей в молекулах асфальтенов при ароматических молекулярных фрагментах:



Таблица 3

**Температурная зависимость концентрации ПМЦ и удельной проводимости асфальтита**

Температура, °C	Концентрация ПМЦ, $10^{18}$ спин/г	Удельная проводимость, (Ом·м) <sup>-1</sup>
30	6,6	$1,22 \cdot 10^{-11}$

Температура, °С	Концентрация ПМЦ, 10 <sup>18</sup> спин/г	Удельная проводимость, (Ом·м) <sup>-1</sup>
40	7,7	3,80·10 <sup>-11</sup>
60	7,8	3,72·10 <sup>-10</sup>
70	8,1	1,18·10 <sup>-9</sup>
90	9,3	1,16·10 <sup>-8</sup>
120	10,3	3,55·10 <sup>-7</sup>
160	10,6	3,43·10 <sup>-5</sup>

Энергия активации электропроводности определяется по формуле:

$$\sigma = \sigma_o \cdot e^{\frac{-\Delta E}{RT}}, \tag{2}$$

где  $\sigma_o$  – постоянная величина;  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная

температура, К;  $\Delta E$  – энергия активации электропроводности.

Методом наименьших квадратов исследована зависимость натурального логарифма удельной проводимости от величины обратной абсолютной температуры (рис. 3).

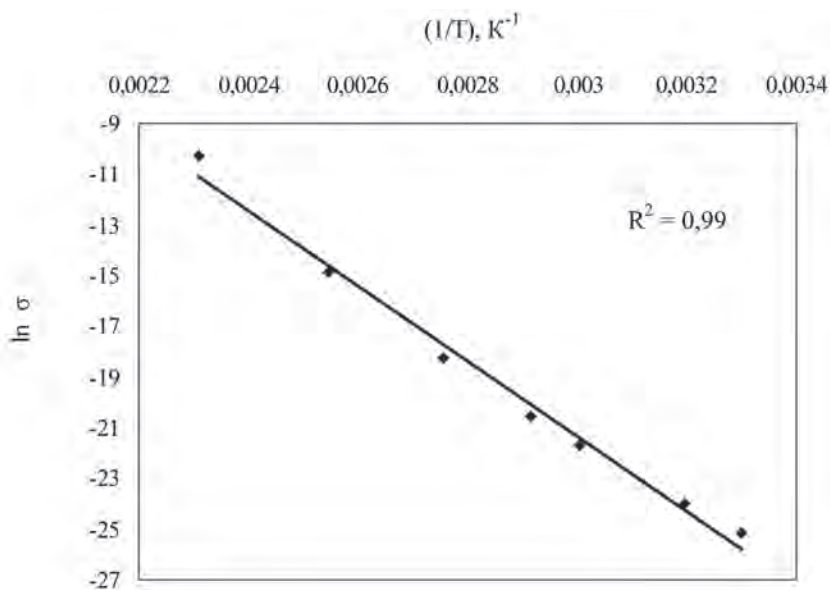


Рис. 3. Зависимость натурального логарифма удельной проводимости асфальтита от (1/T), K<sup>-1</sup>

Уравнение полученной зависимости имеет вид:

$$\ln \sigma = 23,195 - 14841 \cdot \frac{1}{T}. \tag{3}$$

Преобразуя уравнение (2), получаем уравнение температурной зависимости электропроводности асфальта:

$$\sigma = 10^{10,04} \cdot e^{\frac{-1,38}{kT}}. \tag{4}$$

Энергия активации электропроводности, определенная по зависимости (2), равна 1,38 эВ, что сви-

детельствует об экситонной природе процесса переноса электронов в полупроводнике. Учитывая, что диэлектрическая постоянная асфальтенов находится в интервале от 2 до 10, можно предположить, что образуются экситоны Френкеля.

Следовательно, асфальтены являются аморфными широкозонными полупроводниками. При высоких температурах увеличение концентрации свободных радикалов способствует формированию парамагнитной фазы внутри твердого материала.

Эти свободные радикалы играют роль легирующей добавки и увеличивают электропроводность, так как являются акцепторами электронов.

