

ISSN 1999-5458

# **Электротехнические и информационные комплексы и системы**

**№ 4, т. 11, 2015**



# **Electrical and data processing facilities and systems**

**№ 4, v. 11, 2015**



Подписной индекс:  
91824 в каталоге «Пресса России»

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭКОНОМИКИ И СЕРВИСА

УГУЭС

№4, т. 11, 2015

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

## Учредитель

Министерство образования и науки РФ

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

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Международный стандартный сериальный номер ISSN 1999-5458.

## Редакционная коллегия:

Главный редактор:

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

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



Зам. главного редактора:

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

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



## Члены редакционной коллегии:

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

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



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

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



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

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



В.Г. Крымский – д-р техн. наук, проф.

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



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

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



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

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



Р.Р. Сафин – д-р техн. наук, проф.

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



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

национального технического университета (Белоруссия, г. Минск)



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

«Уфимский государственный

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



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

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



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

«Московский государственный университет дизайна и технологии» (Россия, г. Москва)



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

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



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

Черниговского государственного технологического университета (Украина, г. Чернигов)



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

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



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

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



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

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



Г.Д. Георгиев – д-р техн. наук, преподаватель Технического университета (Болгария, г. Варна)



И.В. Пенетгов – д-р техн. наук, профессор, вед. научный сотр. Института электросварки им. Е.О. Патона

Национальной академии наук Украины (Украина, г. Киев)



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



Ответственный секретарь: А.А. Мухамадиев

Технический редактор: С.С. Некрасова

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

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

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

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

© Уфимский государственный университет экономики и сервиса, 2015

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

Тел.: +7 (347) 228-91-38.

Подписано в печать 27.11.2015 г. Формат 60×80 1/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 8,4. Тираж 1000 экз. Заказ № 129.

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

Материалы приводятся в авторской редакции.

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

# ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND SERVICE

№4, v. 11, 2015

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 education  
"Ufa state university of economics and service"

The journal is included in the «List of peer-reviewed scientific publications, which should be published basic scientific results of theses on competition of a scientific degree of candidate of Sciences, on competition of a scientific degree of the doctor of Sciences»

International standard serial number ISSN 1999-5458.

## Editorial board:

Editor-in-chief:

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

Deputy editor-in-chief:

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

## Members of an editorial board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



## СОДЕРЖАНИЕ

### Электротехнические комплексы и системы

Долгицер А., Антонов Д., Козадаев Е., Биела-Даулидовича Э. Учебные пособия в лаборатории релейной защиты ..... 5

Андреева Е.Г., Семина И.А., Демин А.В. Моделирование концентратора магнитного поля в комплексе программ ANSYS Maxwell ..... 12

Литвиненко Р.С., Идиятуллин Р.Г., Аухадеев А.Э. Моделирование отказов электротехнического комплекса и его элементов на этапе разработки ..... 17

Карабельская И.В., Абызбаев И.И. Методы расчета электрических полей при электрохимической защите трубопроводов от коррозии в неоднородных и клиновидных средах ..... 25

Фетисов В.С., Мельничук О.В. Моделирование электрических цепей интеллектуальной контактной матрицы ..... 34

Уразаков К.Р., Мухин И.А., Вахитова Р.И. Моделирование характеристик струйного насоса ..... 41

Бочкарев А.В., Бородин О.А., Петунин Ю.П. Линейный электродвигатель мехатронного токарного модуля ..... 51

Шапиро С.В., Саенко А.Г. Анализ электрического поля озонатора с бегущим барьерным разрядом в цилиндрической системе координат ..... 58

### Информационные комплексы и системы

Жалбеков И.М., Перш Я., Крымский В.Г. Принципы определения ориентации автономных мобильных объектов с использованием визуальной информации ..... 65

Кучеров Б.А. Анализ проектных решений для автоматизированной системы распределения средств управления космическими аппаратами ..... 73

Павлова А.С. Состояние и перспективы развития САПР в России для технологических объектов, имеющих многосвязную структуру ..... 80

Нурисламова Л.Ф., Губайдуллин И.М., Сафин Р.Р. Применение метода анализа чувствительности для построения кинетической модели химической реакции ..... 87

Козловский В.Н., Антипов Д.В., Панюков Д.И. Информационный комплекс и система определения ключевых проблем качества автомобилей ..... 93

### Метрология и информационно-измерительные устройства

Грахов П.А., Федин А.В., Ясовеев В.Х. Характеристики устройств угловых перемещений на основе магнитоэлектрических пластин при действии предварительных упругих напряжений ..... 107

Ураксева М.А., Закурдаева Т.А. Принципы построения и конструирования электрооптических измерительных систем ..... 115

### Нанoeлектроника и квантовые информационные системы

Долматов М.Ю. Феноменологическая модель суперфункционала энергетических состояний и его приложение в электронике и термодинамике ..... 125

Об авторах ..... 134

Список статей, изданных в 2015 году ..... 139

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

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

Access and subscription to the electronic version of the journal is available on the website www.ugues.ru.

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

© Ufa State University of Economics and Service, 2015

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

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

Signed for printing 27.11.2015. Format 60×80 1/8. Offset printing. 8,4 printed pages. Circulation is 1000 copies. Order № 129.

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.

## CONTENT

### Electrical facilities and systems

<i>Dolgicers A., Antonovs D., Kozadajevs Je., Biela-Dailidovicha E.</i> Training facilities in the relay protection laboratory.....	5
<i>Andreeva E.G., Semina I.A., Demin A.V.</i> Modeling of the magnetic field concentrator in the program complex ANSYS Maxwell.....	12
<i>Litvinenko R.S., Idiatullin R.G., Auhadeev A.E.</i> Modeling of electrical failures of the system and its elements at the design stage.....	17
<i>Karabelskaya I.V., Abyzbaev I.I.</i> Methods for calculating electric fields at electrochemical protection of pipelines against corrosion in inhomogeneous media and wedge.....	25
<i>Fetisov V. S., Melnichuk O. V.</i> Electric circuit simulation for smart contact matrix.....	34
<i>Urazakov K.R., Muhin I.A., Vahitova R.I.</i> Modeling the characteristics of jet pump.....	41
<i>Bochkarev A.V., Borodin O.A., Petunin Yu.P.</i> Linear motor of mechatronic lathe module.....	51
<i>Shapiro S.V., Saenko A.G.</i> Analysis of the electric field with a running ozonator barrier discharge in cylindrical coordinates.....	58

### Data processing facilities and systems

<i>Zhalbekov I.M., Perš J., Krymsky V.G.</i> Principles of attitude estimation for autonomous vehicles based on visual data.....	65
<i>Kuchеров B.A.</i> Analysis of design solutions for automated system of allocation control facilities for spacecrafts.....	73
<i>Pavlova A.S.</i> State and development prospects for Russia CAD technological object having a multiply structure.....	80
<i>Nurislamova L.F., Gubaydullin I.M., Safin R.R.</i> Application of sensitivity analysis for construction of chemical reaction kinetic model.....	87
<i>Kozlovskiy V.N., Antipov D.V., Panyukov D.I.</i> Information center and system for determining the quality car key issues.....	93

### Metrology and information-measuring devices

<i>Grakhov P.A., Fedin A.V., Yasoveev V. Kh.</i> Characteristics of angular movement devices on the basis of magnetostriction plates in presence of elastic prestresses.....	107
<i>Urakseev M.A., Zakyraeva T.A.</i> Principles of measurement and construction electro systems.....	115

### Nanoelectronics and quantum data systems

<i>Dolomatov M.Yu.</i> Phenomenological model of energy state superfunctional and its application for electronics and thermodynamics.....	125
---	-----

<b>About the authors</b> .....	134
--------------------------------	-----

<b>List of articles published in 2015</b> .....	139
---	-----

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS



**Долгицер А.  
Dolgicers A.**  
доктор  
технических наук,  
профессор,  
Энергетический  
институт,  
Рижский технический  
университет,  
Латвия, г. Рига



**Антонов Д.  
Antonovs D.**  
доктор  
технических наук,  
научный сотрудник,  
Энергетический  
институт,  
Рижский технический  
университет,  
Латвия, г. Рига



**Козадаев Е.  
Kozadajevs Je**  
магистр,  
научный сотрудник,  
Энергетический  
институт,  
Рижский технический  
университет,  
Латвия, г. Рига



**Биела-Даилдовича Э.  
Biela-Dailidovicha E.**  
магистр,  
аспирант,  
Энергетический  
институт,  
Рижский технический  
университет,  
Латвия, г. Рига

УДК 621.316.925

### УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ В ЛАБОРАТОРИИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Качество квалифицированных специалистов зависит от процесса обучения. Одна из важнейших частей этого процесса – применение теоретических знаний на практике. В современном процессе обучения применяются разнообразные виды программ – симуляторов. Студенты вводят в программу начальные данные; программа решает задачу, выдает ответы, создает диаграммы, но не дает возможность будущим специалистам реально увидеть на практике релейное оборудование и автоматику.

Один из лучших видов обучения – применение специализированных лабораторных стендов и комплексов в учебном процессе. Они вносят разнообразие в практические занятия и лабораторные работы, что оказывает положительное влияние на изучение нового материала и позволяет детальнее изучить микро-процессорные устройства автоматики, защиты и системы управления.

При помощи стенда возможно эффективно работать с виртуальными и реальными объектами и изучать новые технологии. Учебные стенды с комплексными возможностями моделирования объектов – это новый путь в процессе обучения. Реализуется проект по созданию стенда релейной защиты. Главные цели – повысить качество обучения, углубить практические навыки и заинтересовать студентов в освоении нового материала. Для создания нового учебного стенда необходимо обновить лабораторное оборудование. Создаваемый стенд предназначен для исследования направленной токовой защиты нулевой последовательности. С помощью стенда планируется проводить лабораторные работы, в ходе которых студентам будет дана возможность самостоятельно задавать параметры защиты и контролировать развитие событий при различных видах повреждений. Использование программируемого логического контроллера в качестве устройства симулирующего действие релейной защиты позволит студентам самостоятельно разрабатывать и проверять различные алгоритмы работы защит.

*Ключевые слова:* релейная защита, учебный стенд, логически программируемый контроллер

## TRAINING FACILITIES IN THE RELAY PROTECTION LABORATORY

The skills of trained professionals depend on the instruction process. One of the most important parts of this process consists in the application of theoretical knowledge in practice. The modern instruction process employs various types of simulation software. The students input initial data to the programme, which solves the problem, outputs the answers, constructs diagrams, yet it does not allow the future specialists to see protection relays and automation in real life.

One of the best types of instruction is the employment of specialised laboratory stands and complexes in the instruction process. They bring variety to the practical lessons and laboratory work, which has positive influence on the learning of the new material and makes it possible to study microprocessor automation devices, protection devices and control systems with greater detail.

The stand enables efficient work with virtual and real-life objects and studying of new technologies. Learning stands with complex opportunities of modelling objects constitute a new road in the instruction process. A project of a relay protection stand is being implemented. Its main goals are to improve the quality of instruction, to strengthen the practical skills and to arouse students' interest in the studying of the new material. To create a new learning stand, it is necessary to renew laboratory equipment. The new stand is foreseen for studying zero-sequence directional current protection. It is planned that the stand will be involved in laboratory work, during which students will have the opportunity, on their own, to set protection parameters and monitor the development of events in the case of various types of faults. Using a programmable logical controller as the device simulating the operation of the relay protection devices will enable the students to work out and check various protection operation algorithms on their own.

### 1. Введение

Качество квалифицированных специалистов зависит от процесса обучения. Одна из важнейших частей этого процесса – применение теоретических знаний на практике. В современном процессе обучения применяются разнообразные виды программ – симуляторов. Студенты вводят в программу начальные данные; программа решает задачу, выдает ответы, создает диаграммы, но не дает возможность будущим специалистам реально увидеть на практике релейное оборудование и автоматику.

Лучший вид обучения – применение специализированных лабораторных стендов и комплексов в учебном процессе. Они вносят разнообразие в практические занятия и лабораторные работы, что оказывает положительное влияние на изучение нового материала и позволяет детальнее изучить микропроцессорные устройства автоматики, защиты и системы управления.

При помощи стенда возможно эффективно работать с виртуальными и реальными объектами и изучать новые технологии. Учебные стенды с комплексными возможностями моделирования объектов – это новый путь в процессе обучения. Учебные стенды повышают заинтересованность студентов и эффективность обучения.

### 2. История развития учебных стендов

Оснащение учебных лабораторий в историческом развитии существенно изменилось. В начале 50-60 годов активно разрабатывались лабораторные стенды, где использовались реальные элементы, такие как двигатели, электромоторы, аппараты коммуникаций, электромагнитные реле и другие агрегаты. Благодаря этому эффективно повышался уровень практических навыков и знаний студентов. Главным недостатком лабораторного оборудования было то, что оно занимало много места, было сложным по структуре, трудно осматриваемым, не транспортабельным, а его функциональность была ограничена. Из-за больших размеров было невозможно показать общей вид работы автоматики.

В развитии электроники 80х годов на смену старым лабораторным стендам, начали поступать новые, компактные, цифро-аналоговые стенды, которые моделировали процессы, позволяя расширить спектр лабораторных работ и решаемых задач.

В результате, после обучения теории электро-механических приборов на цифро-аналоговых стендах, студенты могли исследовать работу автоматики, защит и влияние каждого отдельного элемента на систему в целом. Главным недостатком этих стендов было то, что алгоритм действия был создан на аппаратном уровне и был константным.

Как следствие, обучаемый фактически мог видеть один или два сценария работы автоматики.

В 90х годах началось быстрое развитие автоматики и защиты на базе микропроцессоров. Это было аналоговое, многофункциональное оборудование для обучения, которое было предназначено для моделирования различных сценариев, и имело адаптивный алгоритм работы. Все вышесказанное свидетельствует о том, что учебное пособие надо усовершенствовать до уровня развития, который соответствует потенциалу новых технологий.

### 3. Производство учебных стендов в наши дни

На сегодняшний день в странах, где высоко развита энергетика, создаются учебные стенды. В качестве примера можно привести немецкую фирму Lucas-Nuelle [2], которая предлагает высококачественные лабораторные стенды в области энергетики, такие как EPH-2 (рис. 1). На данном рисунке показан стенд по изучению солнечной энергии.



Рис. 1. Стенд EPH-2

Этот стенд (инертный многофункциональный лабораторный стенд) разработан для того, чтобы теорию связать с практикой, основываясь на компьютерной базе. Этот стенд позволяет проводить следующие эксперименты:

- проверить лучшее расположение солнечных батарей, их фиксацию и запись параметров;
- исследовать влияние теней, различные соединения солнечных батарей, монтаж и конфигурацию.

К сожалению, такие стенды очень дорогие и не имеют нужной функциональности, так как в зависимости от специфики учебного заведения выдвигаются разнообразные требования.

### 4. Компьютерное моделирование

Компьютерное моделирование – это процесс создания существующей или возможной логически-математической модели. Компьютерное моделирование включает в себя несколько стадий: создание модели, планирование и реализацию сценариев в экспериментах. Моделирование – это имитация реальной системы. В результате имитации получается система, которая может быть недоступна в реальной жизни или спектр влияний на нее будет недопустим.

Во многих инженерно-научных дисциплинах (особенно в автоматике) моделирование машин давно используются как неотъемлемая часть учебного процесса. В релейной защите и автоматике оценка состояния системы, как и задание рабочих уставок не обходится без моделирования. Неотъемлемая часть моделирования – ограничение ресурсов, что приводит к тому, что модель только частично отображает реальность.

Так как модель – это приближение к системе, она является абстрактным отображением. Создавая абстрактную модель, необходимо понимать конечные цели для чего создается модель.

Принимая решение о важности элемента в системе и о его включении в модель, надо учитывать цель создания модели. Качество моделирования зависит от того, насколько правильно выбраны ключевые элементы и организована связь между ними.

Моделирование обеспечивает необходимую эластичность для реализации детализированной и комплексной модели устройств. В одной модели могут быть использованы различные компоненты с высокой степенью детализации. Моделирование допускает интерактивную модель устройства от простого к сложному, проверяя и постепенно включая в модель новые элементы.

В реализации учебного стенда эффективней всего использовать смешанные непрерывные дискретные модели, в которых изменения могут меняться как дискретно, так и непрерывно. Поведение системы моделируется, суммируя непрерывные переменные с малыми дискретными интервалами времени и повторяющиеся временные величины, которые изменяется только в результате событий. С одной стороны, они лучше всего годны для компьютерной реализации. С другой стороны, они соответствуют реальным процессам, которые по своей сути являются аналоговыми процессами.

Смешанное моделирование рассматривает два основных параметра – время события и состояния события. К первому типу принадлежат такие



такие как Siemens или General Electric, позволяют с помощью FBD создать пользовательский алгоритм работы, который адаптирует данное устройство для работы. Использование FBD позволяет расширить возможности учебного стенда, дает студентам не только готовые алгоритмы, но и позволяет создавать их самим, а также проверять их в реальном времени, так как загрузка программы занимает только несколько минут.

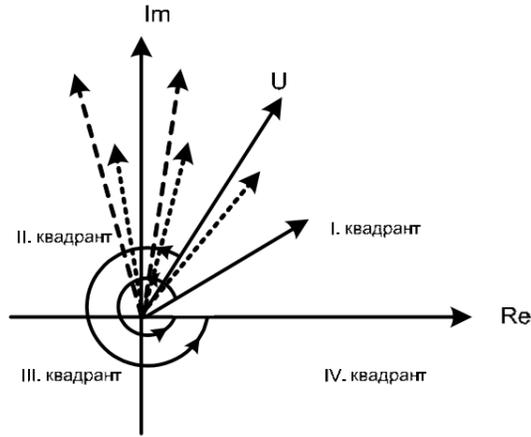


Рис. 7. Поворот вектора

Дополнительно к блокам защиты и моделирования сети, в стенде имеется блок индикации, который позволяет проследить изменения значений токов нулевой последовательности, положения реле и выключателей мощности.

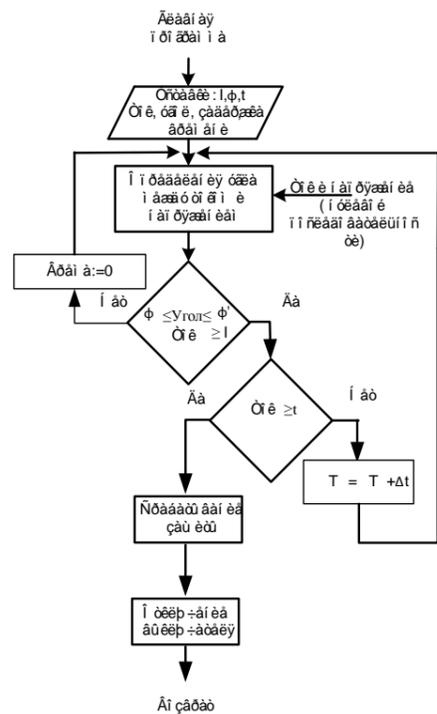


Рис. 8. Предложенный алгоритм работы защиты

Для этого используется специальная 4 битовая передача данных (рис. 9).

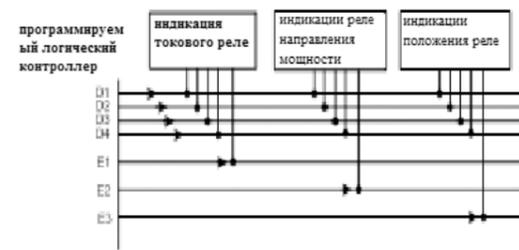


Рис. 9. Организация данных при помощи системы шин

Главная 4-х битовая шина, по которой подается сигнал ко всем индикаторам реле, и сигналы разрешения, которые подаются отдельно к каждому индикатору реле. Сигналы разрешения показывают к какому индикатору реле относится информация, которая идет по шине и разрешает или блокирует прием сигнала.

Для связи пользователя с PLC используем сенсорную панель. С панели вводятся параметры моделируемой схемы.



Рис. 10. Контроль состояния выключателя

На панели отображаются исходные данные, такие как напряжение, положения выключателей мощности и состояния реле. Рис. 10 показывает закладку в меню, которая отображает состояние выключателей мощности силового трансформаторов 1 и 2, как и напряжение на шинах 1 и 2 (рис. 3).

**7. Методика расчета параметров**

Во время лабораторных работ студентам самим нужно рассчитать все данные и загрузить их в учебный стенд, чтобы потом оценить работу защиты.

Алгоритм расчета уставок следующий: ток срабатывания токового блока определяется из условия надежного срабатывания в случае повреждения в конце следующей линии и отстройки от тока небаланса. По первому определению  $I_{nostrades} = 0,9 \cdot 3 I_{0k.min}$

а после второй  $I_{nostrades} = 1.1 \cdot I_{nebalances.max}$ , где  $I_{nb} = k_{idn} f_1^3 I_k^3$ , где  $k_{idn}$  в зависимости от параметров и мощности тока трансформатора выбирают от 0.5-1;  $f_1$  – ошибка трансформаторов тока, (принята 0,1).  $I_k^3$  – это максимальное значение тока 3-х фазного замы-

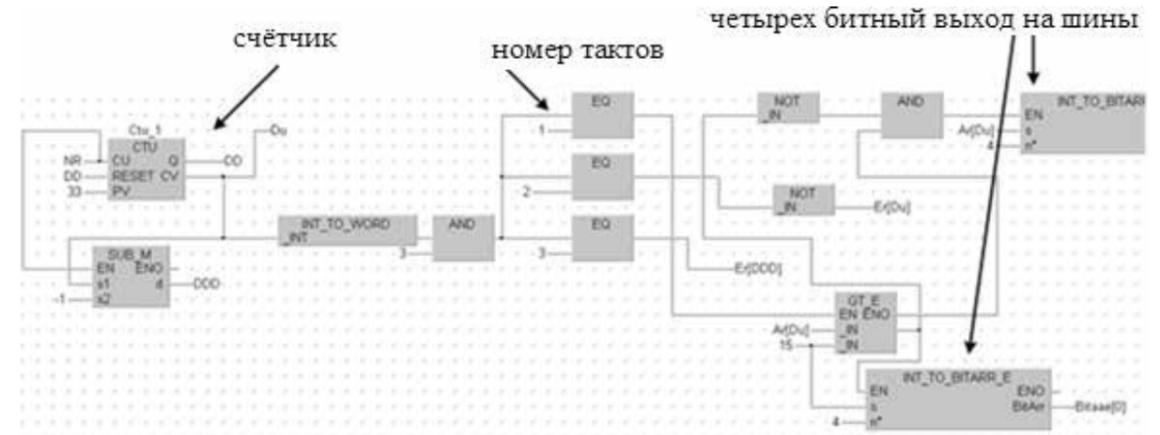


Рис. 11. Часть блока защиты, реализованная на языке FBD

кания на следующей линии. Проверка чувствительности реализуется как  $k_j = 3 I_{0min} / I_{nostrade}$ , где  $I_0$  – это минимальный ток нулевой последовательности при однофазном или двухфазном замыкании в конце второй линии. Надежность считается достаточной при  $k_j \geq 1,5$ .

Задержку времени направленной токовой защиты выбирают по принципу, что каждая защита отстраивается от близлежащей защиты, действующей в том же направлении.

Угол максимальной чувствительности для органа направления мощности принимает в соответствии с углом линии 110 кВ, что соответствует 70 градусам (рис. 12).

Все алгоритмы в учебном стенде используют идеальные сигналы, поэтому введение эффекта гистерезиса в органы тока не нужно, поэтому коэффициент возврата принимается равным 1.

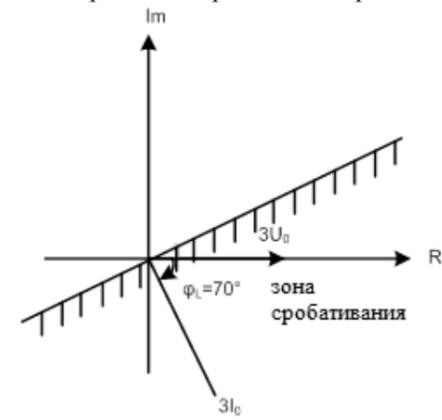


Рис. 12. Зона срабатывания блока направления мощности

**8. Применение стенда**

Во время лабораторных работ студентам необходимо:

- задать параметры линий, трансформаторов, нагрузок;
- рассчитать уставки защит;
- загрузить их в учебные стенд.

Следующий шаг – проверка данных, проводя несколько испытаний при различных конфигурациях сети. Необходимо убедиться, что защита работает корректно во всех режимах.

**9. Выводы**

Предложенный учебный стенд экономически выгоден и широко применяется в учебном процессе для повышения качества учебного процесса. С небольшими финансовыми затратами, используя знания, практические навыки и опыт, создан стенд, у которого нет аналогов среди известных фирм производителей.

Лабораторный стенд – это ручная работа и его можно совершенствовать и дорабатывать, а также применять соответственно нуждам потребителей. Именно поэтому данный стенд имеет ценность.

Со временем планируется интегрировать стенд в процесс обучения, проверить и доказать его эффективность.

*Список литературы*

1. Papkovs B. Elektromagnētiskie pārejas procesi elektriskās sistēmas [Text] / B. Papkovs, I.Zicmane. – Rīga : RTU Izdevniecība, 2007. – 307 p.

2. Electrical Power engineering [Text]. – Lucas-Nulle, 2009.

3. *Salvandy Gabriel*. Fear Factors [Text] / Gabriel Salvandy. – Purdue University, 1991.

4. *Graybeal W.J.* Simulations: principles and methods [Text] / W. J Graybeal, U.V. Pooch. – Cambridge, MA: Winthrop, 1980. – 249 p.

5. *Russell E.S.* Building simulation models [Text] / E.S. Russell. – Los Angeles, CA, 1983.

6. Series Melsec FX3U manual [Text]. – Mitsubishi Electric, 2009.

7. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники [Text] / Л.А. Бессонов. – Москва, 1996. – 638 с.

8. *Чернобровов Н.В.* Релейная защита [Текст] / Н.В. Чернобровов. – М., Энергия, 1971. – 624 с.

#### References

1. *Papkovs B.* Elektromagnētiskie pārejas procesi elektriskās sistēmas [Text] / B. Papkovs, I.Zicmane. – Rīga : RTU Izdevniecība, 2007. – 307 p.

2. Electrical Power engineering [Text]. – Lucas-Nulle, 2009.

3. *Salvandy Gabriel*. Fear Factors [Text] / Gabriel Salvandy. – Purdue University, 1991.

4. *Graybeal W.J.* Simulations: principles and methods [Text] / W.J Graybeal, U.V. Pooch. – Cambridge, MA: Winthrop, 1980. – 249 p.

5. *Russell E.S.* Building simulation models [Text] / E.S. Russell. – Los Angeles, CA, 1983.

6. Series Melsec FX3U manual [Text]. – Mitsubishi Electric, 2009.

7. *Bessonov L.A.* Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki [Text] / L.A. Bessonov. – Moskva, 1996. – 638 p.

8. *Chernobrovov N. V.* Relejnaja zashhita [Text] / N.V. Chernobrovov. – М., Jenergija, 1971. – 624 p.



**Андреева Е.Г.**  
**Andreeva E.G.**

доктор технических наук,  
профессор кафедры «Электрическая техника»,  
ФГБОУ ВО  
«Омский государственный  
технический университет»,  
Россия, г. Омск



**Семина И.А.**  
**Semina I.A.**

старший преподаватель  
кафедры «Электрическая  
техника», ФГБОУ ВО «Омский  
государственный технический  
университет»,  
Россия, г. Омск.



**Демин А.В.**  
**Demin A.V.**

аспирант кафедры  
«Электрическая техника»,  
ФГБОУ ВО  
«Омский государственный  
технический университет»,  
Россия, г. Омск

УДК 621.313.2:537.6/8

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАТОРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ В КОМПЛЕКСЕ ПРОГРАММ ANSYS MAXWELL

Программа ANSYS Maxwell – программа комплексного моделирования электромагнитного поля при разработке и анализе 3D/2D-систем, таких как двигатели, приводы, трансформаторы и другие электрические и электромеханические устройств том числе магнитные системы открытого типа, использующие

еся в автомобильных, оборонных, авиационных, промышленных, нефтеперерабатывающих, медицинских устройствах. Работа Maxwell основана на методе конечных элементов, программа может проводить расчет статических электрических полей, электромагнитных и электрических полей, изменяющихся по частоте и по времени. ANSYS Maxwell может применяться для создания мощного потока данных системного уровня, основанных на электромагнитных характеристиках. Такой поток данных позволяет пользователям объединять сложные схемы и точные модели компонентов для разработки высокопроизводительных электромеханических и силовых систем. Это позволяет изучать различные физические параметры, подключая к процессу тепловой и конструкционный решатели.