Таким образом, результаты исследования нефтяных асфальтенов методом электронной спектроскопии показывают низкие значения эффективного потенциала ионизации наночастиц (4,70–5,85 эВ) и высокие значения эффективного сродства к электрону наночастиц (1,61–2,10 эВ), что свидетельствует о возможности их применения в качестве материалов с широким диапазоном электропроводящих и донорно-акцепторных свойств.

Исследования температурной зависимости электропроводности и концентрации парамагнитных центров твердого асфальтита показывают, что в молекулярной форме (диамагнитная фаза) асфальтенов преобладают диэлектрические свойства, а свободно-радикальная форма (парамагнитная фаза) играет роль легирующей добавки, повышающей электропроводность.

#### Список литературы

1. Сергиенко С.Р. Высокомолекулярные углеводородные соединения нефти. Смолы и асфальтены [Текст] / С.Р. Сергиенко, Б.А. Таимова, Е.И. Талаев. – М.: Наука, 1979. – 269 с.
2. Поконова Ю.В. Химия высокомолекулярных соединений нефти [Текст] / Ю.В. Поконова. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 172 с.
3. Mullins O.C. Structures and Dynamics of Asphaltenes [Text] / O.C. Mullins, E.Y. Sheu. – New York City: Plenum, Springer, 1999. – 314 p.
4. Доломатов М.Ю. Асфальтосмолистые олигомеры. Применение и физико-химические свойства [Текст] / М.Ю. Доломатов, С.В. Пестриков, Э.А. Юсупов, С.А. Александрова – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1992. – 70 с.
5. Bracciale M. On evaluating organic electronic materials of asphaltene components [Text] / M. Bracciale, S. Sennato, A. Marrocchi // Sixth International Meeting on Molecular Electronics. 03-07 December 2012. – Grenoble, France. – P. 285.
6. Косых Л.А. Спектры ЭПР и времена релаксации природных  $\pi$ -сопряженных полимеров, легируемых йодом [Текст] / Л.А. Косых, Ю.А. Лебедев, А.Н. Чувывров, Е.А. Машкина // Структура и динамика молекулярных систем: Сб. статей X Всерос. конфер. / Ч. 1. – Йошкар-Ола, 2003. – с. 159–161.
7. Доломатов М.Ю. Донорно-акцепторные свойства и растворимость асфальтосмолистых веществ [Текст] / М.Ю. Доломатов, М.К. Рогачев, М.Б. Касьянова // Башкирский химический журнал. – 2001. – Т. 8. – № 5. – С. 12–21.
8. Хайрудинов И.Р. Оценка компонентного состава сложных структурных единиц нефтяных дисперсных систем / И.Р. Хайрудинов, Ф.Г. Унгер, З.И. Сюняев // Химия технологии топлив и масел. – 1987. – № 6. – С. 36–38.
9. Доломатов М.Ю. Фрагменты теории реального вещества. От углеводородных систем к галактикам [Текст] / М.Ю. Доломатов – М.: Химия, 2005. – 208 с.
10. Материалы углеродистые. Метод измерения удельного электрического сопротивления порошка. ГОСТ 4668-75 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vsegost.cjm/catalog/34/34601.shtml>.
11. Унгер Ф.Г. Фундаментальные аспекты химии нефти. Природа смол и асфальтенов [Текст] / Ф.Г. Унгер, Л.Н. Андреева. – Новосибирск: ВО «Наука», Сибирская издательская фирма РАН. – 1995. – 188 с.
12. Доломатов М.Ю. Применение электронной спектроскопии в физико-химии многокомпонентных стохастических и сложных молекулярных систем [Текст] / М.Ю. Доломатов. – Уфа: ЦНТИ, 1989. – 47 с.
13. Доломатов М.Ю. Применение электронной феноменологической спектроскопии для идентификации и исследования сложных органических систем [Текст] / М.Ю. Доломатов // Химия и технология топлив и масел. – 1995. – № 1. – С. 29–32.
14. Харисов Б.Р. С.А. Надмолекулярная структура нефтяных асфальтенов месторождения Киенгоп / Б.Р. Харисов, Д.О. Шуляковская, С.А. Шуткова // Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники: мат. Всерос. молодежн. конфер. – Уфа, 2012 – С. 73.