В состав ANSYS Maxwell входит переходный решатель, электромагнитный решатель для переменного тока, электростатический и магнитостатический решатели, электрический решатель для переходных процессов. Эти решатели позволяют точно рассчитывать силу, момент, емкость, индуктивность, сопротивление, а также создавать модели в пространстве состояний. ANSYS Maxwell использует методику автоматической адаптивной генерации сетки. Такой устойчивый алгоритм автоматически создает и сгущает конечно-элементную сетку по мере выполнения расчетов. Это позволяет ускорить процесс получения решения и делает данное программное обеспечение простым в использовании. Для выполнения расчетов сложных устройств Maxwell может привлекать доступные вычислительные мощности для выполнения параллельных расчетов. Программы RMXprt (разработка электрических механизмов) и PEXprt (разработка магнитных компонентов) используются для разработки устройств, основываясь на традиционном аналитическом подходе. Они могут быть связаны с ANSYS Maxwell для автоматического создания моделей и выполнения анализа. Пользователи могут предварительно изучить концепции моделей до выполнения строгого электромагнитного анализа в ANSYS Maxwell.

*Ключевые слова:* имитационное моделирование, имитационная модель, система моделирования, ANSYS Maxwell, краевая задача, магнитные системы открытого типа, математические модели, магнитное поле, магнитная индукция, уравнение Лапласа-Пуансона [6].

## MODELING OF THE MAGNETIC FIELD CONCENTRATOR IN THE PROGRAM COMPLEX ANSYS MAXWELL

The ANSYS program Maxwell program integrated modeling of the electromagnetic field in the development and analysis of 3D/2D systems, such as motors, actuators, transformers and other electrical and Electromechanical devices including magnetic system of the open type, which are used in the automotive, defense, aerospace, industrial, medical devices. Maxwell is based on the finite element method; the program can perform the calculation of static electric fields, electromagnetic and electric fields varying in frequency and time. ANSYS Maxwell can be dynamically associated with Simplorer to create powerful data flow system-level based on the electromagnetic characteristics. This data flow allows users to combine complex schemes and accurate component models for the development of high-performance Electromechanical and power systems. This allows us to study various physical parameters, connecting to the process of thermal and structural solvers.

Part ANSYS Maxwell is the transient solver, electromagnetic solver for AC, electrostatic and magneto static solvers, electrical solver for transient processes. These solvers allow you to precisely calculate the force, torque, capacitance, inductance, resistance, impedance, and to create a model in the state space. ANSYS Maxwell uses the technique of automatic adaptive mesh generation. This robust algorithm automatically creates and concentrates, of course, the finite element mesh as perform calculations. This allows you to speed up the process of receiving the decision and makes the software easy to use. Dynamic link with Simplorer program for simulation of multidisciplinary systems allows you to combine a model of precision components circuits and system architecture to create a powerful flow of electromagnetic data. For calculation of complex devices Maxwell can bring affordable computing power to perform parallel calculations. Program RMXprt (development of electric mechanisms) and PEXprt (development of magnetic components) are used to develop devices based on traditional analytical approach. They can be linked with ANSYS Maxwell to automatically create models and perform analysis. Users can restudy concept models to perform rigorous electromagnetic analysis in ANSYS Maxwell.

*Keywords:* simulation, simulation model, system modeling, ANSYS Maxwell, boundary value problem, the magnetic system of the open type, mathematical models, the magnetic field, the magnetic induction, the equation Laplace Poisson [6].

В настоящее время концентраторы магнитного поля используются в области физики, в частности в устройствах повышения магнитной индукции и напряженности внешнего магнитного поля, для повышения октанового числа нефтепродуктов, улучшения качества нефти, экологической очистки и консервации продуктов питания, повышения качества табачных изделий, экологической очистки окружающей среды [2].

Наиболее современное программное обеспечение для исследования магнитных полей трехмерных моделей концентраторов – комплекс программ ANSYS Maxwell.

Чертеж концентратора магнитного поля представлен на рисунке 1. При моделировании трехмерных моделей концентраторов приняты основные допущения [5]:

- относительная магнитная проницаемость стали является величиной постоянной;
- с учетом геометрии магнитной системы поле считается трехмерным;
- плотность тока в сечении обмотки распределяется равномерно.

Исходные уравнения магнитостатического поля:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}, \quad (1)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0, \quad (2)$$

$$\vec{H} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad (3)$$

где  $\vec{H}$  – вектор напряженности магнитного поля,  $\vec{B}$  – вектор магнитной индукции,  $\vec{J}$  – вектор плотности тока,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала,  $\mu_0$  – магнитная постоянная [1,5].

Для линейных и изотропных сред ( $\mu = \text{const}$ ) уравнения (1)-(3) с учетом выражений  $\text{rot } \vec{A} = \vec{B}$  и  $\text{div } \vec{A} = 0$  преобразуются к уравнению Лапласа-Пуассона относительно магнитного векторного потенциала  $\vec{A}$

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = -\mu_0 \vec{J} \quad (4)$$

В трехмерной системе координат (xyz) магнитное поле имеет три составляющих вектора магнитного потенциала  $A = A_x, A = A_y, A = A_z$  [1, 2], и уравнение (4) примет вид системы уравнений [5].

Модель дополняется нулевыми граничными условиями [2, 3, 5].

Решение системы уравнений [5] получено с помощью пакета в комплексе программ ANSYS Maxwell 3D. В ходе решения построены: картина магнитного поля концентратора (рис. 2) и график составляющей магнитной индукции трехмерной модели в зависимости от расстояния до насадки по контуру (рис. 3,4) [2, 4].

Картина магнитного поля концентратора с седловидной насадкой, а также распределение модуля вектора магнитной индукции в пакете ANSYS Maxwell 3D [2, 4] приведены на рисунке 2.

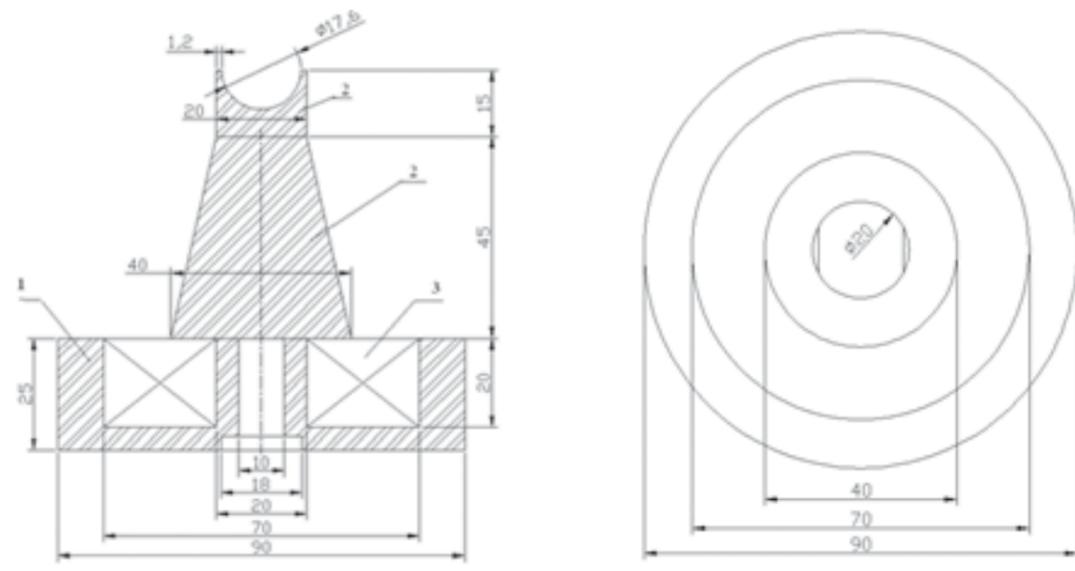


Рис. 1. Чертеж концентратора: 1-магнитопровод, 2 – насадка-концентратор,3-обмотка

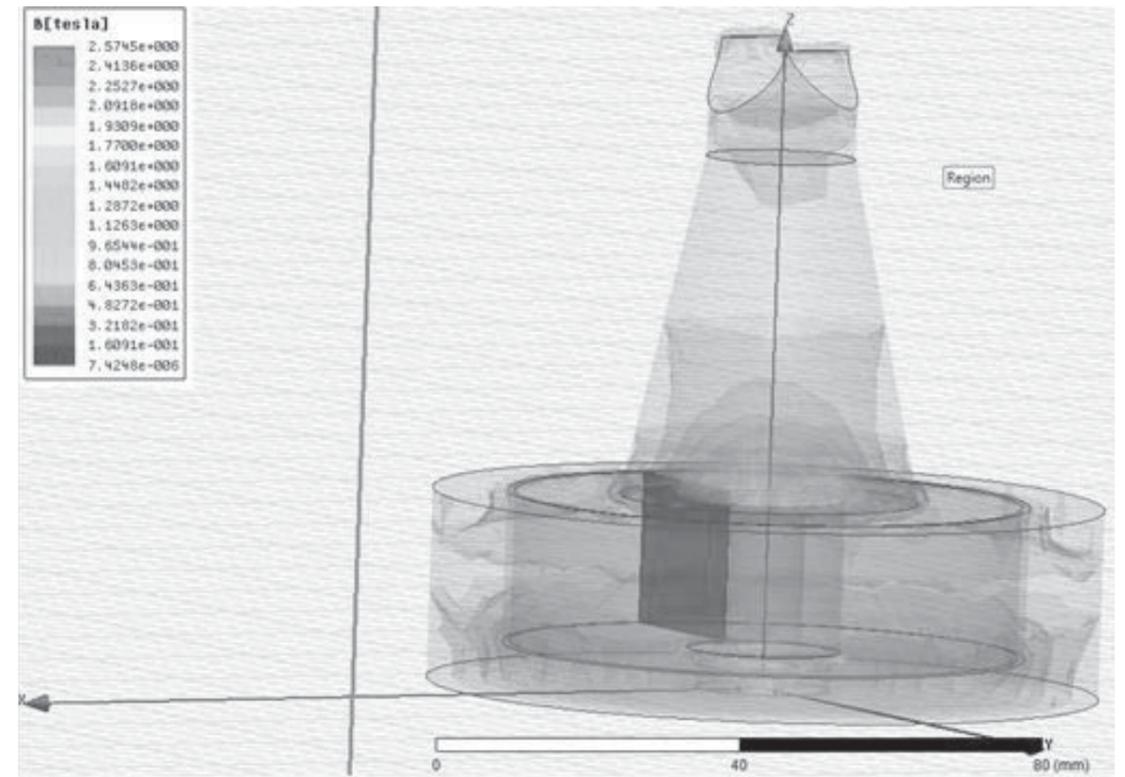


Рис. 2. Картина магнитного поля концентратора, полученная при расчетах в пакете ANSYS Maxwell 3D

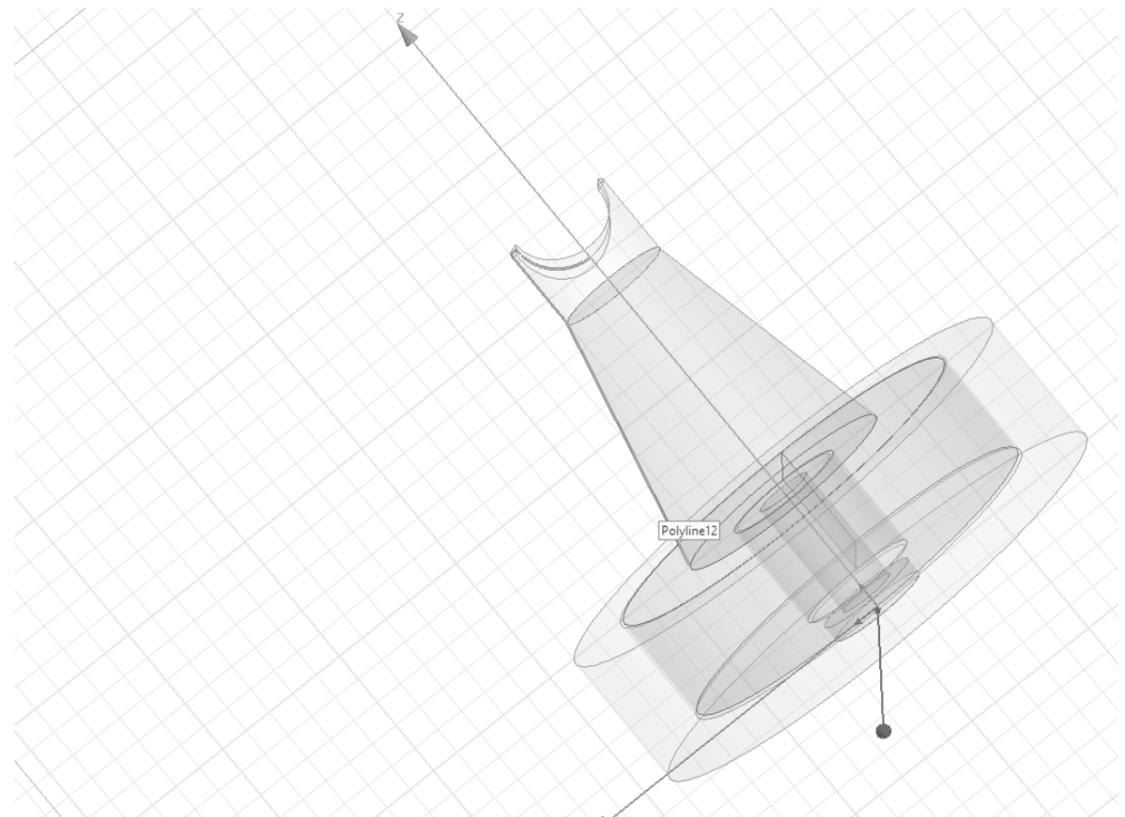


Рис.3. Контур для построения графика магнитной индукции B концентратора магнитного поля

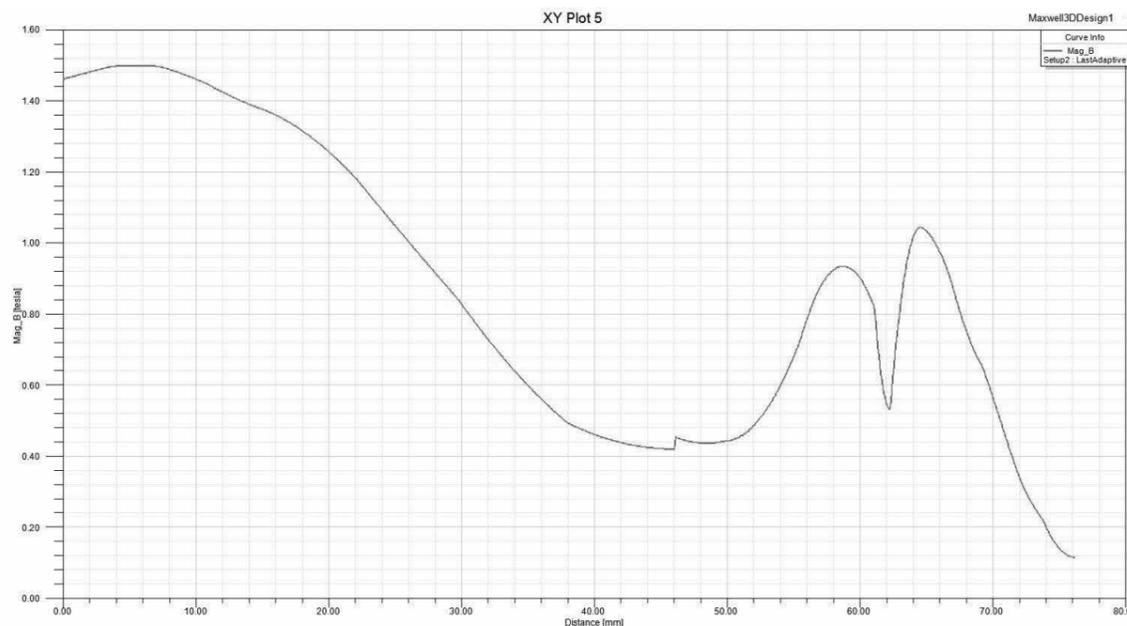


Рис. 4. График магнитной индукции В концентратора магнитного поля по заданному контуру в пакете ANSYS Maxwell 3D

Анализ результатов расчета концентратора позволяет сделать следующие выводы:

1. Насадка-концентратор позволяет усилить магнитное поле в заданной области на удалении от обмотки возбуждения 60 мм.
2. По результатам расчета в ANSYS Maxwell 3D трехмерной модели концентратора магнитного поля значение магнитной индукции составляет  $B=1,126$  Тл.
3. Пакет ANSYS Maxwell 3D позволяет получать решения трехмерных задач.

Список литературы

1. Андреева Е.Г. Конечно-элементный анализ стационарных магнитных полей с помощью программного пакета ANSYS: учеб. пособие [Текст] / Е. Г. Андреева, С. П. Шапец, Д. В. Колмогоров – Омск: Изд-во ОмГТУ 2002.- 92 с.
2. Ковалев Ю.З. Расчет электротехнических устройств с использованием программного пакета ANSYS: учеб. пособие [Текст] / Ю.З. Ковалев, Е. Г. Андреева, А.А. Татевосян, Д. В. Колмогоров, И.А. Семина – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. – 84 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле [Текст] / Л. А. Бессонов. – М. :Высш. школа, 2001. – 231 с.
4. Бинс К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей [Текст] / К. Бинс, П. Лауренсон ; пер. с англ. – М. : Энергия, 1970. – 376 с.

5. Семина И.А. Имитационное моделирование трехмерной модели магнитной системы открытого типа в комплексе программ ANSYS [Текст] / И.А. Семина // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014– т. 10. – № 1. С 32-36.

6. Группа компаний «ПЛМ Урал» – «Делкам-Урал» – Единый центр поддержки продуктов ANSYS в России и странах СНГ [Электронный ресурс].

7. Assous F. Theoretical tools to solve the axisymmetric Maxwell equations. [Text] / F. Assous, C. (Jr.) Ciarlet, S Labrunie // Math. Meth. Appl. Sci. – 2002. – 25. – pp. 49-78.

References

1. Andreeva E.G. Konechno-jelementnyj analiz stacionarnyh magnitnyh polej s pomoshh'ju programmno-go paketa ANSYS: ucheb.posobie [Tekst]/ E. G. Andreeva, S. P. Shamec, D. V. Kolmogorov – Omsk: Izd-vo OmGTU 2002. – 92 p.
2. Kovalev Ju.Z. Raschet jelektrotehnicheskikh ustrojstv s ispol'zovaniem programmno-go paketa ANSYS: ucheb.posobie [Tekst]/ Ju.Z. Kovalev, E. G. Andreeva, A.A. Tatevosjan, D. V. Kolmogorov, I.A. Semina – Omsk : Izd-vo OmGTU, 2013. – 84 p.
3. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki: Jelektromagnitnoe pole [Tekst]/ L. A. Bessonov. – M. :Vyssh. shkola, 2001. – 231 p.
4. Bins K. Analiz i raschet jelektricheskikh i magnitnyh polej [Tekst]/ K. Bins, P. Laurenson ; per. s angl. – M. : Jenergija, 1970. – 376 p.

5. Semina I.A. Imitacionnoe modelirovanie trehmernoj modeli magnitnoj sistemy otkrytogo tipa v komplekse programm ANSYS [Tekst] / I.A. Semina // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2014– т. 10. – №1. p 32-36.

6. Gruppy kompanij «PLM Ural» – «Delkam-Ural»

– Edinyj centr podderzhki produktov ANSYS v Rossii i stranah SNG [Jelektronnyj resurs].

7. Assous F. Theoretical tools to solve the axisymmetric Maxwell equations. [Text]/ F. Assous, C. (Jr.) Ciarlet, S Labrunie // Math. Meth. Appl. Sci. – 2002. – 25. – p. 49-78.



**Литвиненко Р.С.**  
**Litvinenko R.S.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Электротехнические  
комплексы и системы»,  
ФГБОУ ВО  
«Казанский государственный  
энергетический  
университет»,  
Россия, г. Казань.



**Идиятуллин Р.Г.**  
**Idiatullin R.G.**

доктор технических наук,  
профессор кафедры  
«Электротехнические  
комплексы и системы»,  
ФГБОУ ВО  
«Казанский государственный  
энергетический  
университет»,  
Россия, г. Казань.



**Аухадеев А.Э.**  
**Auhadeev A.E.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Электротехнические  
комплексы и системы»,  
ФГБОУ ВО  
«Казанский государственный  
энергетический  
университет»,  
Россия, г. Казань.

УДК 519.876.5

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА И ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ**

В статье рассматривается имитационная модель процесса функционирования электротехнического комплекса, в состав которого входит большое количество элементов (сборочных единиц) различных типов, с целью определения его надежности на ранних этапах разработки. Для этапа разработки сложной технической системы, какой является создаваемый электротехнический комплекс, характерна ситуация когда информация о надежности его элементов либо отсутствует полностью, либо весь ограничена. Поэтому определение уровня надежности всего комплекса в условиях ограниченной информации является актуальной научной задачей, решение которой возможно с использованием инструментов имитационного моделирования.

Система исходных данных для проведения моделирования включает в себя информацию о составе электротехнического комплекса и статистическую информацию о надежности различных типов элементов (электрических, механических, гидравлических и др.), полученную в результате анализа данных об эксплуатации прототипов или аналогов. В качестве случайных величин, которые формируются с использованием генератора случайных чисел, в имитационной модели выступают наработка на отказ и наработка между отказами элементов (сборочных единиц).

Результатами моделирования, полученными экспериментальным путем, могут быть, как единичные, так и комплексные показатели надежности, как отдельных групп элементов, так и всего комплекса в целом. Это позволяет в случае необходимости выявить наименее надежные элементы (сборочные единицы) в составе комплекса, и после принятия мер по повышению уровня их надежности продолжить исследование.

Теоретическая ценность обусловлена возможностью реализации предложенной имитационной модели в виде программы оценки надежности создаваемого электротехнического комплекса, и последующего анализа влияния достигнутого уровня надежности на эффективность и качество функционирования.

Практическая новизна заключается в возможности определения показателей надежности электротехнического комплекса в условиях ограниченной исходной информации о надежности его элементов (сборочных единиц), характерных для ранних этапов разработки.

**Ключевые слова:** комплекс, элемент, надежность, время, моделирование, наработка, отказ, интенсивность, блок, интервал.

### MODELING OF ELECTRICAL FAILURES OF THE SYSTEM AND ITS ELEMENTS AT THE DESIGN STAGE

The article describes simulation model of the operation process of the electrical engineering system that includes a large number of elements (assembly units) of various types, with purpose of reliability assessment in the early stages of development. The development phase of a complex technical system, which is the implemented electrical engineering system, is characterized with very limited or completely missing information about the reliability of its elements. Therefore, the reliability assessment of the entire complex in the conditions of limited information is a topical scientific task that can be solved with the use of simulation modeling tools.

The input data system for the modeling includes information about the composition of electrical engineering system and statistical information about the reliability of the different element types (electrical, mechanical, hydraulic, etc. ), received during data analysis of prototypes or analogs operation. Random variables are formed using random number generator. Random variables in the simulation model are the operating time to failure and operating time between failures of elements (assembly units).

The simulation modeling results obtained during experiments can be simple or integrated reliability measures, as separate groups of elements, and the entire complex as a whole. It allows, if necessary, to identify the least reliable elements (assembly units) in the complex, and after taking measures to improve its reliability, to continue the research.

The theoretical value is in opportunity to implement the proposed simulation model by means of the reliability assessment program of implemented electrical engineering system, and subsequent analysis of the impact of the achieved level of reliability on the efficiency and quality of operations.

The practical novelty is in possibility to determine the reliability measures of electrical engineering system with limited initial information about the reliability of its elements ( assembly units ), typical in the early stages of development.

**Keywords:** complex, element, dependability, time, simulation, operating time, failure, failure rate, block, interval.

Надежность современных электротехнических комплексов (ЭТК) является важной составляющей их качества и необходимым условием обеспечения эффективности функционирования. Научно-обоснованный анализ надежности и эффективности ЭТК предусмотрен требованиями государственных и международных стандартов. Такой анализ необходим практически на всех этапах жизненного цикла комплекса и прежде, всего важен на стадии проектирования. Главной конечной целью анализа является своевременное получение достоверной информации,

необходимой для выработки и реализации обоснованных решений в области обеспечения надежности ЭТК.

В основе научного анализа надежности элементов ЭТК лежат математические модели. С их помощью осуществляется обоснование и оценка показателей надежности, решаются задачи оптимизации, синтеза, выработки и обоснования решений. От обеспечения возможности достаточно точно и оперативно решать указанные задачи непосредственно зависит эффективность разрабатываемого ЭТК.

Одним из наиболее удобных инструментов моделирования различных процессов на этапе разработки является имитационное моделирование. Имитационное моделирование основано на воспроизведении с помощью программных средств развернутого во времени процесса функционирования комплекса с учетом его взаимодействия с внешней средой. Основой любой имитационной модели является: разработка модели исследуемого комплекса на основе частных имитационных моделей подсистем, объединенных в единое целое; выбор информативных характеристик объекта исследования, способов их получения и анализа;

построение модели взаимодействия объекта с внешней средой в виде имитационных моделей воздействующих факторов; выбор способа исследования имитационной модели в соответствии с методами планирования имитационных экспериментов.

Прежде чем, перейти к рассмотрению вопросов надежности, необходимо, дать определение самому понятию электротехнический комплекс. В соответствии с [1] можно в составе ЭТК выделить следующие разновидности компонентов, представленные на рис.1.

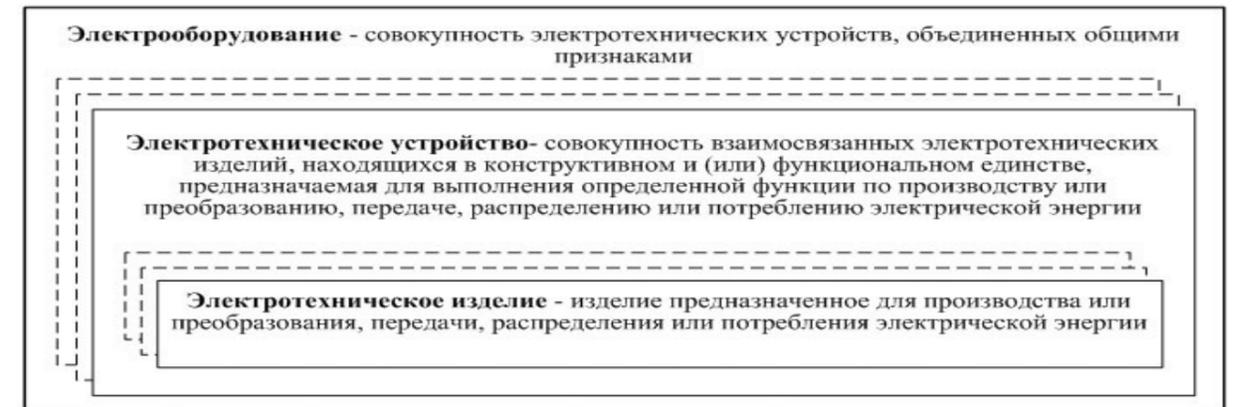


Рис. 1 – Элементная база электротехнического комплекса

Таким образом, электротехническое изделие будет соответствовать – элементу, устройство – сборочной единице (СЕ), а электрооборудование в целом – электротехническому комплексу, под которым будем понимать – совокупность электротехнических устройств в составе технической системы, предназначенных для производства или потребления электрической энергии. Элемент – наименьший компонент системы, не подлежащий дальнейшему делению, и выполняющий определенную функцию.

На рис.2 представлен один из вариантов блок-схемы имитационного моделирования процесса функционирования ЭТК с учетом надежности его элементов [2].

В блоке 1 производится ввод исходных данных для дальнейшего моделирования процесса функционирования ЭТК. Эти данные условно можно разделить на три группы:

*А.) Система исходных данных о составе ЭТК:*

1. Количество типов СЕ и элементов –  $p$  (было принято, что  $p = 1$  соответствует электрическим;

$p = 2$  – механическим;  $p = 3$  – гидравлическим СЕ и элементам). Возможно также изменение типов в зависимости от наличия элементов другой физической природы (электронных, электромеханических, механоэлектрических и т.д.). Было бы удобнее не делить элементы на типы, но для последующего анализа результатов проведенного моделирования это необходимо, т.к. позволит сделать вывод о мерах по повышению надежности ЭТК.

2. Количество СЕ  $p$ -го типа в составе ЭТК –  $N^{(p)}$ ; порядковый номер СЕ  $p$ -го типа  $i = 1, N^{(p)}$ .

3. Количество элементов  $p$ -го типа в составе  $i$ -ой СЕ –  $M_i^{(p)}$ ,  $i = 1, N^{(p)}$ ; порядковый номер элемента  $p$ -го типа в составе  $i$ -ой СЕ  $j = 1, M_i^{(p)}$ .

*Б.) Статистические данные о надежности элементов различных типов в составе ЭТК:*

1. Интервальная оценка интенсивности отказов  $j$ -го элемента в составе  $i$ -ой СЕ  $p$ -го типа: верхняя граница –  $\lambda_{i,j}^{(p)g}$ ; нижняя граница –  $\lambda_{i,j}^{(p)h}$ . Данные могут быть получены по результатам эксплуатации, если в составе разрабатываемого ЭТК есть элементы уже используемые в других системах.

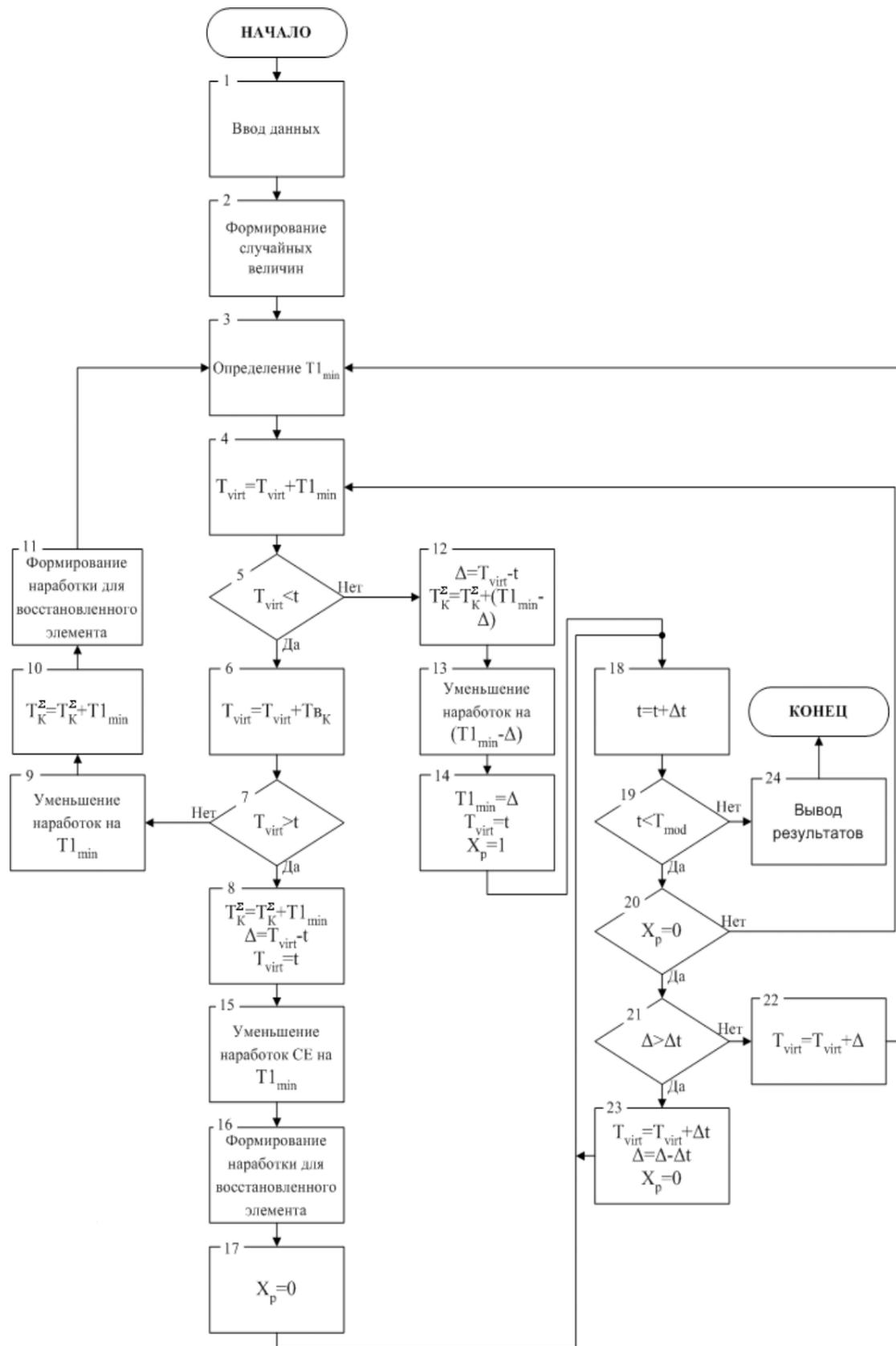


Рис. 2. Блок-схема алгоритма функционирования ЭТК с учетом надежности его элементов

2. Минимальная и максимальная интенсивность отказов элементов  $p$ -го типа –  $\lambda_{min}^{(p)}$  и  $\lambda_{max}^{(p)}$ . Эти оценки будут использованы для формирования показателей надежности тех элементов, которые являются абсолютно новыми и не имеют аналогов (прототипов).

3. Время восстановления  $j$ -го элемента в составе  $i$ -ой СЕ  $p$ -го типа  $T_{B_{i,j}}^{(p)}$ . Предполагается, что, все элементы являются восстанавливаемыми в связи с тем, что даже для невозстанавливаемых и отказавших элементов предусматривается агрегатный способ ремонта, когда неисправный элемент заменяется на новый либо заведомо исправный.

В.) Модельные данные

1. Время моделирования  $T_{mod}$ . Время моделирования позволяет задать интересующую разработчика продолжительность непрерывной работы ЭТК, с учетом простоев в случае отказа и последующего восстановления неисправного элемента, СЕ.

2. Шаг моделирования  $\Delta t$ . От того, какой длины будет выбран шаг моделирования, будет зависеть детальность и частота просчета модели. Если в качестве шага выбрать один час, то можно получить сложную динамику, ярко демонстрирующую вклад случайных процессов (отказов) на результаты работы модели. Традиционно шаг моделирования выбирается константой, хотя существуют модели, в которых это правило сознательно нарушается.

В зависимости от времени и шага моделирования формируется интервал моделирования – интервал шкалы модельного времени, на котором будет просчитана модель с частотой, равной шагу моделирования. В нашем случае интервал моделирования определяется следующими границами  $[0, T_{mod}]$ .

Блок 2 предназначен для формирования показателей надежности элементов и СЕ, являющихся случайными величинами. Такими показателями являются:

1. Параметр потока отказов  $\lambda_{i,j}^{(p)}$   $j$ -го элемента  $p$ -го типа в составе  $i$ -ой СЕ. Определяется, как равномерно распределенная на интервале  $[\lambda_{i,j}^{(p)\kappa}, \lambda_{i,j}^{(p)\xi}]$  случайная величина

$$\lambda_{i,j}^{(p)} = (\lambda_{i,j}^{(p)\xi} - \lambda_{i,j}^{(p)\kappa}) \xi + \lambda_{i,j}^{(p)\kappa}; i = \overline{1, N^{(p)}}, j = \overline{1, M_i^{(p)}}$$

где  $\xi$  – равномерно распределенная на интервале  $[0, 1]$  случайная величина формируется с использованием генератора случайных чисел [3].

Для элементов, информация о надежности которых отсутствует в связи с тем, что они являются новыми и не имеют аналогов, параметр потока

отказов формируется по следующей формуле в зависимости от типа элемента

$$\lambda_{i,j}^{(p)} = (\lambda_{max}^{(p)} - \lambda_{min}^{(p)}) \xi + \lambda_{min}^{(p)}; i = \overline{1, N^{(p)}}, j = \overline{1, M_i^{(p)}} \quad (1)$$

2. Параметр потока отказов  $\Lambda_i^{(p)}$   $i$ -ой СЕ  $p$ -го типа. Показатель формируется путем сложения параметров потока отказов элементов, входящих в состав, соответствующей СЕ

$$\Lambda_i^{(p)} = \sum_{j \in A_i^{(p)}} \lambda_{i,j}^{(p)}; i = \overline{1, N^{(p)}}, j = \overline{1, M_i^{(p)}}, \quad (2)$$

где  $A_i^{(p)}$  – множество элементов, входящих в состав  $i$ -ой СЕ  $p$ -го типа.

3. Нароботка на отказ  $T1_i^{(p)}$   $i$ -ой СЕ  $p$ -го типа.  $T1_i^{(p)} = \frac{1}{\Lambda_i^{(p)}}; i = \overline{1, N^{(p)}}$  Определяется по формуле

$$T1_{i,j}^{(p)} = \frac{1}{\lambda_{i,j}^{(p)}}; i = \overline{1, N^{(p)}}, j = \overline{1, M_i^{(p)}}.$$

4. Нароботка на отказ  $T1_{i,j}^{(p)}$   $j$ -го элемента  $p$ -го типа в составе  $i$ -ой СЕ.

$$T1_{i,j}^{(p)} = \frac{1}{\lambda_{i,j}^{(p)}}; i = \overline{1, N^{(p)}}, j = \overline{1, M_i^{(p)}} \quad (3)$$

Блок 3 производит сравнение и выбор элемента с наименьшей наработкой на отказ сначала среди электрических, механических и гидравлических агрегатов, а затем определяет элемент, имеющий наименьшую наработку на отказ в СЕ, т.е. элемент, который откажет первым. Так как отказ элемента, а следовательно и СЕ к которой он относится, приведут к отказу всего комплекса, полученная наработка является наработкой на отказ  $T1_{min}$  для разрабатываемого ЭТК.

В блоке 4 формируется виртуальное время с учетом наименьшей наработки между отказами по формуле

$$T_{virt} = T_{virt} + T1_{min}$$

Под виртуальным временем  $T_{virt}$  будем понимать время, которое формируется сложением чередующихся наработок на отказ и времен восстановления ЭТК.

Блок 5 производит сравнение виртуального времени и текущего модельного времени  $t$ , изменяющегося с шагом  $\Delta t$ . Под модельным временем будем понимать «искусственное» время, в котором «живет» модель или другими словами это время, которое является имитацией, прообразом (моделью) времени реального ЭТК. Для того, чтобы вести отсчет модельного времени и обеспечить правильную хронологическую последовательность наступления основных событий, в имитаци-

онной модели используется так называемый таймер модельного времени, который представляет собой переменную  $t$  для хранения (фиксации) текущего значения модельного времени. В процессе моделирования системы, таймер модельного времени постоянно корректируется в соответствии с теми основными событиями, которые возникают в реальном ЭТК. В предложенной имитационной модели коррекция модельного времени осуществляется с постоянным шагом  $\Delta t$ .

Если виртуальное время  $T_{virt}$  меньше модельного времени  $t$ , на данном этапе управление пере-

дается оператору 6, в котором виртуальное время  $T_{virt}$  увеличивается на величину времени восстановления  $T_{B_{i,j}}^{(p)}$  отказавшего элемента, соответствующую времени восстановления  $T_{B_K}$ , ( $T_{B_{i,j}}^{(p)} = T_{B_K}$ ) всего ЭТК. Далее в блоке 7 опять происходит сравнение виртуального  $T_{virt}$  и модельного времени  $t$ .

Дальнейшую работу модели функционирования ЭТК целесообразно рассмотреть с помощью возможных сценариев развития событий в зависимости от величины шага моделирования. Возможные варианты информационных ситуаций приведены на рис. 3, 4.

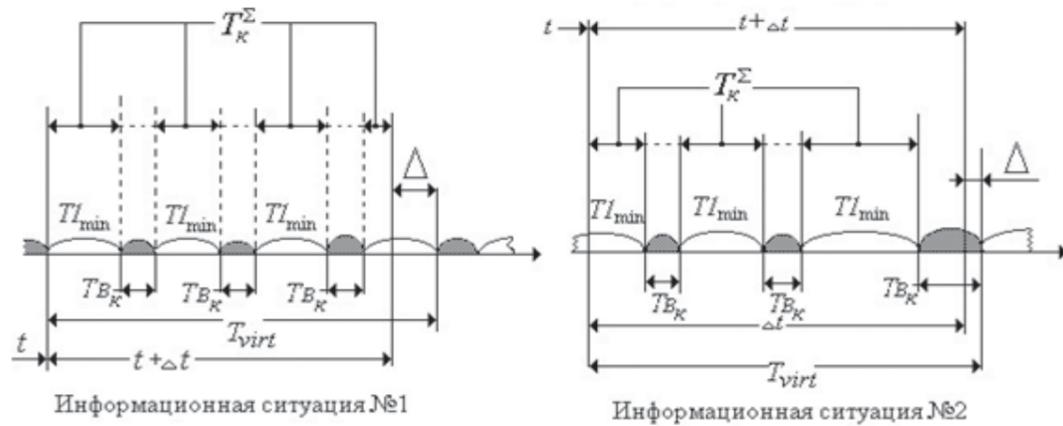


Рис. 3. Информационные ситуации для  $\Delta t \gg T1_{min} (T\epsilon_K)$

Заданный шаг моделирования  $\Delta t$  достаточно большой и вмещает в себя несколько чередующихся периодов работы и восстановления элементов (СЕ) комплекса. Отличие информационной ситуации №1 от №2 заключается в том, что на момент окончания очередного шага моделирования  $\Delta t$ , комплекс продолжает находиться в работоспособном состоянии (информационная ситуация №2 – комплекс продолжает восстановление).

Алгоритм работы модели при возникновении информационной ситуации №1 следующий. Если в блоке 7 сравнение покажет, что виртуальное время меньше модельного  $T_{virt} < t$ , то управление передается блоку 9, в котором корректируются наработки на отказ  $T1_{i,j}^{(p)}$  других элементов ЭТК по формуле

$$T1_{i,j}^{(p)} = T1_{i,j}^{(p)} - T1_{min}; i = \overline{1, N^{(p)}}, j = \overline{1, M_i^{(p)}} \quad (4)$$

Далее в блоке 10 формирует суммарное время работы  $T_K^{\Sigma}$  ЭТК путем суммирования наработок на отказ элементов, проявивших себя (отказавших) в процессе функционирования комплекса. Суммарное время работы  $T_K^{\Sigma}$  необходим для анализа надеж-

ности ЭТК по результатам всего имитационного моделирования [4].

Блок 11 формирует новую наработку на отказ для элемента, заменившего отказавший, по формулам (1-3). Управление переходит к блоку 3 и цикл повторяется, до тех пор пока в блоке сравнения 5 виртуальное время  $T_{virt}$  не превысит модельное  $T$  и управление не перейдет блоку 12, в котором определяется величина  $\Delta$ , характеризующая разницу между виртуальным  $T_{virt}$  и модельным временем  $t$ , и корректируется суммарное время работы  $T_K^{\Sigma}$  ЭТК на данном этапе, по следующим формулам

$$\Delta = T_{virt} - t, \\ T_K^{\Sigma} = T_K^{\Sigma} - (T1_{min} - \Delta).$$

Далее в блоке 13 корректируются наработки на отказ других элементов по формуле

$$T1_{i,j}^{(p)} = T1_{i,j}^{(p)} - (T1_{min} - \Delta); i = \overline{1, N^{(p)}}, j = \overline{1, M_i^{(p)}}.$$

В блоке 14 наименьшая наработка между отказами  $T1_{min}$  приравнивается величине  $\Delta$ , признаку работоспособности  $X_p$  комплекса присваивается

значение 1 (работоспособен), и виртуальное время выравняется с модельным  $T_{virt} = t$ . Далее управление передается блоку 18, в котором модельное время  $t$  увеличивается на шаг моделирования  $\Delta t$  до тех пор пока оно не превысит времени моделирования  $T_{mod}$  и эксперимент закончится.

Порядок работы имитационной модели в случае возникновения информационной ситуации №2 аналогичен ситуации №1 с той разницей, что момент превышения виртуального времени  $T_{virt}$  над модельным временем  $t$  наступает после его увеличения на величину времени восстановления  $T_{B_K}$ , ( $T_{B_K} = T_{B_{i,j}}^{(p)}$ ) отказавшего элемента, а следовательно и ЭТК (блок 6), после чего управление с блока сравнения 7 переходит к блоку 8.

В блоке 8 уточняется суммарное время работы  $T_K^{\Sigma}$  комплекса, и корректируются следующие временные параметры модели: величина  $\Delta$  и виртуальное время  $T_{virt}$

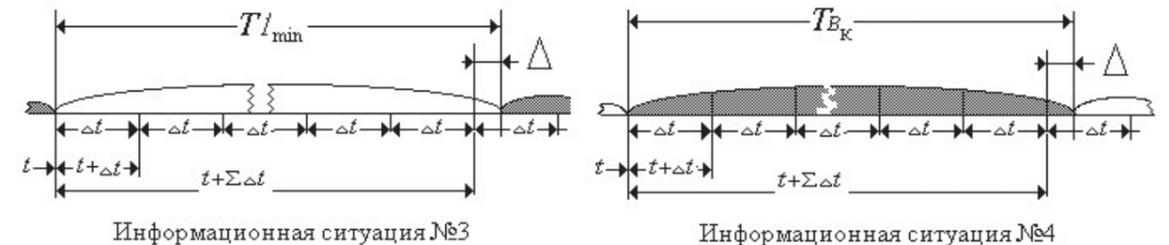


Рис. 4 – Информационные ситуации для  $\Delta t \ll T1_{min} (T\epsilon_K)$

Заданный шаг моделирования  $\Delta t$  достаточно мал и для последовательной корректировки величины времени восстановления  $T_{B_{i,j}}^{(p)}$  (ситуация №3) либо наработки между отказами  $T1_{min}$  (ситуация №4) необходимо несколько итераций (прогонов) модели с пошаговым увеличением модельного времени  $t$  на величину  $\Delta t$ . В этих ситуациях время восстановления  $T_{B_{i,j}}^{(p)}$  либо наработка между отказами  $T1_{min}$  ЭТК последовательно уменьшаются на величину шага моделирования  $\Delta t$ . С этой целью в имитационной модели предусмотрено циклическое и последовательное повторение операций в следующих блоках: для информационной ситуации №3 ( $T1_{min} \gg \Delta t$ ) – 4-5-12-13-14-18-19-20-4; для информационной ситуации №4 ( $T_{B_K} = T_{B_{i,j}}^{(p)} \gg \Delta t$ ) – 18-19-20-21-23-18. Уменьшение величины  $T1_{min}$  будет продолжаться до тех пор, пока в блоке сравнения 5 модельное время  $t$  не превысит виртуальное  $T1_{virt}$  – управление перейдет к блоку 6 (ситуация №3); аналогично корректировка  $T_{B_{i,j}}^{(p)}$  будет проводиться пока в блоке сравнения 21 величина  $\Delta$  будет больше

$$T_K^{\Sigma} = T_K^{\Sigma} + T1_{min}, \\ \Delta = T_{virt} - t, \\ T_{virt} = t.$$

Из блока 8 управление передается на блок 15, который аналогично блоку 9 корректирует наработки элементов по формуле (4). В свою очередь блок 16 аналогично блоку 11 формирует новую наработку на отказ для элемента, заменившего отказавший после восстановления, по формулам (1-3). В блоке 17 признаку  $X_p$  работоспособности ЭТК присваивается значение 0 (комплекс неисправен и находится в процессе восстановления). Далее управление передается блоку сравнения 18 для определения окончания моделирования либо его дальнейшего продолжения.

шага моделирования  $\Delta t$ , после чего управление переходит к блоку 22 (ситуация №4).

Предложенный алгоритм, циклически повторяясь, формирует временные характеристики функционирования ЭТК и его компонентов (суммарное время работы, суммарное время восстановления, наработки на отказ и т.д.) до тех пор, пока модельное время  $t$  с шагом  $\Delta t$  не выйдет за пределы интервала моделирования  $[0, T_{mod}]$ . Когда имитационное моделирование будет закончено, полученные результаты поступят в блок 24. Используя результаты проведенного исследования, разработчик получает возможность провести оценку показателей надежности элементов, СЕ и всего ЭТК в целом [5,6], а также оценить вклад в формирование уровня надежности комплекса элементов и СЕ различных типов.

Основываясь на первичных результатах моделирования, можно принять меры по повышению уровня надежности тех или иных элементов, после чего повторно провести эксперимент. Таким образом, используя предложенную имитационную

модель функционирования ЭТК с учетом надежности его элементов, можно на самых ранних этапах разработки спрогнозировать каким уровнем надежности будет обладать комплекс и как это повлияет на эффективность и качество его использования.

Список литературы

- ГОСТ 18311-80. Изделия электротехнические. Термины и определения основных понятий (с Изменениями N 1, 2) [Текст]. – Москва: Издательство стандартов, 1982. – 18 с.
- Литвиненко Р. С. Построение математических моделей построения надежности сложных технических систем [Текст] / Р.С. Литвиненко, А.А. Волкова, А.С. Ямщиков // Сборник трудов конференции «Наука и образование в жизни современного общества». – Тамбов, 2015. – С.119-120.
- Пат. 38510 Российская Федерация, МПК G06F 7/58. Генератор псевдослучайной последовательности с запрещенными комбинациями [Текст] / А. В. Афонский, В. А. Калистратов, Р. С. Литвиненко и др.; заявитель и патентообладатель Афонский А. В., Калистратов В. А., Литвиненко Р. С. и др. – №2004101929. – заявл. 21.01.2004. – опубл. 20.06.2004. – Бюл.№17. – 2 с.
- Пат. 63949 Российская Федерация, МПК G06F 7/00. Устройство сбалансированного оценивания показателей надежности технической системы на основе объединения двух выборок [Текст] / П.П. Павлов, Р.С. Литвиненко, М.Н. Мубаракшин и др.; заявитель и патентообладатель Павлов П.П. – №2007104528/22. – заявл. 24.01.2007. – опубл.10.06.2007. – Бюл.№16. – 3 с.
- Литвиненко, Р. С. Ускоренное моделирование отказов высоконадежных технических систем [Текст] / Р.С. Литвиненко, А.Р. Хаертдинова, Р.Р. Нурмухаметов // Научный альманах. – 2014. – №1 (1) – С.215-220.

- Филина, О.А. Техническое состояние изделия и его бездемонтажная диагностика [Текст] / О.А. Филина //Наука сегодня: сб.науч.трудов./Научный центр «Диспут». – Вологда, 2014. – С.74.

References

- GOST 18311-80. Izdelija jelectrotehnicheckie. Terminy i opredelenija osnovnyh ponjatij (s Izmenenijami N 1, 2) [Text]. – Moskva: Izdatel'stvo standartov, 1982. – 18 s.
- Litvinenko, R.S. Postroenie matematicheskikh modelej postroenija nadezhnosti slozhnyh tehnicheckih sistem [Text] / R.S. Litvinenko, A.A. Volkova, A.S. Jamshhikov // Sbornik trudov konferencii «Nauka i obrazovanie v zhizni sovremennogo obshhestva». – Tambov, 2015. – S.119-120.
- Pat. 38510 Rossijskaja Federacija, MPK G06F 7/58. Generator psevdosluchajnoj posledovatel'nosti s zapreshhennymi kombinacijami [Text] / A.V. Afonskij, V.A. Kalistratov, R.S. Litvinenko i dr.; zajavitel' i patentoobladatel' Afonskij A.V., Kalistratov V.A., Litvinenko R.S. i dr. – №2004101929. – zajavl. 21.01.2004. – opubl. 20.06.2004. – Bjul.№17. – 2 s.
- Pat. 63949 Rossijskaja Federacija, MPK G06F 7/00. Ustrojstvo sbalansirovannogo ocenivaniya pokazatelej nadezhnosti tehnicheckoj sistemy na osnove ob#edinenija dvuh vyborok [Text] / P.P. Pavlov, R.S. Litvinenko, M.N. Mubarakshin i dr.; zajavitel' i patentoobladatel' Pavlov P.P. – №2007104528/22. – zajavl. 24.01.2007. – opubl.10.06.2007. – Bjul.№16. – 3s.
- Litvinenko, R.S. Uskorennoe modelirovanie otkazov vysokonadezhnyh tehnicheckih sistem [Text] / R.S. Litvinenko, A.R. Haertdinova, R.R. Nurmhametov // Nauchnyj al'manah. – 2014. – №1 (1) – S.215-220.
- Filina O. A. Tehnicheckoe sostojanie izdelija i ego bezdemontazhnaja diagnostika [Text] / O.A. Filina //Nauka segodnja: sb.nauch.trudov./Nauchnyj centr «Disput». – Vologda, 2014. – S.74.



**Карабельская И.В.**  
**Karabel'skaya I.V.**

аспирант кафедры «Технологические машины и прикладная физика»,  
доцент кафедры «Информатика и ИКТ»  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса»,  
Россия, г. Уфа



**Абызбаев И.И.**  
**Abyzbaev I.I.**

доктор технических наук  
профессор кафедры «Разработка и эксплуатация нефтегазовых месторождений» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Россия, г.Уфа

УДК 621.313.33:64.067

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЕ ТРУБОПРОВОДОВ ОТ КОРРОЗИИ В НЕОДНОРОДНЫХ И КЛИНОВИДНЫХ СРЕДАХ

В статье изложены методы решения систем параллельных подземных трубопроводов в неоднородных и клиновидных средах: методы расчета электрических полей при электрохимической защите трубопроводов от коррозии, рассмотрены некоторые задачи расчета параметров электрохимической защиты трубопроводов от коррозии. Подобные задачи возникают в различных проблемах прикладной электрохимии. Для каждой задачи, рассмотренной в примерах, сформулирована математическая модель самосогласованной краевой задачи, описывающей электрические поля с цилиндрическими неоднородностями, электродами и изоляторами; вычислительные алгоритмы понижения размерности задачи, иллюстрирующие возможности применения дифференциально-разностного метода с аппроксимацией производных по переменной  $u$ , применения дифференциально-разностного метода с аппроксимацией производных по переменной  $z$ , для понижения размерности данной краевой задачи, преобразующейся в  $n$  двумерных краевых задач. Решение краевых задач построено методом интегральных уравнений с использованием функций Грина, определяемых из краевых задач.

В статье рассмотрен метод решения интегральных уравнений и пример расчета для определения параметров электрохимической защиты от коррозии металлических сооружений, находящихся в проводящем пространстве; приводится таблица распределения плотности тока по длине трубопроводов (по оси  $z$ ) при данном распределении токов  $I_1, I_2, I_3$  на каждый трубопровод; приводятся результаты расчета потенциальных полей при катодной защите параллельно уложенных трубопроводов.

Одной из проблем, выдвигаемых современным техническим прогрессом в области трубопроводного транспорта, является повышение его надежности. Надежность магистральных нефтегазопроводов во многом определяется эффективностью комплексной защиты, которая включает в себя защиту изоляционными покрытиями и катодной поляризацией (катодной и протекторной защитой) [2].

Для обеспечения надежной электрохимической защиты трубопроводов от коррозии необходимы знания параметров, обеспечивающих распределение защитной плотности тока и потенциала вдоль трубопроводов. Такие параметры можно рассчитывать методами математического моделирования и вычислительного эксперимента [2]. Для решения задач расчета электрических полей разрабатывались общие и специальные методы математической физики [9, 14-15, 18-19]. В этих работах имеется достаточно полный обзор рассмотренных задач расчета параметров электрохимической защиты металлических сооружений и трубопроводов в частности.

Ранее в работе [2] были изложены методы решения систем трубопроводов, расположенных в тоннеле и в вертикально-неоднородной среде.