## ОБ АВТОРАХ

*Зикий Анатолий Николаевич*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, главный конструктор проекта «Научно-конструкторское бюро моделирующих и управляющих систем» Южного федерального университета, e-mail: zikiy50@mail.ru, Россия, г. Таганрог.

*Зламан Павел Николаевич*, ведущий инженер-конструктор «Научно-конструкторское бюро моделирующих и управляющих систем» Южного федерального Университета, e-mail: otdel24d@nkbmius.ru, Россия, г. Таганрог.

*Власенко Даниил Васильевич*, ассистент кафедры «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» Технологического института Южного федерального университета в г. Таганроге, e-mail: vlasenko960@yandex.ru, Россия, г. Таганрог.

*Исмагилов Флор Рашитович*, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

*Хайруллин Ирек Ханифович*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

*Вавилов Вячеслав Евгеньевич*, ассистент кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: s2\_88@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Николаев Павел Александрович*, канд. техн. наук, ведущий инженер-конструктор ОАО «АВТОВАЗ», Поволжского государственного университета сервиса, e-mail: пра690@yandex.ru, Россия, г. Тольятти.

*Николаев Александр Дмитриевич*, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры «Автотракторное электрооборудование и электромеханика», Тольяттинского государственного университета, e-mail: aniko47@mail.ru, Россия, г. Тольятти.

*Гориков Борис Михайлович*, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Сервис технических и технологических систем» Поволжского государственного университета сервиса, e-mail: kaf\_ekis@tolgas.ru, Россия, г. Тольятти.

*Стыскин Андрей Владиславович*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: styskin.andrei@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Уразбахтина Нэля Гиндулаевна*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: urazbah@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Татевосян Андрей Александрович*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета, e-mail: karo1@mail.ru, Россия, г. Омск.

*Феоктистов Николай Алексеевич*, д-р техн. наук, профессор Московского государственного университета дизайна и технологий, e-mail: nikolay.a.feoktistov@gmail.com, Россия, г. Москва.

*Варламов Игорь Владимирович*, д-р техн. наук, профессор Института государственного управления, права и инновационных технологий, e-mail: Viv33@mail.ru, Россия, г. Москва.

*Феоктистов Андрей Николаевич*, канд. техн. наук, доцент Института государственного управления, права и инновационных технологий, e-mail: Andrey.feoktistov@gmail.com, Россия, г. Москва.

*Хакимьянов Марат Ильгизович*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий» Уфимского государственного нефтяного технического университета, e-mail: hakimyanovmi@gmail.com, Россия, г. Уфа.

*Шафииков Игорь Наилевич*, аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий» Уфимского государственного нефтяного технического университета, e-mail: shafikov\_in@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Шабанов Виталий Алексеевич*, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий» Уфимского государственного нефтяного технического университета, e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Шарипова Светлана Филарисовна*, аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий» Уфимского государственного нефтяного технического университета, e-mail: SharipovaSveta@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Шапиро Семен Вольфович*, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Физика» Уфимского государственного университета экономики и сервиса, e-mail: svshap@ufacom.ru, Россия, г. Уфа.

*Терегулов Тагир Рафаэлевич*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

*Полихач Евгений Александрович*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

*Кузнецов Антон Юрьевич*, студент Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

*Абдрахманова Гузель Идрисовна*, аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: tekasesochka@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Багманов Валерий Хусаинович*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: tks@ugatu.ac.ru, Россия, г. Уфа.

*Артюшенко Владимир Михайлович*, д-р техн. наук, профессор, проректор по информационным технологиям Финансово-технологической академии, e-mail: artuschenko@mail.ru, Россия, г. Королев.

*Кучеров Борис Алексеевич*, аспирант Финансово-технологической академии, e-mail: bogis.ku4erov@gmail.com, Россия, г. Королев.

*Бакалов Олег Валерьевич*, старший преподаватель кафедры «Машины и аппараты легкой промышленности» Черниговского государственного технологического университета, e-mail: oleglan@mail.ru, Украина, г. Чернигов.