Здесь же будет показано изложение методов решения систем параллельных подземных трубопроводов в клиновидных и неоднородных средах.

В данной работе предлагаются разработанные, апробированные на ЭВМ, комбинированные алгоритмы численного анализа электрических полей, описываемых трехмерными нелинейными самосогласованными краевыми задачами в неоднородной среде с цилиндрическими неоднородными включениями, изоляторами и электродами. Этот класс моделей охватывает достаточно широкий теоретических задач электрических и тепловых полей, имеющих важные практические приложения [1-8, 10-13, 16-17].

*Ключевые слова:* математическая модель, самосогласованная краевая задача, исследование электрических полей постоянного тока, системы со сложными и геометрическими параметрами, дифференциально-разностный метод по переменной  $y$ , дифференциально-разностный метод по переменной  $z$ , преобразование задачи в  $n$  двумерных краевых задач, понижение размерности задачи, метод решения интегральных уравнений.

## METHODS FOR CALCULATING ELECTRIC FIELDS AT ELECTROCHEMICAL PROTECTION OF PIPELINES AGAINST CORROSION IN INHOMOGENEOUS MEDIA AND WEDGE

The article describes methods for the parallel solution of systems of underground pipelines in heterogeneous environments and wedge: methods of calculation of electric fields for electrochemical protection of pipelines from corrosion, the problem of calculating the parameters of electrochemical protection of pipelines from corrosion. Such problems arise in various problems of applied electrochemistry. For each task, discussed in the examples, formulated a mathematical model of self-consistent boundary value problem describing the electric field with cylindrical inhomogeneities, electrodes, and insulators; computational algorithms decrease the dimension of the problem that illustrates the application of the differential-difference method with the approximation of derivatives by  $y$ , the application of differential-difference method with the approximation of derivatives with respect to variable  $z$ , to reduce the dimensionality of the given boundary problem is converted into  $n$  two-dimensional boundary value problems. Solution of boundary value problems is constructed by the method of integral equations using green's functions determined from boundary value problems.

This paper presents a method of solving integral equations and a sample calculation to determine the parameters of electrochemical protection against corrosion of metal constructions which are in the conducting space; a table the current density distribution along the length of the pipelines ( $z$ -axis) for a given distribution of currents  $I_1, I_2, I_3$ , for each pipeline; the results of the calculation of potential fields in cathodic protection of parallel pipelines.

One of the problems put forward by modern technological advances in the field of pipeline transport is to increase its reliability. Reliability of trunk oil and gas pipelines is largely determined by the effectiveness of comprehensive protection, which includes protection insulating coatings and cathodic polarization (cathodic and cathodic protection) [2].

To ensure reliable electrochemical protection of pipelines against corrosion requires knowledge of the parameters that ensure the distribution of the protective current density and potential along the pipeline. Such parameters can be calculated by methods of mathematical modeling and computational experiment [2]. For the decision of problems of calculation of electric fields was developed for General and special methods of mathematical physics [9, 14-15, 18-19].

In these works there is a fairly complete review considers the task of calculating the parameters of cathodic protection of metallic structures and pipelines in particular.

Earlier in [2] outlined the methods for solving systems of pipes located in the tunnel and in a vertically inhomogeneous medium. Here you will see the presentation of methods for solving systems of parallel buried pipes in tapered and inhomogeneous media.

In this work, we developed, tested on the computer, combined algorithms of numerical analysis of the electric fields described three-dimensional self-consistent nonlinear boundary value problems in an inhomogeneous medium with inhomogeneous cylindrical inclusions, insulators and electrodes. This class of models covers the theoretical problems of electric and thermal fields, which have important practical applications [1-8, 10-13, 16-17].

*Keywords:* mathematical model, self-consistent boundary-value problem, the study of electric fields DC system with complex and geometric parameters, the differential-difference method on a variable  $y$ , the differential-difference method on a variable  $z$ , the transformation of the problem into  $n$  two-dimensional boundary value problems, the reduction of the dimensionality of the problem, method of solution of integral equations.

**Пример 1.** Катодная защита системы трубопроводов в клиновидных средах. Система трубопроводов может пролегать в геологических структурах с различным расположением неоднородностей, в том числе, например, и в средах с клиновидными неоднородностями [8,20]. При этом электрическое поле определяется решением краевой задачи

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial z^2} &= -\frac{1}{\sigma} \delta(x-x_0) \delta(y-y_0) \delta(z-z_0), \quad i = 1, 2, \dots, N; \\ \frac{\partial U_1}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \frac{\partial U_N}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad U_i \rightarrow 0 \text{ при } \sqrt{x^2+z^2} \rightarrow \infty \\ \frac{\partial U_i}{\partial y} \Big|_{y=0} &= \frac{\partial U_i}{\partial y} \Big|_{y=H} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N; \\ [U] \Big|_{l_q} &= 0, \quad \left[ \sigma \frac{\partial U}{\partial n} \right] \Big|_{l_q} = 0, \quad q = 1, 2, \dots, N-1. \end{aligned} \quad (1)$$

И опять для простоты изложения будем считать, что система трубопроводов находится в одном  $k$ -ом слое. При этом граничные условия принимают вид:

$$U_k + c_p(x, z) \sigma_k \frac{\partial U_k}{\partial n} \Big|_{\Gamma_p} = U_{Mp}(y), \quad p = 1, 2, \dots, L. \quad (2)$$

Дифференциально-разностным методом с аппроксимацией производных по  $y$  задача (1), (2) расщепляется на  $n$  двумерных краевых задач:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_{is}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_{is}}{\partial z^2} - \lambda^2_s U_{is} &= -\frac{I'}{\sigma} \delta(x-x_0) \delta(z-z_0), \\ \frac{\partial U_{1s}}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \frac{\partial U_{Ns}}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad U_{is} \rightarrow 0 \text{ при } \sqrt{x^2+z^2} \rightarrow \infty \\ [U_s] \Big|_{l_q} &= 0, \quad \left[ \sigma \frac{\partial U_s}{\partial n} \right] \Big|_{l_q} = 0, \quad q = 1, 2, \dots, N-1. \\ U_{ks} + c_p(x, z) \sigma_k \frac{\partial U_{ks}}{\partial n} \Big|_{\Gamma_p} &= U_{Mps}, \quad p = 1, 2, \dots, L; \quad s = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (3)$$

Решение краевых задач (3) строится методом интегральных уравнений с использованием функций Грина, определяемых из краевых задач

$$\frac{\partial^2 G_{is}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G_{is}}{\partial z^2} - \lambda_s^2 G_{is} = -\delta(x-\alpha)\delta(z-\beta);$$

$$\left. \frac{\partial^2 G_{1s}}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial G_{NS}}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad G_{is} \rightarrow 0 \text{ при } \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$[G_s]_{l_q} = 0, \quad \left[ \sigma \frac{\partial G_s}{\partial n} \right]_{l_q} = 0, \quad q=1,2,\dots,N.$$

Решение этой задачи строится аналитически.

трических полей необходимо учитывать неоднородность среды вдоль трубопроводов. Подобная задача подробно рассмотрена в [18]. В отличие от задачи в [18], здесь учитывается глубина залегания трубопроводов.

**Пример 2.** Катодная защита системы трубопроводов параллельных подземных трубопроводов в неоднородной среде вдоль трубопроводов. Система трубопроводов, как правило, пересекает различные геологические структуры, так что при расчете элект-

рическое поле находится решением граничной задачи

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{1}{\sigma(z)} \frac{\partial}{\partial z} (\sigma(z) \frac{\partial U}{\partial z}) = -\frac{1}{\sigma(z)} \delta(x-x_0) \delta(y-y_0) \delta(z-z_0);$$

$$\left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{z=H} = 0, \quad U \rightarrow 0 \text{ при } \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$[U]_{z=l_q} = 0, \quad \left[ \sigma \frac{\partial U}{\partial z} \right]_{z=l_q} = 0, \quad q=1,2,\dots,N-1; \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad 0 < z < H, \quad -\infty < x < \infty;$$

$$U + c_p \left. \frac{\partial U}{\partial n} \right|_{\Gamma_p} = U_{Mp}(z), \quad 0 < z < H, \quad p = 1,2,\dots,L. \quad (5)$$

Краевые условия (5) получены в результате применения итерационного процесса, предложенного к краевым условиям на трубопроводе (подробно эти процессы описаны в [18]).

Дифференциально-разностным методом с аппроксимацией производных по  $z$  задача (4), (5) расщепляется на  $n$  двумерных краевых задач:

$$\frac{\partial^2 U_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_{is}}{\partial y^2} - \lambda_s^2 U_s = -\frac{I'}{\sigma(z_0)} \delta(x-x_0) \delta(y-y_0);$$

$$U_s \rightarrow 0 \text{ при } \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\left. \frac{\partial U_s}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad -\infty < x < \infty;$$

$$U_s + c_p \left. \frac{\partial U_s}{\partial n} \right|_{\Gamma_p} = U_{Mps}(z), \quad p = 1,2,\dots,L; \quad s = 1,2,\dots,n.$$

Краевые задачи (6) сводятся к граничным интегральным уравнениям. Функции Грина имеют вид:

$$G_s(P, Q) = \frac{1}{2\pi} (K_0(\lambda_s r) + K_0(\lambda_s \bar{r})),$$

где  $r$  – расстояние между точкой  $P$  и точкой  $Q$ ,  $\bar{r}$  – расстояние между точкой  $P$  и точкой  $\bar{Q}$  – зеркальным отображением  $Q$  через границу полуплоскости.

**Пример расчета.**

Для определения параметров электрохимической защиты от коррозии металлических сооружений, находящихся в проводящем пространстве, необходимо рассчитать потенциальное поле многоэлектродной системы в неоднородной системе в неоднородном пространстве

$$\operatorname{div} (\sigma(p) \operatorname{grad} U) = -\sum_{i=1}^q I_i \delta(P-P_i); \quad (7)$$

$$\left. \frac{\partial U}{\partial n} \right|_{S_u^i} = 0, \quad i=1,2,\dots, m_0; \quad (8)$$

$$U + \eta_i (\sigma(p) \frac{\partial U}{\partial n}) = U_i(p), \quad p \in S^i, \quad i=1,2,\dots, m_1; \quad (9)$$

$$\int_{S^i} \sigma \frac{\partial U}{\partial n} ds = I^i, \quad i=1,2,\dots, m_2; \quad (10)$$

$$U \rightarrow 0, \quad p \rightarrow \infty. \quad (11)$$

Здесь  $U$  – функция, характеризующая потенциал электрического поля,  $\sigma(p)$  – кусочно-непрерывная функция, описывающая удельную электрическую проводимость среды. Для получения более равномерного распределения плотности тока на поверхностях защищаемых сооружений обычно применяются несколько анодных заземлителей, расположенных в разных точках пространства.

В (7)  $I_i$  – интенсивность точечного источника (анодного заземлителя), находящегося в точке  $P_i$ .

$S_u^i$  - граница  $i$  - го изолятора или непроводящего экрана (например, поверхность земли, плоскость симметрии),  $S_i^i$  - граница  $i$ -го электрода, т.е. металлического сооружения,  $n$  - внешняя нормаль к поверхности электрода  $S_i^i$ ,  $\eta_i$  - функция, в общем случае нелинейная, выражающая зависимость разности потенциалов  $U_i(p) - U(p)$  на границе  $i$ -й электрод - электролит от плотности тока; эта разность потенциалов обуславливается, например, наличием на поверхности сооружения тонкого изоляционного покрытия.

С целью получить желаемое распределение плотности тока на поверхностях совместно защищаемых сооружений часто контролируют, т.е. задают ток, поступающий к данному конкретному сооружению. Это обстоятельство выражено условиями (10), ( $m_2 \leq m_j$ ), где  $m_2$  - число таких сооружений

. Эти же условия будут учитывать наличие таких сооружений, которые находятся в зоне влияния токов катодной защиты других сооружений, но не защищаются (не подключены к данной катодной установке), т.е. суммарный ток, стекающий с поверхности каждого из них, равен  $I_3 = 0$ . На поверхностях таких сооружений помимо катодных будут и

анодные участки, которые увеличивают коррозионную опасность.

Ниже приводятся результаты расчета потенциальных полей при катодной защите параллельно уложенных трубопроводов при  $I_3^1 = 5A$ ,  $I_3^2 = 10,4A$ ,  $I_3^3 = 57A$ .

Если сопротивление единицы длины трубопроводов  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 10^{-5}$ , переходное сопротивление  $C_1 = 240 \text{ ом} \cdot \text{м}^2$ ,  $C_2 = 113 \text{ ом} \cdot \text{м}^2$ ,  $C_3 = 80 \text{ ом} \cdot \text{м}^2$ , а анодные заземлители расположены на расстоянии  $b = 500$  м от первого трубопровода и на расстоянии  $H = 5$  км друг от друга по трассе трубопроводов, то все трубопроводы катодно поляризуются и максимальные  $M_i$  и минимальные  $m_i$  падения потенциалов на изоляции трубопровода получаются такие (см. таблицу 1).

Из таблицы 1 видно: анодный заземлитель  $I = 72,4$  А находится на расстоянии 500 м от первого трубопровода. Сопротивление единицы длины всех трубопроводов  $\rho_i = 10^{-5}$  ом/м,  $i = 1, 2, 3$ . Переходное сопротивление изоляционных покрытий  $240 \text{ ом} \cdot \text{м}^2$ ,  $113 \text{ ом} \cdot \text{м}^2$ ,  $80 \text{ ом} \cdot \text{м}^2$ , соответственно. При каждом значении  $z$  на трубопроводе даны два значения плотности тока - максимальное и минимальное по сечению.

Таблица 1

Распределение плотности тока по длине трубопроводов (по оси z) при данном распределении токов  $I_A, I_1, I_2, I_3$  на каждый трубопровод

z(М)		0	250	500	750	1000	1250
1 труба	J, mA/m <sup>2</sup>	1,83	1,8	1,51	1,07	0,76	0,59
		1,59	1,53	1,27	0,86	0,59	0,43
2 труба	J, mA/m <sup>2</sup>	3,25	3,23	2,94	2,45	2,11	1,92
		2,54	2,54	2,3	1,87	1,58	1,42
3 труба	J, mA/m <sup>2</sup>	11,67	11,51	10,74	9,74	8,95	8,35
		9,72	9,57	8,79	7,73	6,89	6,29

z(М)		1500	1750	2000	2250	2500	$I_A = 72,4$ А
1 труба	J, mA/m <sup>2</sup>	0,49	0,43	0,4	0,39	0,38	$I_1 = 5$ А
		0,34	0,29	0,27	0,25	0,25	
2 труба	J, mA/m <sup>2</sup>	1,84	1,75	1,72	1,71	1,7	$I_2 = 10,4$ А
		1,34	1,3	1,29	1,28	1,28	
3 труба	J, mA/m <sup>2</sup>	7,91	7,58	7,34	7,18	7,09	$I_3 = 57$ А
		5,85	5,53	5,31	5,14	5,05	

$$M_1 = 0,44 \text{ в}, M_2 = 0,38 \text{ в}, M_3 = 0,94 \text{ в}, m_1 = 0,76 \text{ в}, m_2 = 0,13 \text{ в}, m_3 = 0,40 \text{ в}.$$

При  $b = 50$  метров катодно поляризуются только поверхности второго и третьего трубопроводов, причем  $M_2 = 3,4$  в,  $m_2 = 0,04$  в,  $M_3 = 2,6$  в,  $m_3 = 0,33$  в, а на поверхности первого трубопровода между соседними анодными заземлителями образуется анодная зона длиной в 4 км, а катодными будут зоны длиной в 1 км напротив каждого анодного заземлителя. При этом, если потенциал третьего трубопровода на месте соединения с анодным заземлителем  $\varphi_3 = 0$ , то  $\varphi_2 = 1,3$  в,  $\varphi_1 = 2,2$  в.

Таким образом, анодные участки на поверхностях сооружений появляются не только под влиянием катодной защиты соседних сооружений, когда данное сооружение не подключено к станции катодной защиты, но и при неудачном расположении анодных заземлителей или при неправильном распределении тока на сооружении.

**Метод решения интегральных уравнений**

Среди численных методов решения интегральных уравнений второго рода заслуживает особого внимания метод Крылова-Боголюбова [21]. Суть этого метода покажем на примере интегрального уравнения

$$\mu(\tau) - A \int_{d_1}^{d_2} \mu(t) K(t, \tau) dt = f(\tau) \quad (12)$$

в котором ядро  $K(t, \tau)$  имеет разрыв при совпадении аргументов  $t = \tau$ .

В соответствии с приближенным методом Крылова-Боголюбова решение интегрального уравнения (12) заменим решением систем линейных алгебраических уравнений

$$\mu_k - \lambda \sum_{m=1}^M \mu_m K_{mk} = f_k, \quad k = 1, 2, \dots, M, \quad (13)$$

где  $\mu_k$  - приближенное значение  $\mu(t)$  при  $t = t_k, f_k = f(t_k)$ ,

$$K_{mk} = \int_{t_m - \frac{h}{2}}^{t_m + \frac{h}{2}} K(t, t_k) dt, \quad t_k = \frac{2k-1}{2} h + d_1, \quad h = \frac{d_2 - d_1}{M}. \quad (14)$$

Формула (14) позволяет вычислить  $K_{mk}$  с любой степенью точности. Суть этого метода как раз и состоит в том, чтобы формулой (14) достаточно вычислить коэффициенты при  $m = k$ , т.е. в точке, где имеется особенность поведения ядра.

Расположим все контуры  $\gamma_j, \ell_{ip}, s_{ik}$  в одну последовательность  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, I_C$ ), в которой каждый контур встречается один лишь раз, и установим для каждого контура вариант обхода по какому-либо принципу. Уравнения всех контуров запишем в параметрическом виде  $\alpha_i = \varphi_i(\tau), \beta_i = \psi_i(\tau), i = 1, 2, \dots, I_C$ , причем параметр  $\tau$  увеличивается при движении в положительном направлении, так что конечное значение этого параметра для контура  $C_k$  должно быть началом для контура  $C_{k+1}$ . При такой конструкции параметр  $\tau$  для всех контуров будет меняться по некоторой величине  $d_1$  на контуре  $C_1$  для конечного  $d_1$  на контуре  $C_j$ . Заменив переменную интегрирования на  $\tau$ , приходим к уравнению вида (12) [22].

Другие методы решения интегральных уравнений и библиография по данному вопросу освещены в [23].

Список литературы

1. Карабельская И.В. Исследования электрических полей постоянного тока в системах со сложными геометрическими параметрами [Текст] / И.В. Карабельская // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2015. - Т. 11. - №1. - С. 45-51.
2. Карабельская И.В. Примеры расчета электрических полей при электрохимической защите трубопроводов от коррозии [Текст] / И.В. Карабельская // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2015. - Т. 11. - №2. - С. 23-29.
3. Долوماتов М.Ю. Проектирование ИС по свойствам и электронным характеристикам сложных многокомпонентных органических систем [Текст] / М.Ю. Долوماتов, И.В. Карабельская, Э.А. Ковалева // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2014. - Т. 10. - №2. - С. 45-51.
4. Иванов В.Т. Комплекс программно-алгоритмического обеспечения численных исследований электрических полей в некоторых сложных системах

[Текст] / В.Т. Иванов, А.М. Болотнов, Ф.Г. Гадилова, Г.Я. Кильдибекова, В.Н. Кризский, И.У. Надергулов, И.В. Карабельская // Известия вузов: Электромеханика. – 1987. – № 11. – С. 21–26.

5. *Иванов В.Т.* Комплекс программно-алгоритмического обеспечения численных исследований электрических полей в некоторых сложных системах [Текст] / В.Т. Иванов, А.М. Болотнов, Ф.Г. Гадилова, Г.Я. Кильдибекова, В.Н. Кризский, И.У. Надергулов, И.В. Карабельская // I Всесоюзная конф. по теоретической электротехнике: тез. докл. – Ташкент, 1987. – С. 34–35.

6. *Болотнов А.М.* Методы расчета трехмерных краевых задач для эллиптических уравнений в многосвязных областях с цилиндрическими границами [Текст] / А.М. Болотнов, В.Т. Иванов, Г.Я. Кильдибекова, И.В. Карабельская. – Деп. в ВИНТИ 4.12.86. № 8870. – В 86. – Уфа: БГУ, 1986. – 49 с.

7. *Ураков А.Р.* Исследования автотельных процессов нестационарной ЭХО [Текст] / А.Р. Ураков, В.И. Карамов, И.В. Карабельская // Современная электротехнология в машиностроении: сб. трудов Всероссийской науч.-техн. конф. – Тула, 1997. – С. 161–162.

8. *Иванов В.Т.* Оптимизация электрических полей, контроль и автоматизация гальванообработки [Текст] / В.Т. Иванов, В.Г. Гусев, А.Н. Фокин. – М. Машиностроение, 1986. – 211 с.

9. *Андреев И.Н.* Коррозия металлов и их защита [Текст] / И.Н. Андреев. – Казань: Татарское кн. изд-во, 1979. – 120 с.

10. *Заборовский А.И.* Электроразведка [Текст] / А.И. Заборовский. – М.: Гостехнефиздат, 1948.

11. *Дахнов В.Н.* Электрические и магнитные методы исследования скважин [Текст] / В.Н. Дахнов. – М.: Недра, 1981. – 334 с.

12. *Козырин А.К.* Электрическая корреляция разрезов скважин [Текст] / А.К. Козырин. – М.: Недра, 1985.

13. *Иванов В.Т.* Методы решения прямых и обратных задач электрокаротажа [Текст] / В.Т. Иванов, М.С. Масютина. – М.: Наука, 1983. – 143 с.

14. *Иванов В.Т.* Некоторые проблемы вычислительной математики применительно к расчетам электрических полей в электрохимических системах [Текст] / В.Т. Иванов; препринт докл. Президиуму БФАН СССР. – Уфа: БФАН СССР, 1983. – 39 с.

15. *Самарский А.А.* Проблемы применения вычислительной техники [Текст] / А.А. Самарский // Вестник АН СССР. – 1984. – № 11. – С. 17–29.

16. *Иванов В.Т.* [Текст] / В.Т. Иванов // Тез. докл. Всесоюзной конф. «Теория информационных систем и систем управления с распределенными

параметрами»: ч.1. – Уфа: БФАН СССР, 1976. – С. 19–20.

17. *Иванов В.Т.* Методы расчета трехмерных электрических полей в электролитах [Текст] / В.Т. Иванов // Краевые задачи математической физики и их приложения. – Уфа: БФАН СССР, 1976. – С. 18–53.

18. *Иванов В.Т.* Расчет трехмерных электрических полей в неоднородной среде с протяженными тонкими цилиндрическими электродами [Текст] / В.Т. Иванов, Н.П. Глазов, М.М. Махмутов. – Электричество. – 1985. – № 6. – С. 48–52.

19. *Самарский А.А.* Введение в численные методы [Текст] / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1982. – 271 с.

20. *Дмитриев В.И.* Метод решения задач электродинамики неоднородных сред [Текст] / В.И. Дмитриев, Е.В. Захаров. // Журнал вычисл. матем. и матем. физ. – 1970. – № 6. – С. 1458–1464.

21. *Канторович Л.В.* Приближенные методы высшего анализа [Текст] / Л.В. Канторович, В.И. Крылов. – М.: Физматгиз, 1962. – 708 с.

22. *Бобрик А.И.*, Решение некоторых задач для уравнения Пуассона с граничными условиями IV рода [Текст] / А.И. Бобрик, В.Н. Михайлов // Журнал вычисл. матем. и матем. физ. – 1974. – № 1. – С. 126–134.

23. *Берлань А.Ф.* Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. [Текст] / А.Ф. Берлань, В.С. Сизиков. – Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1986. – 543 с.

#### References

1. *Karabel'skaja I.V.* Issledovanie jelektricheskikh polej postojannogo toka v sistemah so slozhnyimi geometricheskimi parametrami [Tekst] / I.V. Karabel'skaja // Jeletrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2015. – Т. 11. – № 1. – С. 45–51.

2. *Karabel'skaja I. V.* Primery rascheta jelektricheskikh polej pri jelektrohimicheskoj zashhite truboprovodov ot korrozii [Tekst] / I.V. Karabel'skaja // Jeletrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2015. – Т. 11. – № 2. – С. 23–29.

3. *Dolomatov M.J.* Proektirovanie IS po svojstvam i jelektronnym harakteristikam slozhnyh mnogokomponentnyh organicheskikh sistem [Tekst] / M.Ju. Dolomatov, I.V. Karabel'skaja, Je.A. Kovaleva // Jeletrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2014. – Т. 10. – № 2. – С. 45–51.

4. *Ivanov V.T.* Kompleks programmno-algoritmicheskogo obespechenija chislennyh issledovanij jelektricheskikh polej v nekotoryh slozhnyh sistemah [Tekst] / V.T. Ivanov, A.M. Bolotnov, F.G. Gadilova, G.Ja.

Kil'dibekova, V.N. Krizskij, I.U. Nadergulov, I.V. Karabel'skaja // Izvestija vuzov: Jeletromehaniка. – 1987. – № 11. – С. 21–26.

5. *Ivanov V.T.* Kompleks programmno-algoritmicheskogo obespechenija chislennyh issledovanij jelektricheskikh polej v nekotoryh slozhnyh sistemah [Tekst] / V.T. Ivanov, A.M. Bolotnov, F.G. Gadilova, G.Ja. Kil'dibekova, V.N. Krizskij, I.U. Nadergulov, I.V. Karabel'skaja // I Vsesojuznaja konf. po teoreticheskoj jeletrotehnike: tez. dokl. – Tashkent, 1987. – С. 34–35.

6. *Bolotnov A.M.* Metody rascheta trehmernyh kraevyh zadach dlja jellipticheskikh uravnenij v mnogosvjaznyh oblastjah s cilindricheskimi granicami [Tekst] / A.M. Bolotnov, V.T. Ivanov, G.Ja. Kil'dibekova, I.V. Karabel'skaja. – Dep. v VINITI 4.12.86. № 8870. – В 86. – Уфа: БГУ, 1986. – 49 с.

7. *Urakov A.R.* Issledovanie avtomodel'nyh processov nestacionarnoj JeHO [Tekst] / A.R. Urakov, V.I. Karamov, I.V. Karabel'skaja // Sovremennaja jeletrotehnologija v mashinostroenii: sb. trudov Vserossijskoj nauch.-tehn. konf. – Tula, 1997. – С. 161–162.

8. *Ivanov V.T.* Optimizacija jelektricheskikh polej, kontrol' i avtomatizacija gal'vanoobrabotki [Tekst] / V.T. Ivanov, V.G. Gusev, A.N. Fokin. – М. Mashinostroenie, 1986. – 211 с.

9. *Andreev I.N.* Korrozija metallov i ih zashhita [Tekst] / I.N. Andreev. – Kazan': Tatarskoe kn. izd-vo, 1979. – 120 с.

10. *Zaborovskij A.I.* Jelettrorazvedka [Tekst] / A.I. Zaborovskij. – М.: Gostehnefizdat, 1948.

11. *Dahnov V.N.* Jelektricheskije i magnitnye metody issledovanija skvazhin [Tekst] / V.N. Dahnov. – М.: Nedra, 1981. – 334 с.

12. *Kozyrin A.K.* Jelektricheskaja korrelyacija razrezov skvazhin [Tekst] / A.K. Kozyrin. – М.: Nedra, 1985.

13. *Ivanov V.T.* Metody reshenija prjamyh i obratnyh zadach jelektrokartazha [Tekst] / V.T. Ivanov, M.S. Masjutina. – М.: Nauka, 1983. – 143 с.

14. *Ivanov V.T.* Nekotorye problemy vychislitel'noj matematiki primenitel'no k raschetam jelektricheskikh polej v jelektrohimicheskikh sistemah [Tekst] / V.T. Ivanov; preprint dokl. Prezidiumu BFAN SSSR. – Уфа: BFAN SSSR, 1983. – 39 с.

15. *Samarskij A.A.* Problemy primenenija vychislitel'noj tehniki [Tekst] / A.A. Samarskij // Vestnik AN SSSR. – 1984. – № 11. – С. 17–29.