*Чередниченко Петр Иванович*, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Машины и аппараты легкой промышленности» Черниговского государственного технологического университета, e-mail: pitercher@ukr.net, Украина, г. Чернигов.

*Бакалов Валерий Григорьевич*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Машины и аппараты легкой промышленности» Черниговского государственного технологического университета, e-mail: bakalow@mail.ru, Украина, г. Чернигов.

*Будников Андрей Николаевич*, аспирант кафедры «Информационная безопасность» Дальневосточного федерального университета, e-mail: bandrmail@yandex.ru, Россия, г. Владивосток.

*Мешков Иван Константинович*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: mik.ivan@bk.ru, Россия, г. Уфа.

*Зайнуллин Айрат Радикович*, аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: zainullin.a@list.ru, Россия, г. Уфа.

*Грахова Елизавета Павловна*, аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: eorlingsbest@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Кутлужаров Руслан Владимирович*, аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: kutluyarov@gmail.com, Россия, г. Уфа.

*Осипов Владимир Петрович*, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, e-mail: osipov@keldysh.ru, Россия, г. Москва.

*Сивакова Татьяна Владимировна*, младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, e-mail: sivakova15@mail.ru, Россия, г. Москва.

*Судаков Владимир Анатольевич*, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, e-mail: vsudakov@bk.ru, Россия, г. Москва.

*Трахтенгерц Эдуард Анатольевич*, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, e-mail: tracht@ipu.rssi.ru, Россия, г. Москва.

*Загреев Борис Васильевич*, канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», e-mail: zbv@tsniimash.ru, Россия, г. Королев.

*Рокка Паоло*, д-р философии, доцент кафедры «Инфотехника и информатика» Университета Тренто,

e-mail: paolo.rosca@disi.unitn.it, Италия, г. Тренто.

*Чириков Роман Юрьевич*, аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: chirikov.ru@gmail.com, Россия, г. Уфа.

*Романченко Анатолий Федорович*, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Сервис транспортных систем» Уфимского государственного университета экономики и сервиса, e-mail: romanchenko@rambler.ru, Россия, г. Уфа.

*Мухамадиев Айдар Асхатович*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника» Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: Aidar80@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Тугашова Лариса Геннадьевна*, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии» Альметьевского государственного нефтяного института, e-mail: tugashova@yandex.ru, Россия, г. Альметьевск.

*Журавлева Надежда Александровна*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Экономическая информатика» Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: zhuravliova80@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Доломатов Михаил Юрьевич*, канд. техн. наук, д-р хим. наук, профессор кафедры «Физика» Уфимского государственного университета экономики и сервиса, руководитель лаборатории «Электроника и нанотехнологии», e-mail: dolomatov@gmail.com, Россия, г. Уфа.

*Шуткова Светлана Александровна*, аспирант кафедры «Физика» Уфимского государственного университета экономики и сервиса, e-mail: Svetlana-Shutkova@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Кавыев Агзам Газизович*, старший научный сотрудник Института нефтепереработки РБ, e-mail: inhp@inhp.ru, Россия, г. Уфа.

*Юсупов Эдуард Абдрахманович*, старший научный сотрудник Института нефтепереработки РБ, e-mail: inhp@inhp.ru, Россия, г. Уфа.

*Гордеев Виктор Николаевич*, старший научный сотрудник Института нефтепереработки РБ, e-mail: inhp@inhp.ru, Россия, г. Уфа.

*Челноков Юрий Викторович*, старший научный сотрудник Института нефтепереработки РБ, e-mail: inhp@inhp.ru, Россия, г. Уфа.

#### ABOUT THE AUTHORS

*Zikiy Anatoliy Nikolaevich*, Cand. Sci. Tech., senior researcher, chief designer of the project «Scientific design bureau modeling and control systems» Southern Federal University, e-mail: zikiy50@mail.ru, Russia, Taganrog.

*Zlaman Pavel Nikolaevich*, Lead Design Engineer «Scientific design bureau modeling and control systems» Southern Federal University, e-mail: otel24d@nkbmius.ru, Russia, Taganrog.

*Vlasenko Daniil Vasilevich*, assistant chair of «Information security of telecommunication systems» Institute of Technology Southern Federal University, e-mail: vlasenko960@yandex.ru, Russia, Taganrog.