16. *Ivanov V.T.* [Текст] / V.T. Иванов // Тез. докл. Всесоюзной конф. «Теория информационных систем и систем управления с распределенными параметрами»: ч.1. – Уфа: БФАН СССР, 1976. – С. 19–20.

17. *Ivanov V.T.* Metody rascheta trehmernyh jelektricheskikh polej v jelektrolitah [Tekst] / V.T. Ivanov // Kraevye zadachi matematicheskoj fiziki i ih prilozhenija. – Уфа: БФАН СССР, 1976. – С. 18–53.

18. *Ivanov V.T.* Raschet trehmernyh jelektricheskikh polej v neodnorodnoj srede s protjazhennymi tonkimi cilindricheskimi jelektrodami [Tekst] / V.T. Ivanov, N.P. Glazov, M.M. Mahmutov. – Jelektrichestvo. – 1985. – № 6. – С. 48–52.

19. *Samarskij A.A.* Vvedenie v chislennye metody [Tekst] / A.A. Samarskij. – М.: Nauka, 1982. – 271 с.

20. *Dmitriev V.I.* Metod reshenija zadach jelektrodinamiki neodnorodnyh sred [Tekst] / V.I. Dmitriev, E.V. Zaharov. // Zhurnal vychisl. matem. i matem. fiz. – 1970. – № 6. – С. 1458–1464.

21. *Kantorovich L.V.* Priblizhennye metody vysshego analiza [Tekst] / L.V. Kantorovich, V.I. Krylov. – М.: Fizmatgiz, 1962. – 708 с.

22. *Bobrik A.I.*, Reshenie nekotoryh zadach dlja uravnenija Puassona s granichnymi uslovijami IV roda [Tekst] / A.I. Bobrik, V.N. Mihajlov // Zhurnal vychisl. matem. i matem. fiz. – 1974. – № 1. – С. 126–134.

23. *Berlan' A.F.* Integral'nye uravnenija: metody, algoritmy, programmy. [Tekst] / A.F. Berlan', V.S. Sizikov. – Spravochnoe posobie. Kiev: Naukova dumka, 1986. – 543 с.



**Фетисов В. С.**  
**Fetisov V. S.**

доктор технических наук,  
профессор кафедры «Информационно-  
измерительная техника»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный авиационный  
технический университет»,  
Россия, г. Уфа.



**Мельничук О. В.**  
**Melnichuk O. V.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Теоретические  
основы электротехники»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
авиационный технический  
университет», Россия, г. Уфа.

УДК 621.38

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ КОНТАКТНОЙ МАТРИЦЫ

В статье описываются условия и результаты моделирования электрических цепей, составляющих управляющую часть так называемой интеллектуальной контактной матрицы, которая может быть использована в качестве средства подзарядки аккумуляторных батарей различных устройств.

Интеллектуальная контактная матрица – это распределенный по определенной площади набор плоских открытых контактных площадок, на которые в цикле зарядки накладывается 2 плоских длинных электрода заряжаемого аккумулятора, подключение которых к полюсам зарядного источника производится адаптивно, в зависимости от полярности наложенного электрода.

Преимуществом контактной матрицы по сравнению с традиционными штепсельными разъемами является возможность произвольного расположения заряжаемого объекта на зарядной станции, следовательно, резко снижаются требования к точности его позиционирования, что особенно важно для мобильных устройств – воздушных и наземных роботов, электрокаров и т.п., которые не всегда могут совершить точную посадку (заезд) на зарядную станцию.

Управление подключением отдельной контактной площадки может быть осуществлено с помощью предложенного простого аналогового устройства, состоящего из операционного усилителя, пары комплементарных транзисторов и электронного ключа сброса текущего состояния. Питание такой схемы производится от двух источников разных полярностей, которые, по сути, являются зарядными источниками, к одному из которых подключается контактная площадка.

Моделирование управляющего узла было произведено в среде Micro-Cap 9 в режиме Transient, который позволяет выполнить развертку во времени характерных напряжений и токов схемы и оценить характер переходных процессов.

Наибольший интерес представляло функционирование не отдельного узла управления одной контактной площадкой, а результат включения сразу нескольких таких узлов. Поэтому для удобства моделирования схема узла управления была оформлена в виде макромодели. Несколько таких макромоделей было использовано в качестве элементов для построения общей схемы управления контактной матрицей на более высоком иерархическом уровне.

Выявлено, что глубокая положительная обратная связь, которой охвачены каскады узла управления, может быть причиной неправильной коммутации зарядных источников на контактные площадки. Предложены

соответствующие корректирующие изменения в схеме, которые по результатам повторного моделирования подтвердили свою эффективность.

*Ключевые слова:* контактная матрица, моделирование, Micro-Cap, макромодель, аккумуляторная батарея, зарядка, открытая контактная площадка, электрод, операционный усилитель, комплементарные транзисторы.

## ELECTRIC CIRCUIT SIMULATION FOR SMART CONTACT MATRIX

The paper describes conditions and results of electric circuit simulation for controlling part of so called smart contact matrix that may be used as a facility for charging accumulator batteries of various objects.

Smart contact matrix includes a set of open contact pads distributed on a fixed surface. Two flat long electrodes from the accumulator being charged put on the open contact pads, and the switching of charging source to each pad is adaptive depending on applied electrode polarity.

The advantage of the smart contact matrix in compare with common plug contacts is the free object location on the charging station. Therefore, object positioning accuracy requirements may be rather low, that is especially important for mobile objects, such as aerial and terrestrial robots, electric cars and others those could not sit on the charging station very accurately.

Switching control for single contact pad may be implemented by means of the proposed simple analog control module, that consists of operational amplifier, complementary pair of transistors and slave reset key. Powering for this scheme is arranged with two sources of different polarities, those are charging sources, and each contact pad touching one of the two applied electrodes has to switch to one of the two sources.

Modelling for the control module was done with simulation program Micro-Cap 9 in Transient mode that provides time sweep of any voltage or current and transient process estimation.

It was not so interesting behavior of a single control module as operation of a set of contact pads and corresponding control modules. So the scheme of the control module was arranged as a macromodel, and many such macromodels were used as elements in the scheme of higher level of hierarchy.

It was found out that strong positive feedback in the control module may be the cause of wrong commutation of charging sources to contact pads. So adequate scheme correction was proposed, and it proved its efficiency by results of repeated simulation.

*Keywords:* contact matrix, simulation, Micro-Cap, macromodel, accumulator battery, charging, open contact pad, electrode, operational amplifier, complementary transistors.

### Введение

Во всем мире очень быстрыми темпами растет количество устройств с батарейным питанием. Причем большую часть источников автономного питания составляют перезаряжаемые аккумуляторные батареи. К ним относятся не только широко используемые бытовые приборы, портативная компьютерная техника, но и мобильные средства: электрокары, автономные мобильные воздушные и наземные роботы и т.д. Естественно, для каждого такого устройства требуется периодическая подзарядка. Причем далеко не всегда можно обеспечить точную фиксацию заряжаемого устройства в зарядном контактом терминале, в котором могло бы выполняться жесткое соединение контактов аккумуляторной батареи с контактами зарядного источника (например, посредством штепсельного разъема) [1]. Возможным решением во многих таких случаях могло бы быть применение плоских платформ с открытыми контактными площадками [2].

В одной из наших предыдущих публикаций [3] рассматривались некоторые технические решения,

касающиеся зарядных платформ с открытыми контактными площадками. Они ориентированы в первую очередь на подзарядку беспилотных летательных аппаратов, но могут быть применимы и для других устройств. Есть сведения о том, что такой подход именно применительно к воздушным роботам уже находит свое реальное воплощение на практике: немецкая фирма *SkySense* объявила о начале серийного выпуска зарядных платформ с открытыми контактными площадками, рассчитанных на посадку мультикоптеров различных размеров [4].

Наиболее универсальной схемой организации открытых контактных площадок является такая, в которой отдаленные друг от друга металлические площадки распределены по зарядной платформе в виде матрицы, а контактирующие с ними электроды заряжаемого аккумулятора (бортовые электроды) представляют собой две металлические полосы, ширина которых, а также зазор между ними должны быть выполнены с соблюдением определенных геометрических соотношений для избежания замыкания бортовых электродов между собой. Пример

зарядной контактной матрицы с наложенными на нее бортовыми электродами приведен на рис.1.

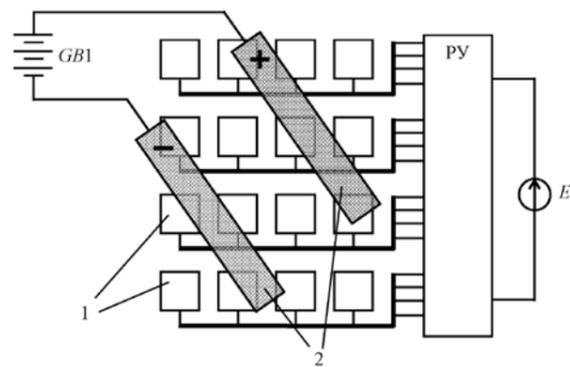


Рис.1. Контактная матрица зарядной платформы:  
1 – контактные площадки; 2 – бортовые электроды;  
GB1 – заряжаемая аккумуляторная батарея; E – зарядный источник; PY – распределительное устройство

Контактная площадка матрицы должна подключаться к соответствующему полюсу зарядного источника только при наличии на ней одного из бортовых электродов. Такое адаптивное поведение контактной площадки возможно только при наличии связанного с ней электронного узла, определяющего полярность приложенного к ней бортового электрода и подключающего затем к этой площадке

зарядный источник в нужной полярности. В совокупности эти электронные узлы образуют распределительное устройство (ПУ). Контактная матрица обладает адаптивным свойством и способна работать при самых разных вариантах расположения бортовых электродов, поэтому авторы сочли, что название «интеллектуальная контактная матрица» для такого устройства будет вполне уместным.

Схема достаточно простого электронного узла, управляющего подключением контактной площадки, выполненного исключительно на аналоговых компонентах, была предложена ранее [2]. Здесь рассмотрим особенности функционирования этого узла и совокупностей таких узлов с применением схемотехнического моделирования.

### 1. Исследуемая схема и инструментарий для моделирования

Исследуемая схема для управляющего узла представлена на рис.2. Моделирование осуществляется в среде *Micro-Cap 9.0.7* фирмы *Speectum Software* [5]. Условные графические обозначения элементов на схеме не везде соответствуют нормам ЕСКД – они оставлены в их оригинальном изображении. Целью моделирования была проверка устойчивости работы схемы и правильности подключения полюсов зарядного источника к контактным площадкам.

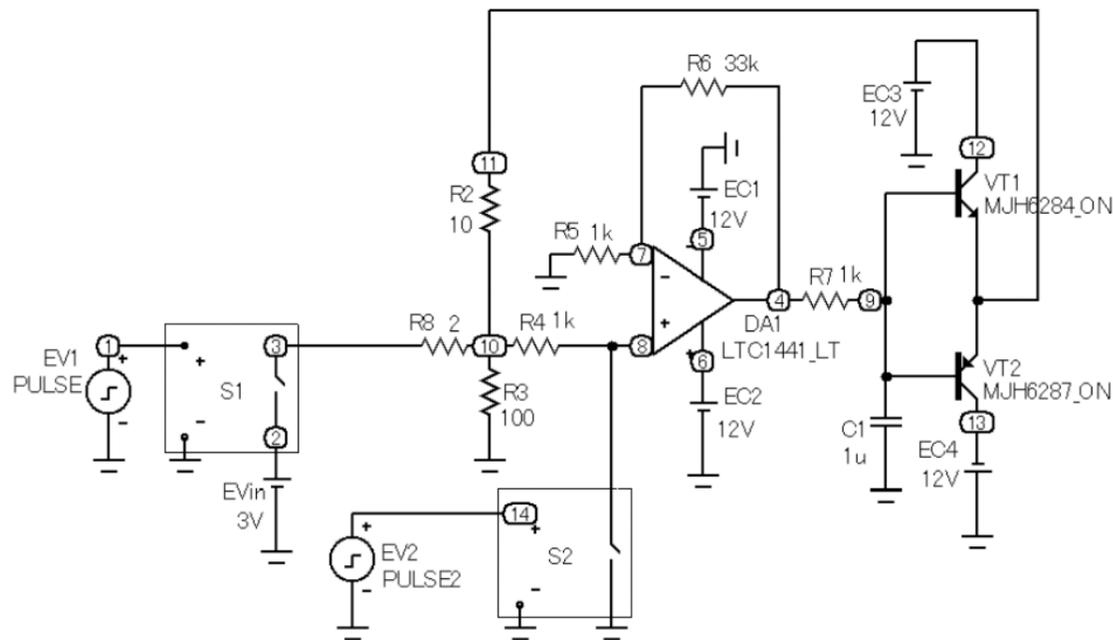


Рис.2 Исследуемая схема для управляющего узла

Единственным исследуемым режимом был режим моделирования переходных процессов (*Transient*), который позволяет осуществить развертку

во времени характерных напряжений и токов схемы и оценить характер переходных процессов.

Сама контактная площадка электрически связана с узлом 10 (рис.2). Основу схемы составляет операционный усилитель *DA1*, к которому не предъявляются какие-либо особые требования. Его назначение – усиление в несколько десятков раз (до насыщения) входного напряжения, которое приложено к узлу 10 через резистор *R8* (последний имитирует сопротивление контактирования электрода с контактной площадкой).

Питание схемы – двуполярное,  $\pm 12\text{В}$ . Источники питания схемы *EC3*, *EC4* являются, по сути, зарядными источниками, от которых через транзисторы *VT1*, *VT2* отбирается энергия для заряда бортового аккумулятора. Заряженный аккумулятор имитирует элемент *EV<sub>in</sub>*. Предположительно, это литий-полимерный аккумулятор емкостью 1-2 А·ч. Его максимальная ЭДС (в полностью заряженном состоянии) составляет 4,2 В, а минимально допустимая – 3 В. Нормальным начальным зарядным током будем считать ток в диапазоне 200...1000 мА.

Для изменения полярности подключения *EV<sub>in</sub>* достаточно изменить его номинал с +3 В на –3 В. Транзисторы *VT1*, *VT2* – составные, выполненные по схеме Дарлингтона. Они имеют высокий коэффициент передачи базового тока и максимальный ток коллектора порядка 10 А.

Управляемый напряжением ключ *S1* служит для имитации «посадки» заряжаемого аккумулятора *EV<sub>in</sub>* на площадку матрицы. Когда он замкнут, через *EV<sub>in</sub>* протекает зарядный ток. Периодичность замыкания-размыкания обеспечивает источник импульсного напряжения *EV1*.

Особое значение имеет резистор *R3*. Посредством него контактная площадка связана с землей. Его сопротивление нельзя делать слишком высоким. Практически, его номинал не рекомендуется выбирать более 100 Ом.

Когда аккумулятор *EV<sub>in</sub>* подключается к контактной площадке (узел 10), его остаточное напряжение усиливается усилителем *DA1* (коэффициент усиления  $(R6/R5) > 30$ , поэтому сигнал усиливается до насыщения). Выходное напряжение усилителя *DA1* «отпирает» один из транзисторов *VT1*, *VT2* и «запирает» другой («плюсом» открывается *VT1*, «минусом» – *VT2*). Таким образом, транзисторный ключ *VT1* (*VT2*) подключает к узлу 10 через ограничительный резистор *R2* источник *EC3* (*EC4*), т.е. источник той же полярности, которая и вызвала открытие ключа.

Так как через резистор *R2* на вход усилителя заведена положительная обратная связь, то после отключения *EV<sub>in</sub>* усилитель *DA1* и ключи *VT1*, *VT2* останутся в прежнем состоянии.

Для размыкания ключей *VT1*, *VT2* после удаления *EV<sub>in</sub>* и приведения схемы в нейтральное состояние служит ключ *S2*, который замыкается посредством короткого импульса сброса от источника импульсов *EV2*.

### 2. Обсуждение результатов моделирования

Результаты моделирования схемы по рис.2 в режиме *Transient* представлены на рис.3.

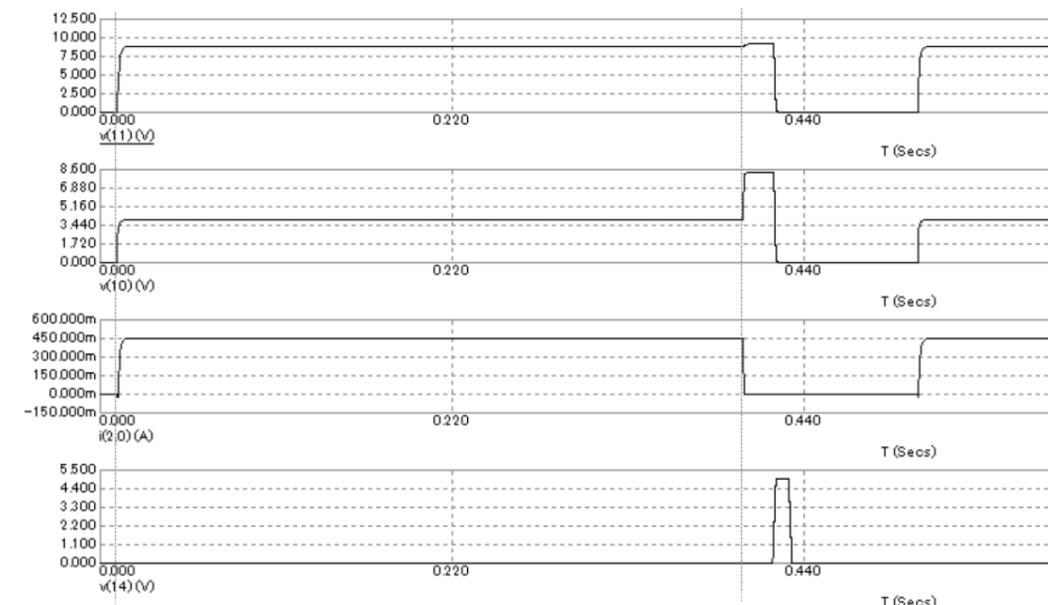


Рис.3. Результаты моделирования в режиме *Transient*

После подключения аккумулятора  $EV_{in}$  (момент времени  $t_1$ ) усилитель  $DA1$  входит в насыщение и на выходе устройства (узел 11) устанавливается напряжение порядка 9 В. Причем оно почти не меняется и после отключения  $EV_{in}$  (момент времени  $t_2$ ) вследствие действия положительной обратной связи через резистор  $R2$ . сброс этого напряжения в ноль происходит только после действия импульса сброса (см.  $v(14)$  – нижний график на рис.3).

Напряжение на самой контактной площадке ( $v(10)$ ) от момента отключения  $EV_{in}$  ( $t_2$ ) до начала импульса сброса имеет даже небольшой выброс, который по амплитуде как раз соответствует напряжению насыщения каскада  $\approx 9$  В.

При изменении полярности  $EV_{in}$  графики напряжений  $v(10)$ ,  $v(11)$  и зарядного тока  $i(2,0)$  выглядят аналогично, разница лишь в том, что названные величины имеют отрицательные значения.

Таким образом, никаких проблем при моделировании работы отдельно взятой схемы управления не обнаружено. Гораздо сложнее дело обстоит тогда, когда в работу включается сразу несколько контактных площадок. В этом случае аккумулятор  $EV_{in}$  подключается не между контактной площадкой и землей, как в рассмотренном случае, а между двумя контактными площадками, – непосредственно к земле он не подключается.

Для подключенного аккумулятора входные резисторы, аналогичные  $R3$  по рис.2, выполняют роль делителя его остаточного напряжения. Для простоты рассмотрения пока будем считать, что аккумулятор подключается к двум контактными площадкам (каждый из бортовых электродов – к своей контактной площадке). При наличии жесткой положительной обратной связи, а также с учетом возможного дребезга контактов, очень вероятно конкуренция сигналов с выходов усилителей по их времени установления на контактных площадках. Это может привести к тому, что сразу после подключения аккумулятора полярности напряжения на обеих контактных площадках будут одинаковыми. Для пояснения этого момента на рис.4 приведена упрощенная эквивалентная схема подключения аккумулятора (EV1, 3 В) к контактными площадками (узлы 4, 5). Резисторы  $R1, R2$  имитируют входные сопротивления схем управления, резистор  $R5$  – резистор положительной обратной связи. Подключение зарядных источников  $EV2, EV3$  не является строго одномоментным, поэтому сначала подключается только один из них, например,  $EV2$ . Для этого момента произведен расчет узловых потенциалов. Для узла 4 потенциал оказался равным +10,3 В, а для узла 5 он составил +7,1 В, т.е. они оба находятся в одной полярности. Это значит, что и на выходах усилителей полярность будет одной и той же, что совершенно неприемлемо.

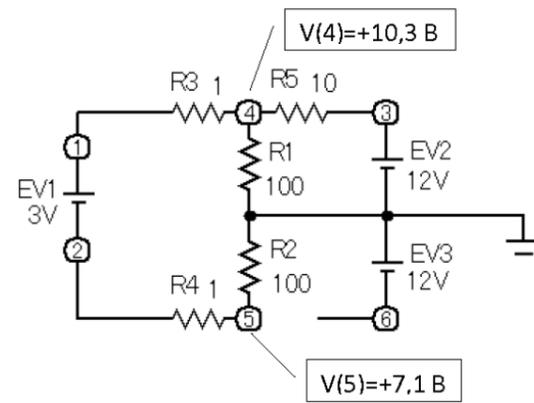


Рис.4 Упрощенная эквивалентная схема подключения аккумулятора к контактными площадкам

Для исключения такой ситуации предложено замедлить действие положительной обратной связи, для чего в схему управления (рис.2) введен конденсатор  $C1$  емкостью порядка 1 мкФ. Это сразу сделало работу рассматриваемых узлов более надежной.

Для удобства моделирования матрицы контактов с их схемами управления основная часть схемы по рис.2 (исключая импульсные источники и ключ  $S1$ ) была оформлена в виде макромодели.

Затем испытывались различные комбинации подключения аккумулятора к контактными площадками ( $n$  площадок подключаются «плюсу» аккумулятора,  $m$  площадок – к «минусу»,  $n, m = 1..5$ ).

Простейший вариант, когда одна контактная площадка подключена к «минусу» аккумулятора и одна – к «плюсу», показан на рис.5, а соответствующие временные диаграммы – на рис.6. На графиках показаны:  $v(4,3)$  – напряжение между контактными площадками,  $i(2,3)$  – зарядный ток,  $v(5)$  – импульс сброса.

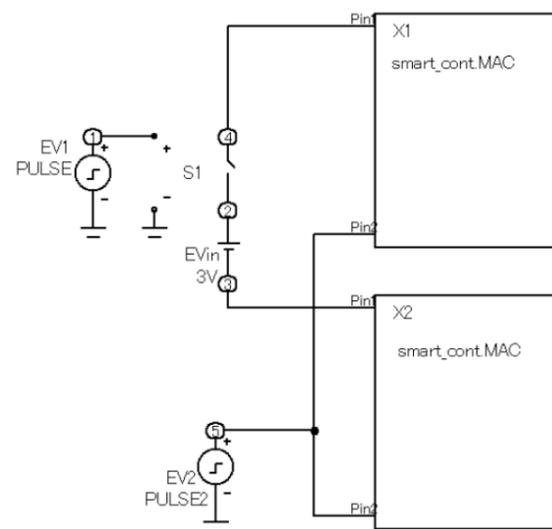


Рис.5 Простейший вариант подключения контактной площадки к аккумулятору

На рис.7 показаны те же диаграммы при смене полярности аккумулятора. Как видно по графикам зарядного тока ( $i(2,3)$ ), схема правильно обрабатывает это изменение. Заметим, что зарядный ток составляет  $\approx 630$  мА, а не 450 мА как для схемы по рис.2, поскольку зарядка осуществляется от двух источников разных полярностей.

Аналогичный анализ других комбинаций подключений не выявил каких-либо сбоев в распределении полярностей напряжений, прикладываемых к контактными площадкам от зарядных источников.

Степпинг (пошаговое изменение номинала) резистора  $R3$  по схеме рис.2 показал, что при превышении значения  $\approx 100$  Ом положительная обратная связь становится слишком глубокой, и импульс сброса не оказывает должного воздействия, т.е. усилитель продолжает оставаться в насыщении. Поэтому было рекомендовано при сохранении других указанных параметров схемы номинал этого резистора оставить на уровне 100 Ом.



Рис.6. Временные диаграммы простейшего варианта подключения контактной площадки к аккумулятору

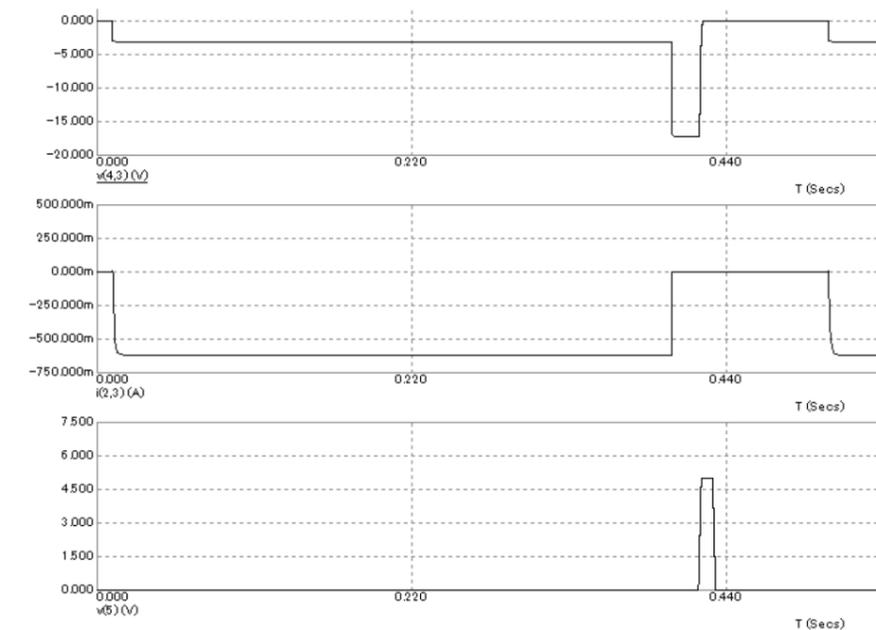


Рис.7 Временные диаграммы простейшего варианта подключения контактной площадки к аккумулятору при смене его полярности

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Анализ предложенной схемы управления контактами интеллектуальной матрицы в среде *Micro-Cap 9* подтвердил ее работоспособность. Она вполне может быть реализована на относительно недорогих аналоговых компонентах.

Выявленные в ходе моделирования возможные сбои в правильном подключении зарядных источников позволили оперативно внести корректирующие изменения в схему.

Рассмотренная схема была реализована на макете, предназначенном для управления 16-контактной интеллектуальной матрицей (рис.8). Макетный образец представлял собой четыре платы, каждая из которых управляла одним рядом контактов. Для минимизации количества элементов использовались микросхемы счетверенных операционных усилителей. Апробация макета полностью подтвердила результаты, полученные при моделировании.

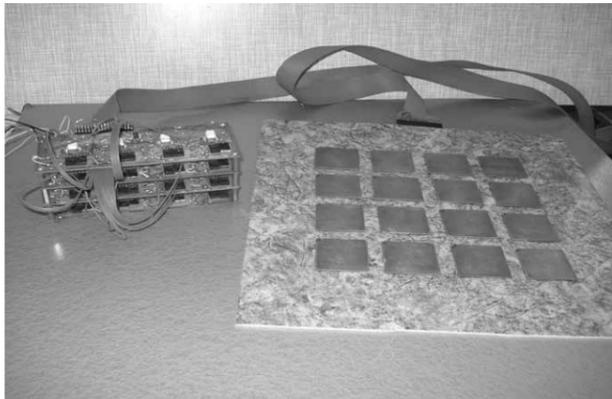


Рис.8. Макет схемы управления для 16-контактной матрицы

С целью повышения эффективности схемы биполярные транзисторы предложено в дальнейшем заменить на мощные КМОП-транзисторы.

**Список литературы**

1. Fetisov V. Continuous monitoring of terrestrial objects by means of duty group of multicopters [Text] / V. Fetisov, O. Dmitriyev, L. Neugodnikova, S. Bersenyov, I. Sakayev // Proceedings of XX IMEKO World Congress “Metrology for Green Growth”, 9-14 Sept. 2012, Busan, Republic of Korea. – P.86. – URL: [http://vositef.url.ph/index.files/PUBL/Fetisov\\_Dmitriyev\\_multicopters\\_final.pdf](http://vositef.url.ph/index.files/PUBL/Fetisov_Dmitriyev_multicopters_final.pdf).