*Ismagilov Flur Rashitovich*, Dr. Sci. Tech., professor, head chair of «Electromechanics», Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

*Khayrullin Irek Khanifovich*, Dr. Sci. Tech., professor, professor chair of «Electromechanics», Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

*Vavilov Vyacheslav Evgenievich*, assistant chair of «Electromechanics» Ufa state aviation technical university, e-mail: s2\_88@mail.ru, Russia, Ufa

*Nikolaev Pavel Aleksandrovich*, Cand. Sci. Tech., Lead Design Engineer JSC «AVTOVAZ», Volga region state university of service, e-mail: nra690@yandex.ru, Russia, Tolyatti.

*Nikolaev Alexander Dmitrievich*, Cand. Sci. Tech., associate professor, professor chair of «Автотракторное электрооборудование и Electromechanics», Tolyatti State University, e-mail: aniko47@mail.ru Russia, Tolyatti.

*Gorshkov Boris Mikhailovich*, Dr. Sci. Tech., professor, head chair of «Service technical and technological systems», Volga region state university of service, e-mail: kaf\_ekis@tolgas.ru, Russia, Tolyatti.

*Styskin Andrey Vladislavovich*, Cand. Sci. Tech., associate professor, associate professor chair of «Electromechanics», Ufa state aviation technical university, e-mail: styskin.andrei@yandex.ru, Russia, Ufa.

*Urazbakhtina Nelja Gindullayevna*, Cand. Sci. Tech., associate professor, associate professor chair of «Electromechanics», Ufa state aviation technical university, e-mail: urazbah@mail.ru, Russia, Ufa.

*Tatevosayn Andrey Aleksandrovich*, Cand. Sci. Tech., associate professor, associate professor chair of «Electrical Engineering», Omsk State Technical University, e-mail: karo1@mail.ru, Russia, Omsk.

*Feoktistov Nikolay Alekseevich*, Dr. Sci. Tech., professor, Moscow state university of design and technology, e-mail: nikolay.a.feoktistov@gmail.com, Russia, Moscow.

*Varlamov Igor Vladimirovich*, Dr. Sci. Tech., professor, Institute of Government, Right and Innovative Technologies, e-mail: Viv33@mail.ru, Russia, Moscow.

*Feoktistov Andrey Nikolaevich*, Cand. Sci. Tech., associate professor, Institute of Government, Right and Innovative Technologies, e-mail: Andrey.feoktistov@gmail.com, Russia, Moscow.

*Hakimyanov Marat Ilgizovich*, Cand. Sci. Tech., associate professor, associate professor chair of «Electrical engineering and electrical equipment of enterprises», Ufa state petroleum technological university, e-mail: hakimyanovmi@gmail.com, Russia, Ufa.

*Shafikov Igor Nailevich*, post-graduate student chair of «Electrical engineering and electrical equipment of enterprises», Ufa state petroleum technological university, e-mail: shafikov\_in@mail.ru, Russia, Ufa.

*Shabanov Vitaliy Alekseevich*, Cand. Sci. Tech., associate professor, head chair of «Electrical engineering and electrical equipment of enterprises», Ufa state petroleum technological university, e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru, Russia, Ufa.

*Sharipova Svetlana Filarisovna*, post-graduate student chair of «Electrical engineering and electrical equipment of enterprises», Ufa state petroleum technological university, e-mail: SharipovaSveta@yandex.ru, Russia, Ufa.

*Shapiro Semyon Volfovich*, Dr. Sci. Tech., professor, head chair of «Physics», Ufa state university of economics and service, e-mail: svshap@ufacom.ru, Russia, Ufa.

*Teregulov Tagir Rafaelevich*, Cand. Sci. Tech., associate professor, associate professor chair of «Electromechanics», Ufa state aviation technical university Russia, Ufa.

*Polihach Evgeny Aleksandrovich*, Cand. Sci. Tech., associate professor chair of «Electromechanics», Ufa state aviation technical university Russia, Ufa.

*Kuznetsov Anton Yurievich*, student, Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

*Abdrakhmanova Guzel Idrisovna*, post-graduate student chair of «Telecommunication systems», Ufa state aviation technical university, e-mail: tekasesochka@yandex.ru, Russia, Ufa.

*Bagmanov Valery Khusainovich*, Dr. Sci. Tech., professor, professor chair of «Telecommunication systems», Ufa state aviation technical university, e-mail: tks@ugatu.ac.ru, Russia, Ufa.

*Artuschenko Vladimir Mikhailovich*, Dr. Sci. Tech., professor, vice-rector for information technology, Financial and technological academy, e-mail: artuschenko@mail.ru, Russia, Korolev.

*Kucherov Boris Alekseyevich*, post-graduate student, Financial and technological academy, e-mail: boris.ku4erov@gmail.com, Russia, Korolev.

*Bakalov Oleg Valeryovich*, старший преподаватель chair of «Machines and apparatuses of light industry», Chernihov State Technological University, e-mail: oleglan@mail.ru, Ukraine, Chernihov.

*Cherednychenko Petr Ivanovich*, Dr. Sci. Tech., professor, head chair of «Machines and apparatuses of light industry», Chernihov State Technological University, e-mail: pitercher@ukr.net, Ukraine, Chernihov.

*Bakalov Valery Grigoryovich*, Cand. Sci. Tech., associate professor, associate professor chair of «Machines and apparatuses of light industry», Chernihov State Technological University, e-mail: bakalow@mail.ru, Ukraine, Chernihov.

*Budnikov Andrey Nikolaevich*, post-graduate student chair of «Information Security», Far Eastern Federal University, e-mail: bandrmail@yandex.ru, Russia, Vladivostok.

*Meshkov Ivan Konstantinovich*, Cand. Sci. Tech., associate professor chair of «Telecommunication systems», Ufa state aviation technical university, e-mail: mik.ivan@bk.ru, Russia, Ufa.

*Zainullin Ayrat Radikovich*, post-graduate student chair of «Telecommunication systems», Ufa state aviation technical university, e-mail: zainullin.a@list.ru, Russia, Ufa.

*Grahova Elizaveta Pavlovna*, post-graduate student chair of «Telecommunication systems», Ufa state aviation technical university, e-mail: eorlingsbest@mail.ru, Russia, Ufa.

*Kutluyarov Ruslan Vladimirovich*, post-graduate student chair of «Telecommunication systems», Ufa state aviation technical university, e-mail: kutluyarov@gmail.com, Russia, Ufa.

*Osipov Vladimir Petrovich*, Cand. Sci. Tech., associate professor, Leading Researcher «Federal State Institution of Science Institute of Applied Mathematics of the M.V. Keldysh» Russian Academy of Sciences, e-mail: osipov@keldysh.ru, Russia, Moscow.

*Sivakova Tatiana Vladimirovna*, junior researcher «Federal State Institution of Science Institute of Applied Mathematics of the M.V. Keldysh» Russian Academy of Sciences, e-mail: sivakova15@mail.ru, Russia, Moscow.

*Sudakov Vladimir Anatolevich*, Cand. Sci. Tech., associate professor, senior researcher «Federal State Institution of Science Institute of Applied Mathematics of the M.V. Keldysh» Russian Academy of Sciences, e-mail: vsudakov@bk.ru, Russia, Moscow.

*Trahtengerts Eduard Anatolevich*, Dr. Sci. Tech., professor, главный научный сотрудник «Federal State Institution of Science Institute of Control of the V.A. Trapeznikova» Russian Academy of Sciences, e-mail: tracht@ipu.rssi.ru, Russia, Moscow.

*Zagreev Boris Vasigovich*, Cand. Sci. Phys. – Math., head of laboratory «Federal state unitary enterprise «Central research institute of machine building», e-mail: zbv@tsniimash.ru, Russia, Korolev.

*Rocca Paolo*, Ph.D., associate professor chair of «Infotekhniks and Informatics», University of Trento, e-mail: paolo.rocca@disi.unitn.it, Italy, Trento.

*Chirikov Roman Yurievich*, post-graduate student chair of «Telecommunication systems», Ufa state aviation technical university, e-mail: chirikov.ru@gmail.com, Russia, Ufa.