2. Kemper P., Suzuki K., Morrison J. UAV Consumable Replenishment: Design Concepts for Automated

Service Stations [Text] / P. Kemper, K. Suzuki, J. Morrison // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2011. – Vol. 61. – № 1. – Pp. 369-397. – URL: [http://www.researchgate.net/publication/220062239\\_UAV\\_Consumable\\_Replenishment\\_Design\\_Concepts\\_for\\_Automated\\_Service\\_Stations](http://www.researchgate.net/publication/220062239_UAV_Consumable_Replenishment_Design_Concepts_for_Automated_Service_Stations)

3. Фетисов В. С. Наземные станции подзарядки электрических беспилотных летательных аппаратов на основе открытых контактных площадок [Текст] / В.С. Фетисов, Ш.Р. Ахмеров, Р.В. Сизоненко, Р.А. Красноперов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – №2. – С. 44-53.

4. Deploying Drones for the Enterprise: официальный сайт компании SkySense. – URL: <http://skysense.co>

5. Амелина М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10[Текст] / М.А. Амелина, С.А. Амелин. – Смоленск: НИУ МЭИ. – 2012. – 617 с.

**References**

1. Fetisov V. Continuous monitoring of terrestrial objects by means of duty group of multicopters [Text] / V. Fetisov, O. Dmitriyev, L. Neugodnikova, S. Bersenyov, I. Sakayev // Proceedings of XX IMEKO World Congress “Metrology for Green Growth”, 9-14 Sept. 2012, Busan, Republic of Korea. – P.86. – URL: [http://vositef.url.ph/index.files/PUBL/Fetisov\\_Dmitriyev\\_multicopters\\_final.pdf](http://vositef.url.ph/index.files/PUBL/Fetisov_Dmitriyev_multicopters_final.pdf).

2. Kemper P., Suzuki K., Morrison J. UAV Consumable Replenishment: Design Concepts for Automated Service Stations [Text] / P. Kemper, K. Suzuki, J. Morrison // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2011. – Vol. 61. – № 1. – Pp. 369-397. – URL: [http://www.researchgate.net/publication/220062239\\_UAV\\_Consumable\\_Replenishment\\_Design\\_Concepts\\_for\\_Automated\\_Service\\_Stations](http://www.researchgate.net/publication/220062239_UAV_Consumable_Replenishment_Design_Concepts_for_Automated_Service_Stations).

3. Фетисов В. С. Наземные станции подзарядки электрических беспилотных летательных аппаратов на основе открытых контактных площадок [Текст] / В.С. Фетисов, Ш.Р. Ахмеров, Р.В. Сизоненко, Р.А. Красноперов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – №2. – С. 44-53.

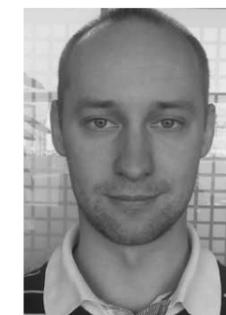
4. Deploying Drones for the Enterprise: официальный сайт компании SkySense. – URL: <http://skysense.co>

5. Амелина М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10[Текст] / М.А. Амелина, С.А. Амелин. – Смоленск: НИУ МЭИ. – 2012. – 617 с.



**Уразаков К.Р.**  
**Urazakov K.R.**

доктор технических наук,  
профессор, кафедра «Технологические машины и оборудование»  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,  
г. Уфа, Россия,



**Мухин И.А.**  
**Muhin I.A.**

кандидат технических наук  
главный специалист отдела охраны окружающей среды и пожарно-промышленной безопасности,  
ООО «НИПИ НГ ПЕТОН»,  
г. Уфа, Россия,



**Вахитова П.И.**  
**Vahitova R.I.**

кандидат технических наук,  
доцент, кафедра «Промышленная теплоэнергетика» ГБОУ ВПО «Альметьевский государственный нефтяной институт»,  
г. Альметьевск, Россия

УДК 622.692

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУЙНОГО НАСОСА**

В процессе добычи нефти нередко возникает проблема удаления газа из затрубного пространства скважины (кольцевое пространство между наружной поверхностью насосно-компрессорных труб и обсадной колонной).

Повышение давления в затрубном пространстве негативно сказывается на производительности, так как приводит к росту противодавления на пласт и, следовательно, к уменьшению притока жидкости к забою, оттеснению уровня жидкости до приема насоса, снижению его подачи или аварийному выходу из строя в следствие попаданию газа в центробежный насос.

Одна из причин увеличения затрубного давления – повсеместное применение на промыслах напорной системы, которое сопровождается ростом устьевых давлений скважин.

Снижение давления газа в затрубном пространстве является эффективной мерой по увеличению продуктивности скважины, поэтому в нефтяных компаниях наработан значительный опыт решения данной задачи.

Наибольшее распространение получили устьевые обратные клапаны, монтируемые на устьевой арматуре, однако у них есть ряд эксплуатационных недостатков.

Одной из основных проблем является то, что эти клапаны срабатывают только при условии повышения давления в затрубном пространстве до значения, превышающего давление в сборном трубопроводе. А поскольку давление в последнем зависит от множества факторов таких как: длина трубопровода, его геодезическая отметка, вязкость жидкости, и зачастую является высоким, в затрубном пространстве также поддерживается высокое давление. Также при низких температурах наружного воздуха они замерзают, что снижает их надежность.

Одним из предлагаемых решений по автоматическому снижению давления в затрубном пространстве является применение струйного насоса, обеспечивающего в процессе своего функционирования инъекцию газа из затрубного пространства выше динамического уровня в насосно-компрессорных трубах.

**Ключевые слова:** струйный насос, затрубное давление газа, нефтяная скважина, динамический уровень, газожидкостная смесь, газовый фактор, моделирование однофазного потока, инъекция газа.

**MODELING THE CHARACTERISTICS OF JET PUMP**

In the process of oil extraction a problem of the removal of gas from the annulus (the annulus between the outer surface of the tubing and the casing) is often appears.

Increasing the pressure in the annulus has a negative impact on performance, as it leads to an increase in pressure of the formation and, consequently, to a decrease in flow to the bottom, marginalization level of the liquid to the pump intake, a decrease in its supply or disaster damage in consequence of ingress of gas in the centrifugal pump.

One of the reasons for the increase in annulus pressure is a widespread use in the fields of pressure, which is accompanied by an increase wellhead of pressures wells.

Reducing the gas pressure in the annulus is an effective measure to increase the productivity of the well, so the oil companies have gained significant experience in solving this problem.

The most widely are used wellhead check valves, mounted on the wellhead, but they have a number of operational weaknesses.

One major problem is that these valves are activated only if the pressure rises in the annulus to a value greater than the pressure in the collecting duct. But as the pressure in the latter depends on many factors such as the length of the pipeline, its geodesic marker, the viscosity of the fluid, and often is high in the annulus is also supported by the high pressure. Also, at low ambient temperatures they freeze, that reduces their reliability.

One of the proposed solutions for the automatic reduction of pressure in the annulus is the usage of a jet pump, ensuring in the process of functioning of the gas injection from the annulus above the fluid level in tubing.

*Keywords:* jet pump, the annular gas pressure, oil well dynamic level, gas-liquid mixture, gas factor, simulation of single-phase flow, gas injection.

Абсолютное большинство нефте- и газодобывающих предприятий сталкивается с задачами повышения производительности нефтяных и газовых скважин, увеличения приемистости нагнетательных скважин, вводимых после процессов бурения и капитального ремонта, восстановления и увеличения значений коэффициента продуктивности и первоначальной проницаемости нефтяных и газовых скважин после проведения ремонтных работ.

Несмотря на явные преимущества компоновки скважины тандемной установкой для добычи нефти [1-4], как простота конструкции и относительная дешевизна ее исполнения, возникают сложности с подбором основных эксплуатационных параметров электроцентробежного насоса (ЭЦН) и струйного насоса.

С целью увеличения надежности установки погружного центробежного насоса в процессе эксплуатации разработан струйный аппарат для перепуска газа из затрубного пространства нефтяной скважины (патент РФ на изобретение №2517287), для предотвращения осложнений, возникающих при эксплуатации добывающих скважин, оборудованных установками ЭЦН с высоким давлением затрубного газа выше динамического уровня [5].

В отличие от конструкций, приведенных в работах [6,7] одна часть вышеупомянутого эжектора выполнена подвижной.

Изобретение рекомендовано к применению в нефтегазодобывающей промышленности и может быть использовано в добывающих скважинах, эксплуатируемых установками погружных электроцентробежных насосов, с целью перепуска газа

из затрубного пространства в колонну насосно-компрессорных труб (НКТ).

Струйный аппарат предназначен для улучшения условий эксплуатации установки погружного электроцентробежного насоса посредством увеличения значения коэффициента полезного действия.

Струйный аппарат, предназначенный для перепуска газа из затрубного пространства скважины в колонну НКТ, монтируется выше динамического уровня и связывает затрубное пространство с полостью колонны НКТ посредством обратного клапана. Струйный аппарат для перепуска затрубного газа представляет собой две симметричные части в продольном разрезе, одна из частей устанавливается с обратным клапаном неподвижно, а вторая часть может продольно перемещаться внутри колонны НКТ. Подвижная часть аппарата соединена посредством постоянных магнитов с подпружиненным снизу поршнем, и расположенным в параллельном с осью колонны НКТ цилиндре, нижняя часть его сообщается с затрубным пространством, а верхняя – с полостью колонны НКТ.

В процессе эксплуатации установки ЭЦН наблюдается разгазирование продукции пласта на приеме погружного насоса, при этом часть затрубного газа попадает в полость установки ЭЦН и по колонне НКТ поднимается на дневную поверхность, а другая часть газа попадает в затрубное пространство и скапливается над динамическим уровнем, увеличивая давление газа. При возрастании давления затрубного газа происходит воздействие его через отверстие на нижний торец поршня. Под действием сил пружины и давления газа, превыша-

ющего давление жидкости в пласте, созданное через отверстие, поршень поднимается вверх, увлекая за собой через постоянные магниты подвижную часть струйного аппарата для перепуска газа из затрубного пространства. При достижении подвижной части крайнего верхнего положения струйный аппарат начинает работать в рабочем режиме, понижая давление в суживающемся канале, при этом обратный клапан открывается, и затрубный газ перепускается в колонну НКТ, понижая

давление газа в затрубном пространстве. После понижения давления газа подвижная часть струйного аппарата перемещается вниз под собственным весом, увлекая при этом за собой поршень через постоянные магниты, сжимает пружину. Соответственно проходное сечение между неподвижной и подвижной частями струйного аппарата возрастает, соответственно гидравлическое сопротивление пластовой жидкости, движущейся по колонне НКТ, становится меньше (рисунок 1).

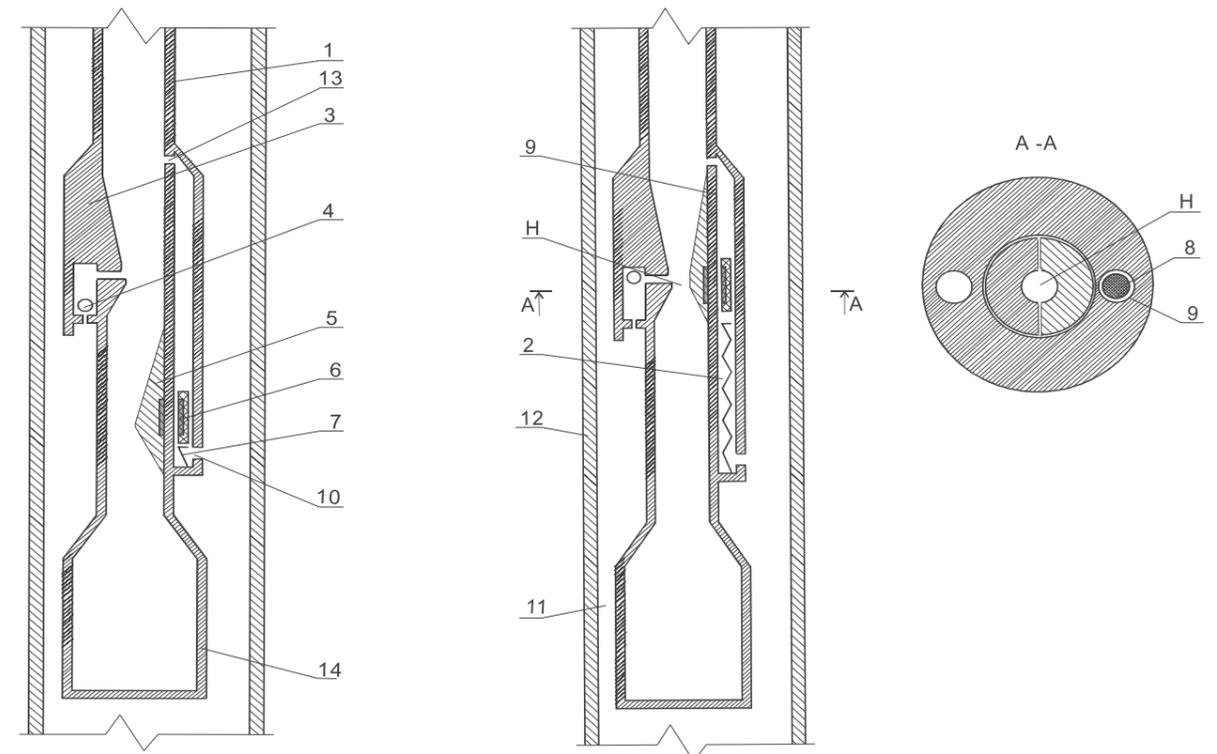


Рис. 1. Струйный аппарат для перепуска затрубного газа:

- 1 – колонна НКТ; 2 – подпоршневая полость; 3 – неподвижная симметричная половина; 4 – обратный клапан;
- 5 – подвижная симметричная половина; 6 – постоянный магнит; 7 – пружина; 8 – поршень; 9 – цилиндр;
- 10, 12 – отверстие; 11 – затрубное пространство; 12 – обсадная колонна; 14 – УЭЦН; Н – сужение

Применение струйного аппарата для перепуска газа из затрубного пространства в колонну НКТ способствует снижению давления затрубного газа, при этом повышая уровень пластовой жидкости над погружным насосом в скважине. В свою очередь, это позволяет увеличить дебит нефтяной скважины, исключить образование гидратных пробок в затрубном пространстве, повысить КПД установки ЭЦН, уменьшить глубину подвески погружной установки и снизить расход НКТ, увеличить межремонтный период работы нефтяной скважины.

В своей работе [8] авторы предлагают теоретическое обоснование выбора параметров ЭЦН и струйного насоса.

Основной задачей является численный расчет перепада давления на сопле струйного насоса, получение местных гидравлических сопротивлений и установление сил, влияющих на конструкцию струйного насоса в результате сужения проходного сечения канала, а также оптимизация геометрических характеристик канала струйного насоса.

Для численного решения задачи был выбран пакет ANSYS 14.5.

Задача решалась в симметричной постановке. Работа агрегата рассматривалась в закрытом и открытом положении (рисунок 2,3).

Входными параметрами для моделирования струйного насоса являются:

диаметр насосных труб – 50,7 мм;  
 давление газа в затрубном пространстве 20 атм – начало работы струйного насоса, 10 атм – конец работы;

плотность жидкости – 870 кг/м<sup>3</sup>;  
 температура среды – 25°C;  
 вязкость жидкости – 7 мПа·с;  
 полное давление на входе – 2,5 МПа;  
 статическое давление на выходе – 0,6 МПа.

Расчет велся для двумерной расчетной области. В контактных областях была задана шероховатость стенки с коэффициентом 0,2. Для упрощения решения, было принято решение о построении пары расчетных моделей, когда подвижная половина резьбы находится в нижней части и, соответственно, струйный насос не функционирует, и ситуации, когда подвижный элемент поднят пружиной – в этом случае струйный насос находится в режиме функци-

онирования, остальные элементы, не влияющие на расчет, упрощены.

Для более корректного расчета процессов, происходящих у стенок (течение Пуазейля, течение Куэтта-Тейлора и т.п.) был применен инструмент «Инфляция» с измельчением пристеночных ячеек до размера 10<sup>-3</sup> мм.

Пластовая газожидкостная смесь при входе в струйный аппарат имеет давление  $P_{вх}$ . Проходя через сопловое устройство, диаметр которого равен 5 мм, увеличивается ее скорость, в результате этого при входе в камеру приема образуется пониженное давление  $P_{вх.н}$ . За счет давления затрубного газа в скважине, происходит процесс инжекции газа в струйный аппарат. Далее происходит выравнивание скорости течения газожидкостной смеси с давлением  $P_{вых}$ .

В процессе моделирования в первом приближении был рассмотрен однофазный поток. В дальнейшем для изучения влияния газового фактора на режим работы струйного насоса было выполнено три расчета с увеличением объемного содержания газа в подаче до 20% об.

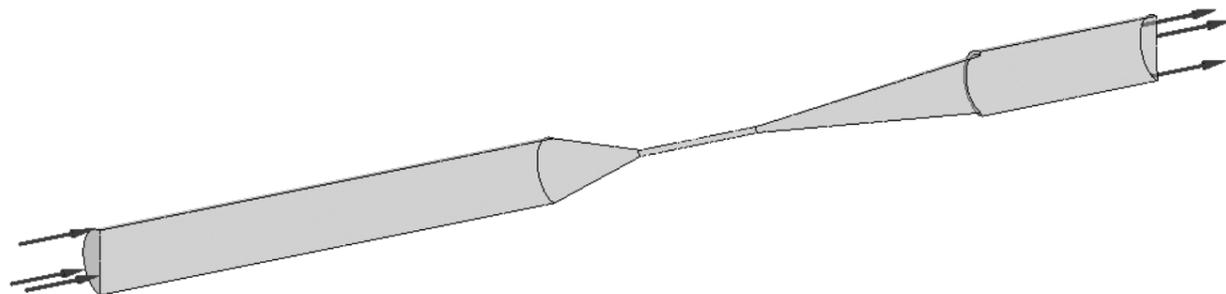


Рис. 2. Расчетный домен. Струйный насос в рабочем положении

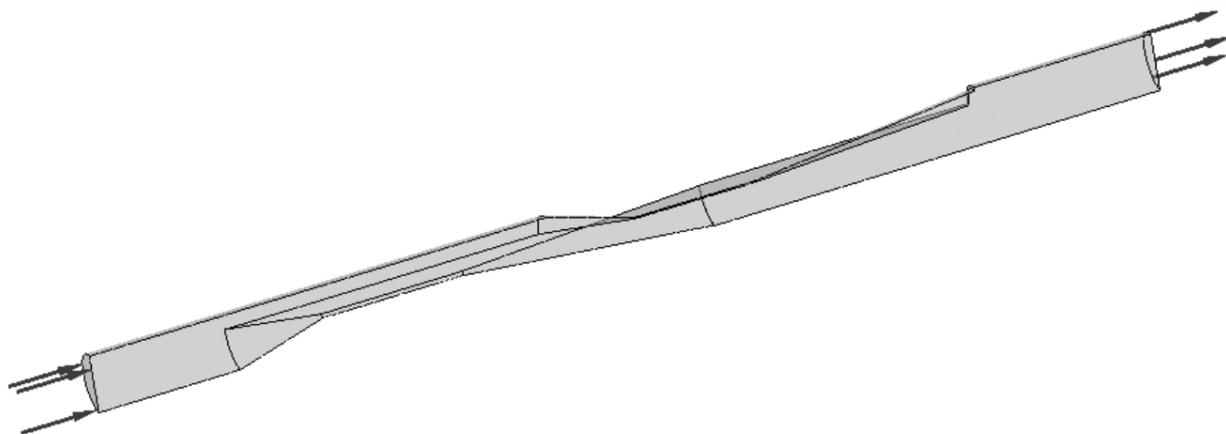


Рис. 3. Расчетный домен. Струйный насос в открытом положении

На рисунках 4, 5 представлены сеточные модели насоса в закрытом и открытом положении соответственно, содержащие ~ 323 и 493 тыс. ячеек.

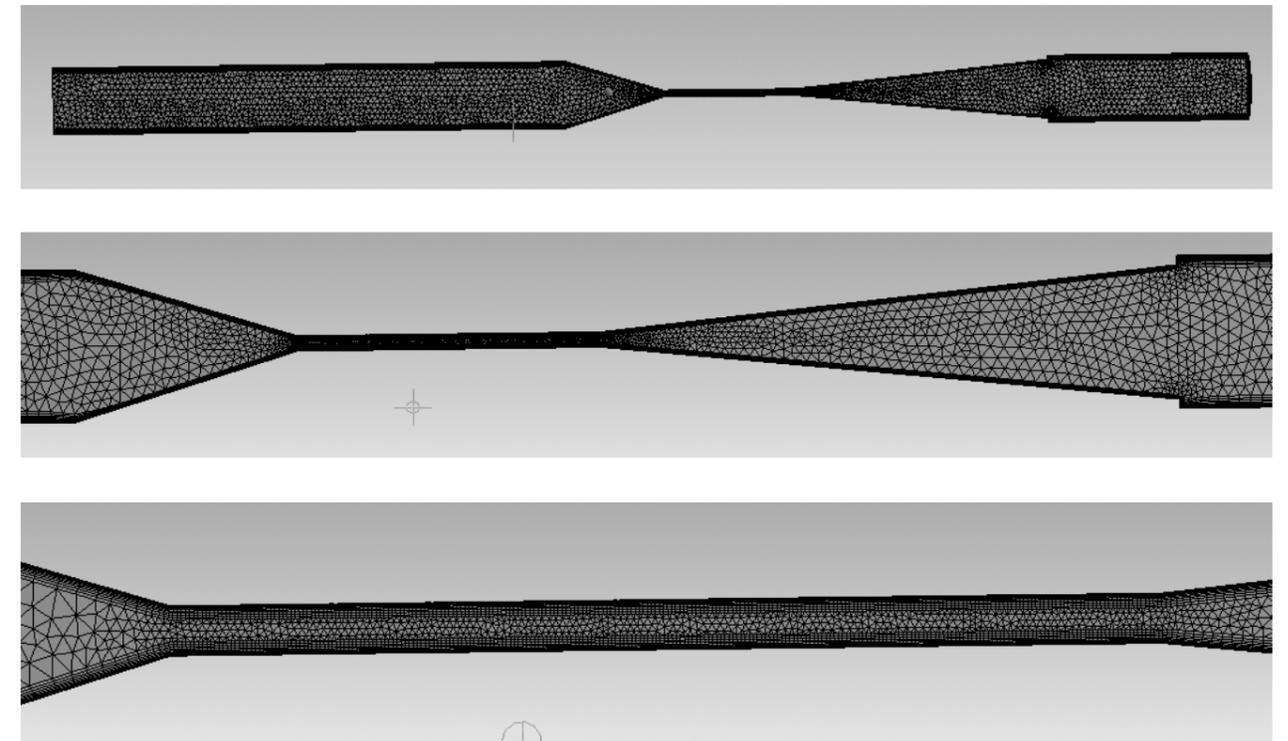


Рис. 4. Сеточная модель насоса в закрытом положении

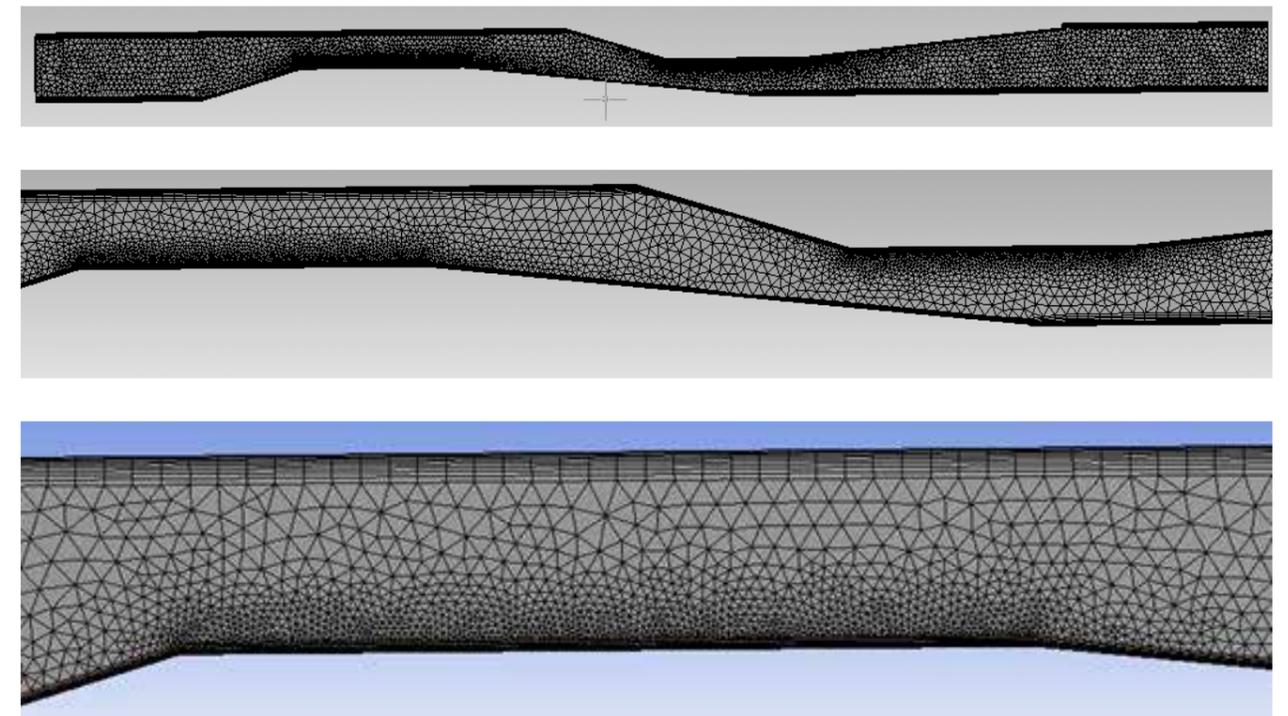


Рис. 5. Сеточная модель насоса в открытом положении

На рисунках 6-11 представлены результаты расчетов. На рисунках 6-8 струйный насос находится в рабочем (закрытом) положении: сила, действующая на подвижную часть насоса, составляет 1857,31 Н или 189,3 кгс.

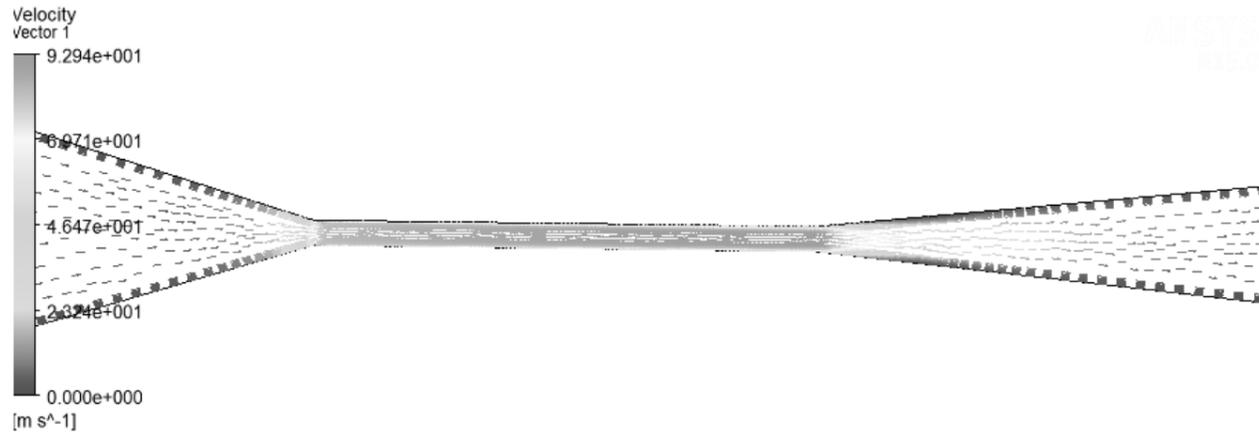


Рис. 6. Векторное поле скоростей

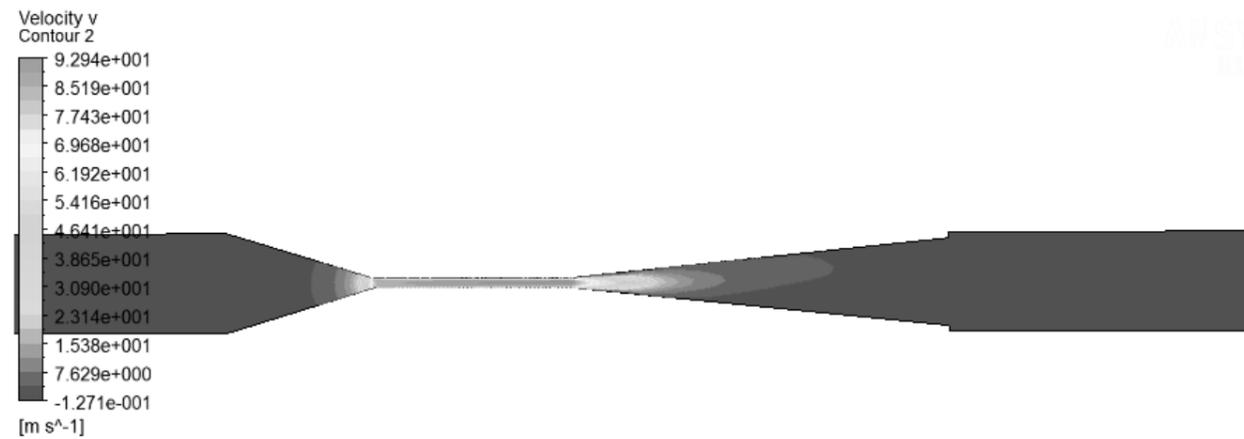


Рис. 7. Распределение осевой компоненты скорости

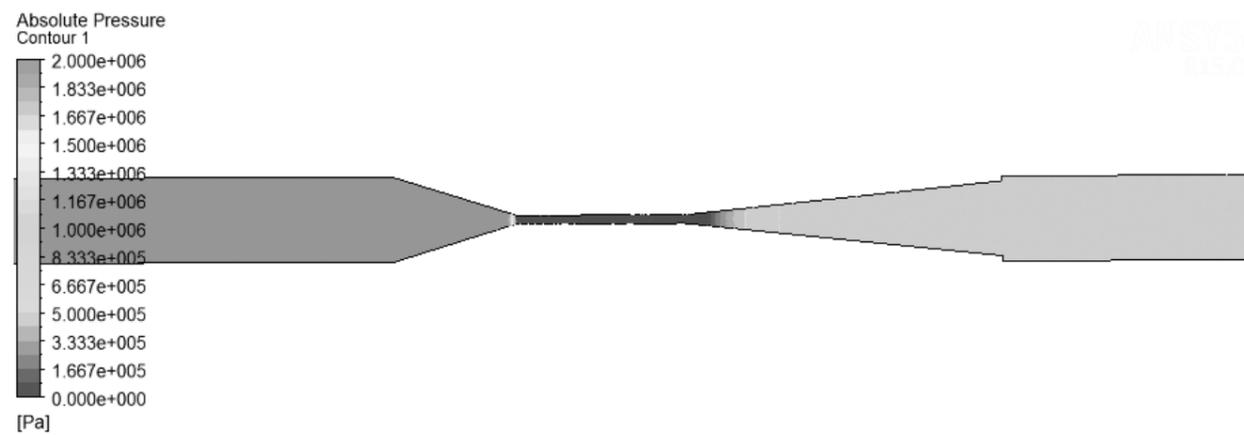


Рис. 8. Поле абсолютного давления

На рисунках 9-11 струйный насос находится в нерабочем (открытом) положении: сила, действующая на подвижную часть насоса, составляет 3584,54 Н или 364,6 кгс.

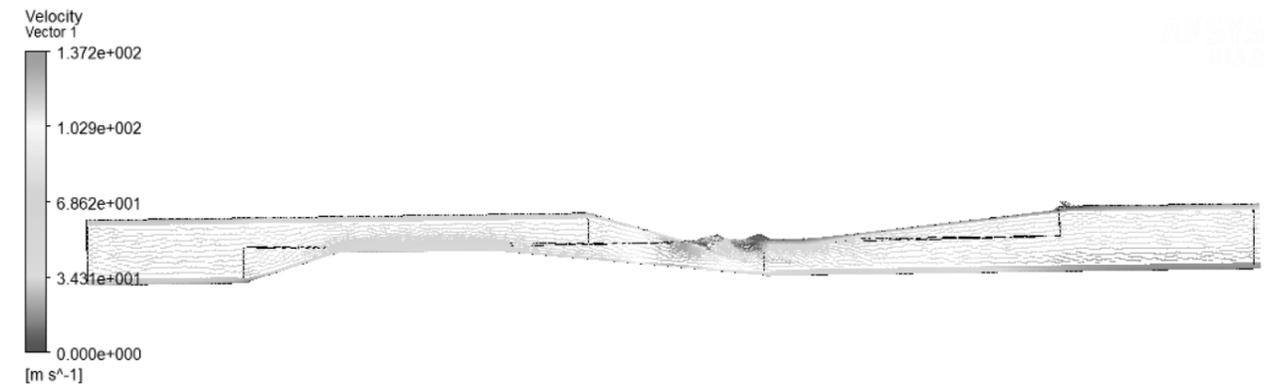


Рис. 9. Векторное поле скоростей



Рис. 10. Распределение осевой компоненты скорости

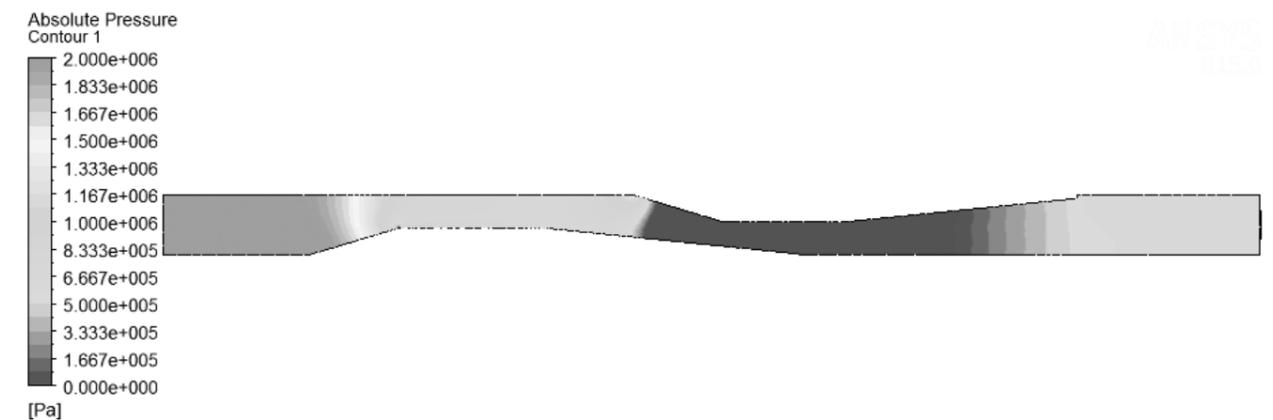


Рис. 11. Поле абсолютного давления

В открытом положении насоса силы распределяются следующим образом: в лобовой части действует сила 1107 Н, а в диффузорной части – 1210,8 Н. Высокая сила в диффузорной объясняется разрежением потока (рисунок 12).

Также при моделировании однофазного потока наблюдалось резкое падение давления в области диффузора, что в свою очередь может означать наличие развитой области кавитации.

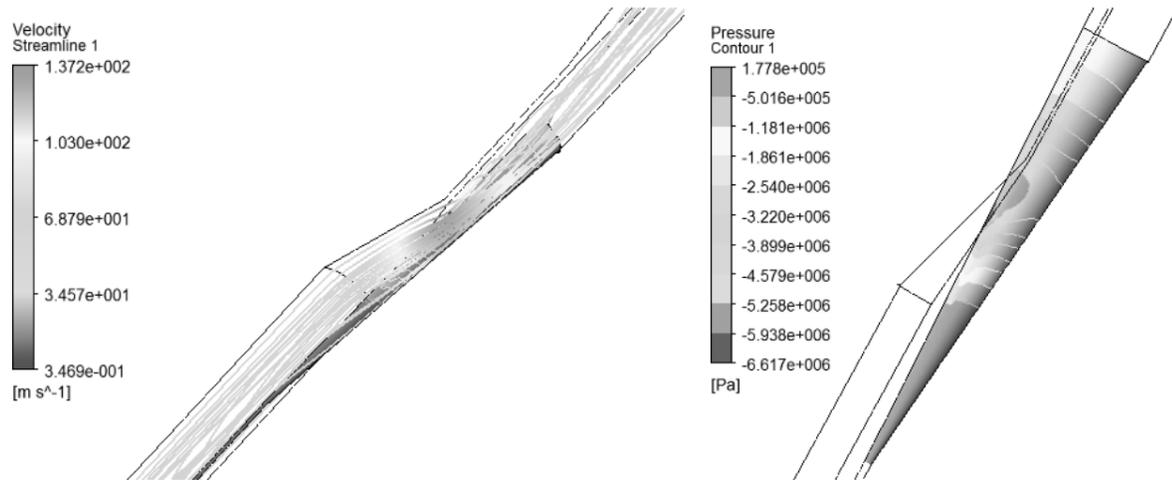


Рис. 12. Разряжение потока при обтекании половины струйного насоса

На основании вышеизложенного искомая результирующая величина  $F_{сдвига}$  – сила, действующая на подвижную часть струйного насоса:

$$F_{сдвига} = (F_{полная(фронт)} - F_{mg} + F_{П} - F_{полная(тыльная)}),$$

где:  $F_{полная(фронт)}$  – полная сила, действующая на подвижную часть струйного насоса в направлении движения жидкости (фронтальная);  
 $F_{mg}$  – сила, развиваемая весом подвижной части с утяжелителем;  
 $F_{П}$  – сила, развиваемая пружиной;  
 $F_{полная(тыльная)}$  – полная сила, действующая на подвижную часть струйного насоса в направлении, противоположном движению жидкости (тыльная), как результат падения давления жидкости в диффузоре (рисунок 13).

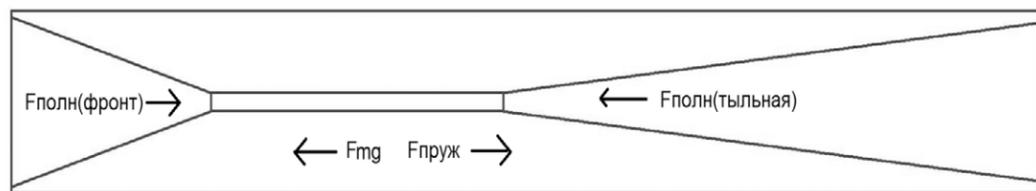


Рис. 13. Проекция сил в струйном насосе

Далее был произведен проверочный расчет моделирования двухфазного потока жидкости с объемом газовой фазы до 20% об. (рисунок 14). Результаты расчета приведены в таблице 1.

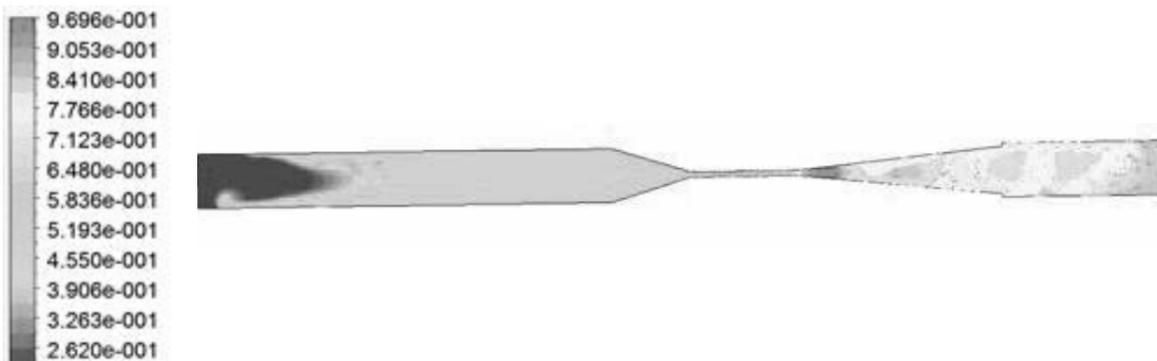


Рис. 14. Распределение объемного отношения газовой фазы, об.%

Параметры функционирования струйного насоса в закрытом положении в зависимости от объемного содержания газовой фазы

Газовая фаза, об.%	Падение давления в рабочей части, МПа	Сила, действующая на подвижную часть
20%	5,2	1879.64 Н
15%	5,7	2098.41 Н
10%	6,7	2499.91 Н
5%	8,6	2990.70 Н

Также путем последовательных решений с различными геометрическими размерами были получены оптимальные значения геометрических параметров сопла. Диаметр сужения, исходя из опорных значений и граничных условий, получен 5,034 мм, угол сужения = 17%, угол расширения = 6%.

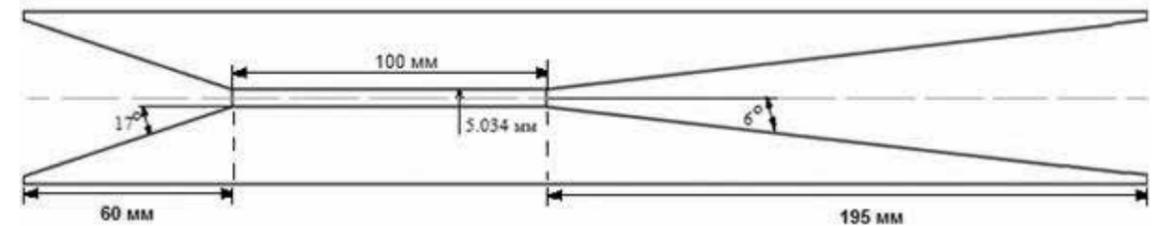


Рис. 15. Геометрические характеристики струйного насоса

В работе проведено численное исследование струйного насоса для однофазной жидкости и для газожидкостной смеси до 20% об. Получены значения силы, действующей на подвижную часть

струйного насоса, что позволяет провести подбор пружины и компенсирующего груза для оптимального функционирования струйного насоса.

Список литературы

1. Уразаков К.Р. Методика расчета параметров струйного насоса при совместной эксплуатации с ЭЦН [Текст] / К.Р. Уразаков, Р.И. Вахитова, Д.А. Сарачева // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 3. – С. 134-146.
2. Дроздов А. Н. Применение насосно-эжекторных систем «Тандем» на нефтяных месторождениях Российской Федерации [Текст] / А.Н. Дроздов, В.С. Вербицкий, А.В. Деньгаев, Д.Н. Ламбин, А.М. Кочергин, В.В. Курятников // Нефтепромышленное дело. – 2004. – № 3. – С. 31-46.
3. Брилл Дж.П. Многофазный поток в скважинах [Текст] / Дж.П. Брилл, Х. Мукерджи. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. – 384 с.
4. Сазонов Ю. А. Расчеты струйных насосов. Учебное пособие [Текст] / Ю.А. Сазонов, Р.В. Сазонова. – М.: ГАНГ, 1997. – 52 с.
5. Патент РФ на изобретение № 2517287, МПК E21B 43/12, F04F 5/00 Струйный аппарат для перепуска затрубного газа [Текст] / К.Р. Уразаков, Р.И. Вахитова, Д.А. Сарачева, Э.В. Абрамова; патентообладатель: Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального

6. Патент РФ на изобретение № 2318983, МПК E21B34/06 Автоматическое устройство для перепуска затрубного газа [Текст] / К.Р. Уразаков, В.А. Молчанова, Д.В. Маркелов, В.В. Горбунов; патентообладатель: ООО «РН-УфаНИПИнефть» (RU) – № 2007105929/03. – заявлено 07.02.2007 г. – опубл. 10.03.2008 г. – Бюл. №7.
7. Патент РФ на изобретение № 2305171, МПК E21B34/06 Автоматическое клапанное устройство для перепуска затрубного газа [Текст] / К.Р. Уразаков, В.А. Молчанова, Д.В. Маркелов, О.А. Тяпов, В.В. Дмитриев, И.И. Иконников; патентообладатель: ООО «РН-УфаНИПИнефть» (RU) – № 2006102229/03. – заявлено 26.01.2006 г. – опубл. 27.08.2007 г. – Бюл. № 24.
8. Уразаков К. Р. Математическая модель штанговой установки с эжектором для откачки газа из затрубного пространства газа [Текст] / К.Р. Уразаков, В.А. Молчанова, А.С. Топольников // Нефть. Газ. Новации. – 2007. – № 6. – С. 54-60.

## References

1. Urazakov K. R. Metodika rascheta parametrov strujnogo nasosa pri sovmestnoj jekspluatcii s JeCN [Text] / K.R. Urazakov, R.I. Vahitova, D.A. Saracheva // Jelektronnyj nauchnyj zhurnal «Neftegazovoe delo». – 2011. – № 3. – S. 134-146.
2. Drozdov A. N. Primenenie nasosno-jezhektornyh sistem «Tandem» na nefjtjanyh mestorozhdenijah Rossijskoj Federacii [Text] / A.N. Drozdov, V.S. Verbickij, A.V. Den'gaev, D.N. Lambin, A.M. Kochergin, V.V. Kurjatnikov // Neftepromyslovoe delo. – 2004. – № 3. – S. 31-46.
3. Brill Dzh. P. Mnogofaznyj potok v skvazhinah [Text] / Dzh.P. Brill, H. Mukerdzhi. – Moskva-Izhevsk: Institut komp'juternyh issledovanij, 2006. – 384 s.
4. Sazonov Ju.A. Raschety strujnyh nasosov. Uchebnoe posobie [Text] / Ju.A. Sazonov, R.V. Sazonova. – M.: GANG, 1997. – 52 s.
5. Patent RF na izobrenie №2517287, MPK E21B 43/12, F04F 5/00 Strujnyj apparat dlja perepuska zatrubnogo gaza [Text] / K.R. Urazakov, R.I. Vahitova, D.A. Saracheva, Je.V. Abramova; patenotoobladatel': Gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija "Al'met'evskij gosudarstvennyj nefjtjanij institut" (RU) – №2012149306 /03. – zajavleno 19.11.2012 g. – opubl. 27.05.2014 g. – Bjul. № 15.
6. Patent RF na izobrenie №2318983, MPK E21B34/06 Avtomaticheskoe ustrojstvo dlja perepuska zatrubnogo gaza [Text] / K.R. Urazakov, V.A. Molchanova, D.V. Markelov, V.V. Gorbunov; patenotoobladatel': OOO "RN-UfaNIPIneft" (RU) – №2007105929/03. – zajavleno 07.02.2007 g. – opubl. 10.03.2008 g. – Bjul. №7.
7. Patent RF na izobrenie №2305171, MPK E21B34/06 Avtomaticheskoe klapannoe ustrojstvo dlja perepuska zatrubnogo gaza [Text] / K.R. Urazakov, V.A. Molchanova, D.V. Markelov, O.A. Tjapov, V.V. Dmitriev, I.I. Ikonnikov; patenotoobladatel': OOO "RN-UfaNIPIneft" (RU) – №2006102229/03. – zajavleno 26.01.2006 g. – opubl. 27.08.2007 g. – Bjul. № 24.
8. Urazakov K. R., Molchanova V. A., Topol'nikov A. S. Matematicheskaja model' shtangovoj ustanovki s jezhektorom dlja otkachki gaza iz zatrubnogo prostranstva gaza [Text] / K.R. Urazakov, V.A. Molchanova, A.S. Topol'nikov // Neft'. Gaz. Novacii. – 2007. – № 6. – S. 54-60.



**Бочкарев А.В.**  
**Вочкарев А.В.**

магистрант,  
кафедра «Электроснабжение  
и электротехника»,  
ФГБОУ ВО «Тольяттинский  
государственный университет»,  
Россия, г. Тольятти.



**Бородин О.А.**  
**Borodin O.A.**

аспирант, кафедра «Электро-  
снабжение и электротехника»,  
ФГБОУ ВО «Тольяттинский  
государственный  
университет», Россия,  
г. Тольятти.



**Петуни Ю.П.**  
**Petunin Yu.P.**

кандидат технических наук,  
доцент, кафедра «Электро-  
снабжение и электротехника»,  
ФГБОУ ВО «Тольяттинский  
государственный  
университет», Россия,  
г. Тольятти.

УДК 621.313.323

## ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ МЕХАТРОННОГО ТОКАРНОГО МОДУЛЯ

Применение мехатронных модулей с линейными двигателями магнитоэлектрического типа в токарном оборудовании в качестве привода перемещения резца для обработки сложных профилей вращения является задачей весьма актуальной, так как использование в настоящее время копируемых многошпиндельных и многолезцовых станков, подача инструмента в которых осуществляется по копиру с синхронизацией относительно детали, или с помощью вращающихся дисков с резцами, имеющими сложную кинематику движения, предполагает высокую трудоемкость и стоимость изготовления копира; снижение точности обработки деталей при износе копира и механических передач.

Целью статьи является модернизация используемого на токарных станках фирмы «Cross Company» мехатронного модуля с линейными двигателями фирмы «Widding & Lewis» путем исследования математической модели двигателя для определения параметров магнитопровода и обмотки двигателя, необходимых для его ремонта.

В статье приведен анализ конструктивных недостатков двигателей фирмы «Widding & Lewis», определены задачи, решение которых необходимо для их устранения. Математическая модель линейного магнитоэлектрического двигателя составлена в принятых допущениях по магнитной системе и обмотке двигателя с учетом характеристик постоянного магнита марки NdFeB N42, а параметры электродвигателя определены с учетом потребного усилия резания. На основании анализа уравнений математической модели в программной среде MATLAB смоделирован двигатель с параметрами, обеспечивающими оптимальные электромеханические характеристики. Экспериментальные исследования линейного электродвигателя мехатронного токарного модуля с достаточной точностью подтверждают результаты теоретических исследований.

*Ключевые слова:* мехатронный токарный модуль, акустический двигатель, обработка поршня, математическая модель линейного двигателя, индуктор, якорь, обмотка.

## LINEAR MOTOR OF MECHATRONIC LATHE MODULE

The use of mechatronic modules with linear motor moving coil type in lathe equipment as an actuator for moving the cutter for machining complex profiles of the rotation is a very urgent task, because the use of currently copying

machines and multi-spindle gang, feed tool is carried out by the copier with synchronization relative to the part or by using rotating discs with cutters with complex kinematics motion involves high complexity and manufacturing cost of the copier; reducing the machining accuracy while the copier and automatic transmission wear.

The aim of the article is a mechatronic module modernization used on the lathes by the company "Cross Company" together with linear motors by the company "Widding & Lewis". Modernization is done by engine mathematical model studying to determine magnetic circuit and windings parameters necessary for repair.

The analysis of design flaws of the engines by the company "Widding & Lewis" is presented in the article, tasks are defined decision of which is necessary for their elimination. A mathematical model of the linear electromagnetic motor is made of the above assumptions on the magnetic system and the coil of the motor based on the characteristics of the permanent magnet NdFeB N42 brand, and the parameters of the motor are determined taking into account the required cutting forces. Engine was simulated based on the analysis of the equations mathematical model in the software MATLAB. Engine was simulated with the parameters that ensure optimal electromechanical performance. Linear motor of mechatronic lathe module experimental researches confirm the results of theoretical studies with sufficient accuracy.

*Key words:* mechatronic module lathe, acoustic actuator, processing piston, mathematical model of the actuator, inductor, armature, winding

Развитие технологий высокоскоростной обработки, применяемой в металлорежущих станках, роботах и производственных машинах, предъявляет высокие требования к динамике и точности перемещения осей подач. Перспективной технологией построения таких осей в настоящее время является использование мехатронных модулей с линейными двигателями прямого действия, позволяющими исключить промежуточные кинематические звенья (редукторы, коробки передач, устройства преобразования вращательного движения в линейное). Это позволяет решать задачу максимального сочленения, сращивания источника механической энергии – электродвигателя и исполнительного механизма, а отсутствие механических передач позволяет исключить кинематические погрешности движения, а также нелинейности и упругости, входящие в канал передачи механической энергии к рабочему органу.

При токарной обработке деталей вращения сложного профиля, например, профилирующих поверхностей поршня современных двигателей внутреннего сгорания, при которой, для обеспечения требуемой формы поршня при достижении рабочей температуры в процессе эксплуатации, профилю поршня придается эллиптическая форма, а фасу – бочкообразная, применяются копировальные, многшпиндельные и многолезцовые станки, подача инструмента в которых осуществляется по копиру с синхронизацией относительно детали, или с помощью вращающихся дисков с резцами, имеющими сложную кинематику движения. Основными недостатками таких систем являются: высокая

трудоемкость и стоимость изготовления копира; снижение точности обработки деталей при износе копира и механических передач.

Для исключения описанных выше недостатков и обеспечения требуемой точности обработки, применяются системы электропривода с линейным двигателем непосредственного возвратно-поступательного преобразующего механического элемента и позволяющие получить наиболее высокие показатели точности и производительности практически во всех видах механообработки (фрезерование, точение, сверление, шлифование и др.).

В связи с вышесказанным данная работа, рассматривающая вопросы теории моделирования, экспериментальных исследований и ремонта линейного двигателя мехатронного токарного модуля является актуальной.

Вопросам изучения линейных двигателей посвящены работы Сакае Ямамура [1], О.Н. Веселовского [2], М.Я. Хитерер и И.Е. Овчинникова [3] и др.

На токарных станках фирмы «Cross Company», для обработки сложного профиля поршня, в качестве привода перемещения резца применен мехатронный токарный модуль, конструкция которого показана на рис. 1 с двигателями фирмы «Widding & Lewis». Токарный модуль состоит из линейного высокочастотного двигателя фирмы «Widdmg & Lewis» 1; энкодера – оптической линейки 2; датчика скорости 3; платы преобразования сигналов датчика 4; четырехплоскостной системы механических подвесов 5.

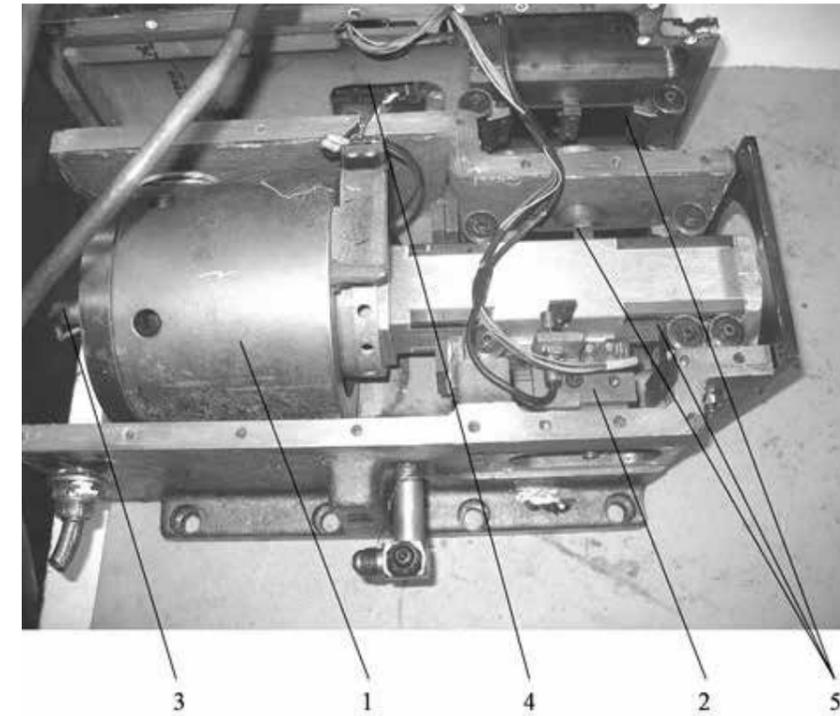


Рис. 1. Устройство мехатронного токарного модуля

В качестве линейного двигателя применен линейный двигатель, конструкция которого показана на рис. 2. При этом устройство данного двигателя аналогично устройству магнитной системы низкочастотного динамика.