*Romanchenko Anatoly Fedorovich*, Dr. Sci. Tech., associate professor, professor chair of «Service of transport systems», Ufa state university of economics and service, e-mail: romanchenko@rambler.ru, Russia, Ufa.

*Mukhamadiev Aydar Ashatovich*, Cand. Sci. Tech., associate professor, associate professor chair of «Information and measuring technics», Ufa state aviation technical university, e-mail: Aidar80@mail.ru, Russia, Ufa.

*Tugashova Larisa Gennadiyevna*, senior lecturer, chair of «Automation and information technologies», Almet'yevsk state oil institute, e-mail: tugashova@yandex.ru, Russia, Almet'yevsk.

*Zhuravleva Nadezhda Alexandrovna*, Cand. Sci. Tech., associate professor chair of «Экономическая информатика», Ufa state aviation technical university, e-mail: zhuravliova80@mail.ru, Russia, Ufa.

*Dolomatov Michail Yurevich*, Cand. Sci. Tech., Dr. Sci. Chem., professor, professor chair of «Physics», Ufa state university of economics and service, e-mail: dolomatov@gmail.com, Russia, Ufa.

*Shutkova Svetlana Alexandrovna*, post-graduate student chair of «Physics», Ufa state university of economics and service, e-mail: Svetlana-Shutkova@yandex.ru, Russia, Ufa.

*Kaviev Agzam Gazizovich*, senior researcher «Institute of Petrochemical Processing RB», e-mail: inhp@inhp.ru, Russia, Ufa.

*Yusupov Edvard Abdrahmanovich*, senior researcher «Institute of Petrochemical Processing RB», e-mail: inhp@inhp.ru, Russia, Ufa.

*Gordeev Victor Nicolaevich*, senior researcher «Institute of Petrochemical Processing RB», e-mail: inhp@inhp.ru, Russia, Ufa.

*Chelnokov Yuri Victorovich*, senior researcher «Institute of Petrochemical Processing RB», Ufa, e-mail: inhp@inhp.ru, Russia, Ufa.



## **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 (не менее 90–120 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 «УГУЭС» электронной версии своей статьи, опубликованной в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы».
10. Графический и табличный материал должен быть представлен в **черно-белом** варианте в приложении к WORD. Например, MicrosoftGraph, без использования сканирования; для диаграмм применять различную штриховку, размер шрифта 10 или 11 pt, математические формулы оформляются через редактор формул MicrosoftEquation, а их нумерация проставляется с правой стороны. Таблицы, диаграммы, рисунки подписываются 12 шрифтом в правом верхнем углу.
11. Сокращение слов, имен и названий, как правило, не допускается. Разрешаются лишь общепринятые сокращения мер физических, химических и математических величин и терминов и т. д.
12. Поступившие в редакцию статьи в обязательном порядке будут проходить рецензирование. Рецензии отклоненных работ высылаются авторам и содержат аргументированный отказ от публикации. В рецензиях работ, отправленных на доработку, указываются замечания к статье.
13. Все статьи, поступившие в редакцию, в обязательном порядке проходят проверку в системе «Антиплагиат».
14. С аспирантов плата за публикацию не взимается. При отправлении статьи на электронный адрес также необходимо отправить отсканированную справку из аспирантуры, заверенную отделом кадров.

### **Памятка авторам**

В статье настоятельно рекомендуется:

- НЕ использовать табуляцию (клавиша Tab);
- НЕ устанавливать свои стили абзацев (кроме принятых по умолчанию);
- НЕ расставлять автоматические списки (при нумерации строк и абзацев);
- НЕ ставить двойные, тройные и т. д. пробелы между словами.

Рекомендуется применять в статье только один тип кавычек («»).

Помните о том, что необходимо различать дефис и тире. Тире выставляется сочетанием двух клавиш («Ctrl» + «-»).

**Все цитаты в статье должны быть соотнесены со списком литературы, при прямом цитировании обязательно указывать номера страниц.** Список литературы не следует смешивать с примечаниями, которые должны располагаться перед списком литературы.

**Статьи, не соответствующие требованиям, отклоняются для доработки.**