Данный модуль обеспечивает подачу резца синхронно с вращением заготовки, благодаря чему станок выполняет сразу несколько технологических

операций, обеспечивая чистовую обработку поршня по полному циклу:

- создание бочки поршня в аксиальном направлении;
- создание эллипса поршня в диаметральной направлении;
- создание каналов под установку поршневых колец.

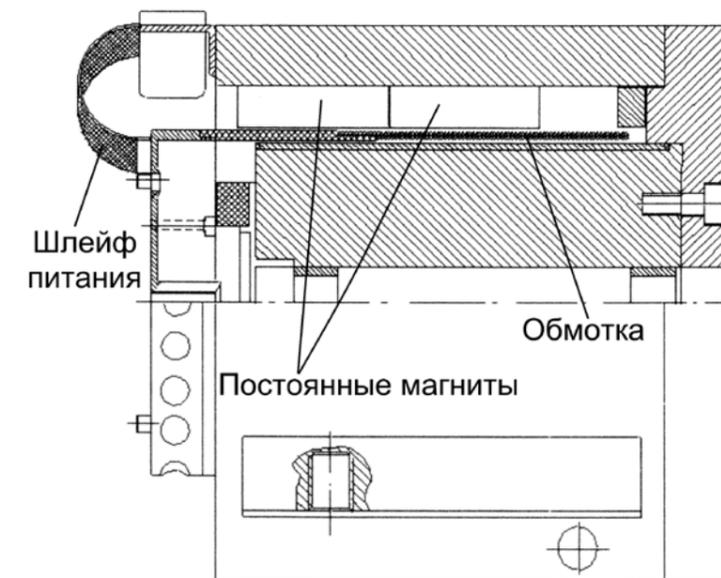


Рис. 2. Конструкция линейного двигателя акустического типа

В процессе эксплуатации токарного модуля были выявлены следующие проблемы:

– частое выгорание обмотки двигателя (рис. 3), вследствие перегрева в процессе работы, приводящее к выходу модуля из строя;



Рис. 3. Поврежденная обмотка двигателя из-за перегрева

Перемотка двигателя в 90% случаев приводит к его некорректной работе: недостаточная электромагнитная сила, снижение скорости перемещения якоря, повышенный шум низкого тона, что приводит к длительным простоям оборудования.

В связи с вышесказанным, целью работы является определение параметров двигателя и его обмотки, необходимых для выполнения ремонта.

– отсутствуют расчетные данные двигателя, необходимых для обеспечения ремонтных работ по его восстановлению.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– составить уравнения математической модели двигателя;

– на основе разработанной математической модели определить параметры обмотки двигателя.

Требуемое усилие, развиваемое двигателем, при токарной обработке поршня определяется следующим образом:

$$F_{X,Y,Z} = 10C_p t^X S^Y v^n K_{MP} K_{\varphi} K_{\gamma p} K_{\gamma r} = 10 \cdot 40 \cdot 0,04^1 \cdot 1,4^{0,75} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,08 \cdot 1,25 \cdot 0,87 = 96 \text{ Н} \quad (1)$$

где  $t=0.04$  мм – глубина врезания;  $S=1.4$  мм/об – подача резца;  $C_p=40$ ;  $x=1$ ;  $y=0,75$ ;  $n=0$ ;  $K_{MP}=1$ ;  $K_{\varphi}=1.08$ ;  $K_{\gamma p}=1.25$ ;  $K_{\gamma r}=0.87$  – табличные коэффициенты, зависящие от параметров резца и обрабатываемого материала.

При составлении уравнений приняты следующие допущения:

– воздушный зазор двигателя считаем равномерным по всей длине;

Уравнение линейного двигателя акустического типа в относительных величинах имеют вид [4,5]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i \\ v \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_{\vartheta}} & -\frac{1}{\tau_{\vartheta}} & 0 \\ -\frac{1}{\tau_M} & 0 & -\frac{K_1}{\tau_M} \\ 0 & K_2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i \\ v \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_{\vartheta}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau_M} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ q \end{bmatrix} \quad (2)$$

Входящие в уравнение (1), базовые постоянные и относительные величины определяются следующим образом:

$$I_a = \frac{U_i}{R_a} \quad \text{– базовая величина тока подвижной части (якоря);}$$

$$F_a = C_{MW} I_a \quad \text{– базовая величина усилия, развиваемого двигателем;}$$

$$v_0 = \frac{U_H}{C_{MW}} \quad \text{– базовая скорость движения якоря;}$$

$$i = \frac{i_a}{I_a} \quad \text{– относительная величина тока катушки (якоря);}$$

$$v = \frac{v_a}{v_0} \quad \text{– относительная величина линейной скорости движения якоря;}$$

$$X = \frac{X_a}{b_M} \quad \text{– относительная величина линейного перемещения якоря;}$$

$$u = \frac{U_a}{U_i} \quad \text{– относительная величина напряжения якоря;}$$

$$q = \frac{F_L \cdot R_a}{C_{MW} \cdot U_H} \quad \text{– относительная величина силы внешнего сопротивления;}$$

$$\tau_{\vartheta} = \frac{L_a}{R_a} \quad \text{– электрическая постоянная времени якорной цепи;}$$

$$\tau_M = m \cdot \frac{R_a}{C_{MW}^2} \quad \text{– электромеханическая постоянная времени двигателя;}$$

$$K_1 = \frac{C_M \cdot b_m \cdot R_a}{C_{MW} \cdot U_H}, K_2 = \frac{U_H}{C_{MW} \cdot b_m} \quad \text{– обобщенные коэффициенты.}$$

Значения коэффициентов, входящих в формулы для определения базовых и относительных величин могут быть определены следующим образом.

Активное сопротивление подвижной части (якоря):

$$R_a = \rho_t \cdot \frac{w l_a}{S_{PP}},$$

где  $\rho_t = 1,74(1 + 0,004(t^0 - 20^0)) \times 10^{-8}$  – удельная проводимость меди в нагретом состоянии,  $w$  – число витков обмотки подвижной части (якоря),  $l_a$  – длина витка катушки,  $S_{PP}$  – диаметр провода катушки.

Коэффициент главной движущей силы, зависящей от тока рабочей обмотки, параметров магнита (FM) и координаты  $x$ :

$$C_{MW} = k_{MW} \frac{2\mu_0 l_a (H_C L_M)^2}{\pi k_{\mu} a} \frac{w}{H_C L_M},$$

где  $k_{MW} = 1 - \alpha \cdot \ln\left(1 + \frac{1}{2\alpha}\right)$  – коэффициент,

учитывающий размеры подвижной части двигателя;  $\mu_0$  – магнитная проводимость воздушного зазора;

$$a = \frac{1}{\pi} \left( \frac{\mu_0 \cdot L_M}{\mu_{rt}} + 2\delta \right) \quad \text{– условная длина}$$

магнита;  $H_C$  – коэрцитивная сила магнита;  $L_m$  – толщина магнита;  $k_{\mu}$  – коэффициент насыщения магнита;

$\alpha = \frac{1}{\pi b_M} \left( \frac{\mu_0 \cdot L_M}{\mu_{rt}} + 2\delta \right)$  – относительное значение длины магнита;  $b_M$  – длина магнита;  $\mu_{rt}$  – магнитная проводимость магнита.  $\delta$  – величина воздушного зазора.

Индуктивность обмотки подвижной части (якоря):

$$L_a = G_0 w^2,$$

где  $G_0 = G_\delta + G_{\delta 1} + G_\sigma$  – эквивалентная проводимость для потока, созданного обмоткой и сцепленного с ней определяется в виде;  $G_\delta$  – проводимость рабочего зазора, зависящего от площади сечения

$l_m b_a$  и длины;  $\Delta = L_M + 2\delta(L_M + 2\delta)$ ;  $G_{\delta 1}$  – проводимость для потоков «выпучивания» (проводимость между гранями, боковыми поверхностями и гранями магнитопровода);  $G_\sigma$  – проводимость для потоков рассеяния, не проходящих через магнитный зазор.

Эта проводимость эквивалентна проводимости окна и может быть определена следующим образом:

$$G_0 = 1.5 \cdot \mu_0 \frac{\pi D_M \cdot b_a}{\Delta},$$

где ширина магнитопровода  $b_a = (1 \dots 1,05)b_M$ ;  $D_M$  – внутренний диаметр магнита.

Коэффициент реактивной силы, не зависящей от тока в рабочей обмотке, направленной встречно или согласно основной и определяемой параметрами магнита FM и его положением в воздушном зазоре (координата x):

$$C_M = k_M \frac{2\mu_0 i F_M^2}{\pi k_\mu a b_M}$$

где  $k_M = \alpha \cdot (2 + k_\mu) \cdot \ln \left[ 1 - \left( \frac{1}{1 + 4\alpha} \right)^2 \right]$  –

безразмерный коэффициент магнитной пружины.

Из представленных выше уравнений видно, что и скорость и развиваемая сила двигателя зависят от параметров обмотки, которые определяются электрической постоянной якорной цепи. Для отыскания оптимального соотношения параметров электрической части двигателя было проведено исследование зависимости тягового усилия и быстродействия двигателя от значения электриче-

ской постоянной якорной цепи. Для этого систему уравнений (1) представили в операторной форме:

$$\begin{cases} i(s) = \frac{1}{\tau_\varepsilon + 1} [u(s) - v(s)] \\ v(s) = \frac{1}{\tau_M s} [i(s) - K_1 \cdot X(s) - f(s)] \\ X(s) = \frac{K_2}{s} v(s) \end{cases} \quad (2)$$

В программной среде MATLAB на основе уравнений (2) был смоделирован двигатель со следующими параметрами: напряжение питания  $U_{пит}=24В$ , скорость перемещения  $v=2$  м/с, усилие, развиваемое двигателем  $F_a=96$  Н, номинальный ток якоря  $I_n=6А$ . Полученные результаты представлены на рис. 4.

Из приведенных на рис. 4. графиков видно, что оптимальные характеристики двигателя достигаются при таком соотношении параметров обмотки, которое обеспечивает значение электрической постоянной времени цепи ротора равное 0,0122 с.

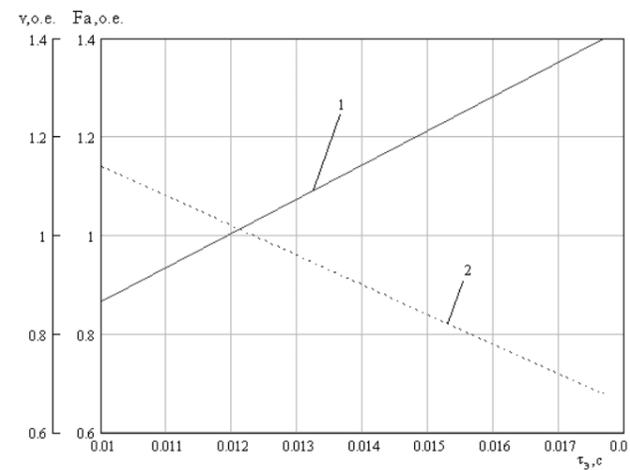


Рис. 4. График зависимости тягового усилия (1) и скорости перемещения (2) от электрической постоянной двигателя

Для найденного значения электрической постоянной времени цепи ротора 0,0122 с., в соответствии с приведенными выше уравнениями, было определено количество витков обмотки двигателя  $w=46$  и требуемый (округленный до стандартного) диаметр провода намотки катушки  $S_{PR}=0,71$  мм.

Расчетные данные были использованы для ремонта одного из двигателей токарного модуля, который в последствии был установлен на оборудовании, и с которого была снята характеристика зависимости развиваемого двигателем усилия от тока в обмотке двигателя, показанная на рис. 5. Из которой видно, что экспериментальные харак-

теристики соответствуют расчетным с погрешностью 4%.

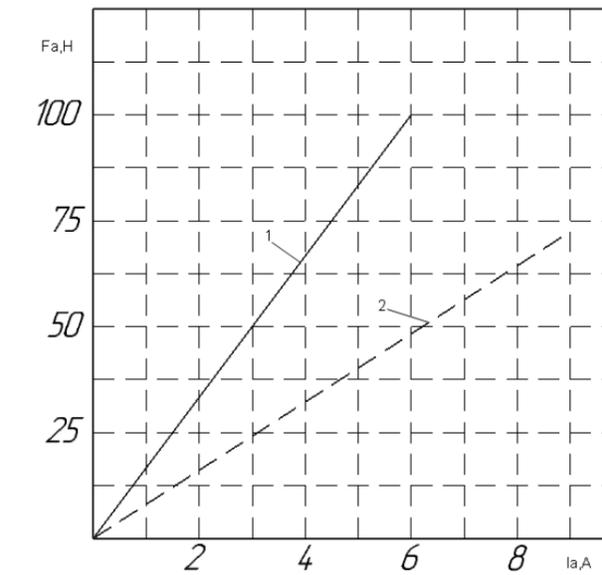


Рис. 5 Экспериментальный график зависимости тягового усилия от тока в обмотке двигателя после перемотки при полном перекрытии (1) при 50% перекрытии (2)

Выводы по работе

1. Разработана математическая модель линейного двигателя мехатронного токарного модуля.
2. На основе разработанной модели определены параметры обмотки двигателя (сечение провода и количество витков), которые в настоящее время применяются при его ремонте.
3. Проведено экспериментальное исследование модуля, которое показало хорошую сходимость с расчетными параметрами в условиях принятых допущений.

Список литературы

1. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей: Пер. с англ. [Текст] / С. Ямамура. – Л.:

Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1983. – 180 с., ил.

2. Веселовский О. Н. Линейные асинхронные двигатели [Текст] / О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.: ил.

3. Хитерер М.Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения [Текст] / М.Я. Хитерер, И.Е. Овчинников. – СПб. КОРОНА принт, 2004. – 368 с.

4. Бочкарев А.В. Линейный электродвигатель малых перемещений [Текст] / А.В. Бочкарев, В.А. Денисов // Сб.тр. междунар. научн.-технич. конф. «Проблемы электротехники и электромеханики». – Тольятти: ТГУ, 2009. – Ч.1. – с. 270–274.

5. Денисов В. А. Бочкарев А.В. Управление линейным электроприводом малых перемещений [Текст] / А.В. Бочкарев, В.А. Денисов // ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. – 2011. – №2. – с. 16–19.

References

1. Jamamura S. Teorija linejnyh asinhronnyh dvigatelej: Per. s angl. [Tekst] / S. Jamamura. – L.: Jenergoatomizdat. Leningr. Otd-nie, 1983. – 180 s., il.

2. Veselovskij O.N. Linejnye asinhronnye dvigateli [Tekst]/ O.N. Veselovskij, A.Ju. Konjaev, F.N. Sarapulov. – M.: Jenergoatomizdat, 1991. – 256 s.: il.

3. Hiterer M.Ja., Ovchinnikov, I.E. Sinhronnye jelektricheskie mashiny vozvratno-postupatel'nogo dvizhenija [Tekst]/ M.Ja. Hiterer, I.E. Ovchinnikov. – SPb. KORONA print, 2004. – 368 s.

4. Bochkarev A.V. Linejnyj jelektrodvigatel' malyh peremeshhenij [Tekst]/ A.V. Bochkarev, V.A. Denisov // Sb.tr. mezhdunar. nauchn.-tehnic. konf. «Problemy jelektrotehniki i jelektromehaniki». – Tol'jatti: TGU, 2009. – Ch.1. – s. 270–274.

5. Denisov V.A., Bochkarev A.V. Upravlenie linejnym jelektroprivodom malyh peremeshhenij [Tekst]/ A.V. Bochkarev, V.A. Denisov // JeLEKTROTEHNIKA. – 2011. – №2. – s. 16–19.



**Шапиро С.В.**  
**Shapiro S.V.**

доктор технических наук,  
профессор кафедры «Технологические  
машины и прикладная физика»  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
университет экономики и сервиса»,  
Россия, г. Уфа



**Саенко А.Г.**  
**Saenko A.G.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Технологические  
машины и прикладная физика»  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
университет экономики и сервиса»,  
Россия, г. Уфа

УДК 628.314

### АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ОЗОНАТОРА С БЕГУЩИМ БАРЬЕРНЫМ РАЗРЯДОМ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

В статье приведен метод анализа электрического поля озонатора с бегущим барьерным разрядом, разработанного в научно-исследовательской лаборатории «Физики электронных процессов и наноматериалов» УГУЭС, в цилиндрической системе координат.

Разрядная камера озонатора представляет собой диэлектрический цилиндр, внутри которого, на одинаковом расстоянии от его оси, находятся нитевидные высоковольтные электроды. Внешняя поверхность цилиндра заключена в массивный алюминиевый параллелепипед, являющийся одновременно и низковольтным электродом, и система охлаждения озонаторного блока. При подаче высокочастотного напряжения на электроды возникает бегущий барьерный разряд, вызывающий реакцию превращения молекул кислорода в молекулы озона. Возникающее, между электродами озонатора, неравномерное электрическое поле симметрично относительно оси диэлектрического цилиндра. Учитывая это, для расчета характеристик электрического поля, было предложено использовать цилиндрическую систему координат.

В работе дан вывод формулы напряженности электрического поля озонатора с бегущим барьерным разрядом, в произвольной точке диэлектрического цилиндра, с использованием метода зеркальных отображений. Полученная зависимость учитывает распределение реальных (высоковольтных) и виртуальных (зеркально отраженных) электродов в пространстве. Суммарная напряженность в произвольной точке от общего количества высоковольтных электродов озонатора определится алгебраическими суммами проекций  $E_p$  и  $E_{\perp}$  от каждого из них.

Выведена формула для вычисления электрических потенциалов в произвольных точках внутри газоразрядной трубки озонатора.

Полученные формулы позволяют упростить математическую модель электрического поля озонатора с бегущим барьерным разрядом. Получено выражение, позволяющее связать такую неявно выраженную характеристику электрического поля озонатора, как линейная плотность заряда  $t$  с геометрическими параметрами газоразрядной трубки и заданными электрическими параметрами.

**Ключевые слова:** высокочастотный озонатор, газоразрядная трубка, виртуальный электрод, бегущий барьерный разряд, метод зеркальных отображений, цилиндрические координаты.

### ANALYSIS OF THE ELECTRIC FIELD WITH A RUNNING OZONATOR BARRIER DISCHARGE IN CYLINDRICAL COORDINATES

The paper presents a method for the analysis of the electric field with a running Ozonator barrier discharge developed in the research laboratory “Physics of electronic processes and nanomaterials” UGUES in a cylindrical coordinate system.

Ozonizer discharge chamber is a dielectric cylinder, inside of which, at the same distance from its axis high voltage electrodes are filamentary. The outer surface of the cylinder is enclosed in a massive aluminum parallelepiped is both low-voltage electrode and the cooling system ozonation unit. When a high frequency voltage to the electrodes running barrier discharge occurs, causing the reaction to convert oxygen molecules into ozone molecules. Occurs between the electrodes ozonizer nonuniform electric field is symmetric with respect to the axis of the dielectric cylinder. Taking this into account, for calculation of the characteristics of the electric field, it is proposed to use a cylindrical coordinate system.

The paper presents the derivation of the electric field with a running Ozonator barrier discharge, at any point of the dielectric cylinder, using the method of mirror images. The dependence obtained allows for the distribution of real (high) and virtual (mirrored) electrodes in space. The total intensity at an arbitrary point of the total number of high-voltage electrodes Ozonator defined by algebraic sum of the projections and  $E_{\perp}$   $E_p$  from each of them.

The formula for calculating electric potentials at arbitrary points inside the discharge tube ozonizer.

The resulting formulas to simplify the mathematical model of the electric field with a running Ozonator barrier discharge. An expression that allows to link such implicit characteristic of the electric field Ozonator, the linear charge density  $t$  with the geometric parameters of the discharge tube and the electrical parameters specified.

**Key words:** high-frequency ozonizer discharge tube, a virtual electrode running barrier discharge, the method of mirroring, cylindrical coordinates.

В работе [1] дан анализ электрического поля озонатора с бегущим барьерным разрядом в декартовой системе координат  $[x,y]$ . Однако, учитывая осесимметричный характер поля, представляется более целесообразным использование цилиндрической системы координат. При этом формулы, описывающие характеристики поля, оказываются проще. В статье приведен вывод этих формул.

Разработанный в научно-исследовательской лаборатории УГУЭС высокочастотный озонатор [2] имеет цилиндрическую активную зону тлеющего разряда с диэлектрическим барьером. Низковольтный электрод представляет собой металличе-

ский параллелепипед, имеющий цилиндрическое отверстие, в которое вставлен диэлектрический цилиндр. Узел высоковольтных электродов состоит из симметрично расположенных металлических струн оси, которых параллельны оси диэлектрического цилиндра.

Для анализа характеристик поля озонатора применялся метод зеркальных отображений [3]. На рис.1 показано сектор поперечного сечения газоразрядной трубки озонатора с учетом такого отображения.

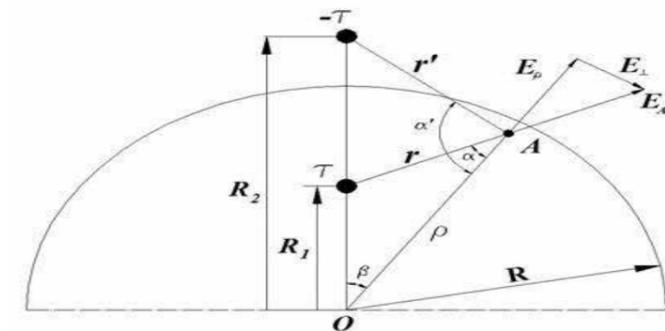


Рис. 1. Определение напряженности в произвольной точке активной зоны высокочастотного озонатора, где  $R$  – внутренний радиус диэлектрического цилиндра;  $R_1$  – расстояние от центра цилиндра до высоковольтного электрода;  $R_2$  – расстояние от центра цилиндра до виртуального электрода;  $\rho$  – полярный радиус;  $\beta$  – полярный угол;  $r$  и  $r'$  – расстояние от электродов до точки в которой определяется напряженность;  $\alpha$  – угол между  $\rho$  и  $r$ ;  $\alpha'$  – угол между  $\rho$  и  $r'$ ;

Напряженность в точке  $A$  от реального высоковольтного электрода  $\tau$  определяется следующим образом

$$E_{A+} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r}; \quad (1)$$

где  $\tau$  – линейная плотность заряда;

$\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;

$r$  – расстояние от высоковольтного электрода до точки  $A$ , определяемое следующим образом

$$r^2 = R_1^2 + \rho^2 - 2R_1 \cdot \rho \cdot \cos\beta \quad (2)$$

Проекция вектора  $E_{A+}$

$$E_{\rho+} = E_{A+} \cdot \cos\alpha; \quad (3)$$

$$E_{\perp+} = E_{A+} \cdot \sin\alpha. \quad (4)$$

Синус угла  $\alpha$  определится из соотношения

$$\frac{r}{\sin\beta} = \frac{R_1}{\sin\alpha},$$

откуда

$$\sin\alpha = \frac{R_1}{r} \cdot \sin\beta, \quad (5)$$

тогда

$$\cos\alpha = \sqrt{1 - \frac{R_1^2}{r^2} \cdot \sin^2\beta}. \quad (6)$$

Подставив в формулы (3) и (4) выражения (1), (2), (5), (6) получим

$$\begin{aligned} E_{\rho+} &= \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r} \cdot \sqrt{1 - \frac{R_1^2}{r^2} \cdot \sin^2\beta} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{r^2 - R_1^2 \cdot \sin^2\beta}{r^4}} = \\ &= \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{(R_1 \cdot \cos\beta - \rho)^2}{(R_1^2 + \rho^2 - 2R_1 \cdot \rho \cdot \cos\beta)^2}} = \\ &= \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{(R_1 \cdot \cos\beta - \rho)}{(R_1^2 + \rho^2 - 2R_1 \cdot \rho \cdot \cos\beta)}; \end{aligned}$$

$$E_{\perp+} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{R_1 \cdot \sin\beta}{r^2} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{R_1 \cdot \sin\beta}{(R_1^2 + \rho^2 - 2R_1 \cdot \rho \cdot \cos\beta)}.$$

Рассуждая аналогичным образом можно найти напряженности  $E'_\rho$  и  $E'_{\perp}$  в точке  $A$  от виртуального электрода  $-\tau$ .

$$E_{A-} = \frac{-\tau}{2\pi\epsilon_0 r'};$$

$$r'^2 = R_2^2 + \rho^2 - 2R_2 \cdot \rho \cdot \cos\beta,$$

где  $R_2[2]$  равно

$$R_2 = \frac{R^2}{R_1}. \quad (7)$$

Проекция вектора  $E_{A-}$

$$E_{\rho-} = E_{A-} \cdot \cos\alpha';$$

$$E_{\perp-} = E_{A-} \cdot \sin\alpha'.$$

Синус угла  $\alpha'$  определится из соотношения

$$\frac{r'}{\sin\beta} = \frac{R_2}{\sin\alpha'},$$

откуда

$$\sin\alpha' = \frac{R_2}{r'} \cdot \sin\beta; \quad \cos\alpha' = \sqrt{1 - \frac{R_2^2}{r'^2} \cdot \sin^2\beta}.$$

Проекция  $E_{A-}$  равны

$$E_{\rho-} = \frac{-\tau}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{(R_2 \cdot \cos\beta - \rho)}{(R_2^2 + \rho^2 - 2R_2 \cdot \rho \cdot \cos\beta)};$$

$$E_{\perp-} = \frac{-\tau}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{R_2 \cdot \sin\beta}{(R_2^2 + \rho^2 - 2R_2 \cdot \rho \cdot \cos\beta)}.$$

$$E_\rho = E_{\rho+} + E_{\rho-};$$

$$E_\rho = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left( \frac{(R_1 \cdot \cos\beta - \rho)}{(R_1^2 + \rho^2 - 2R_1 \cdot \rho \cdot \cos\beta)} - \frac{(R_2 \cdot \cos\beta - \rho)}{(R_2^2 + \rho^2 - 2R_2 \cdot \rho \cdot \cos\beta)} \right);$$

$$E_{\perp} = E_{\perp+} + E_{\perp-};$$

$$E_{\perp} = \frac{\tau \cdot \sin\beta}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{R_1}{(R_1^2 + \rho^2 - 2R_1 \cdot \rho \cdot \cos\beta)} - \frac{R_2}{(R_2^2 + \rho^2 - 2R_2 \cdot \rho \cdot \cos\beta)} \right).$$

Примем

$$a = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0}.$$

Суммарная напряженность в точке  $A$  от общего количества высоковольтных электродов озонатора ( $N$ ) определится алгебраическими суммами  $E_{\rho}$  и  $E_{\perp}$  от каждого из них.

$$E_{\Sigma\rho} = a \cdot \sum_{k=1}^N \left( \frac{(R_1 \cos(\beta + \frac{2\pi}{k}) - \rho)}{(R_1^2 + \rho^2 - 2R_1\rho \cos(\beta + \frac{2\pi}{k}))} - \frac{(R_2 \cos(\beta + \frac{2\pi}{k}) - \rho)}{(R_2^2 + \rho^2 - 2R_2\rho \cos(\beta + \frac{2\pi}{k}))} \right)$$

$$E_{\Sigma\perp} = a \cdot \sum_{k=1}^N \left( \frac{R_1 \sin(\beta + \frac{2\pi}{k})}{(R_1^2 + \rho^2 - 2R_1\rho \cos(\beta + \frac{2\pi}{k}))} - \frac{R_2 \sin(\beta + \frac{2\pi}{k})}{(R_2^2 + \rho^2 - 2R_2\rho \cos(\beta + \frac{2\pi}{k}))} \right)$$

$$E = \sqrt{E_{\Sigma\rho}^2 + E_{\Sigma\perp}^2}$$

Потенциалы в точке  $A$  от высоковольтного электрода и его зеркального отображения определяются по формулам

$$\varphi_{A+} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln r;$$

$$\varphi_{A-} = -\frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln r'.$$

Пусть точка  $A$  находится на цилиндрической поверхности низковольтного электрода как показано на рис.2.

Для пары электродов 1-1' расстояния  $r$  и  $r'$  равны соответственно

$$r = R - R_1;$$

$$r' = R_2 - R,$$

так как  $\rho=R$ , а угол  $\beta=0$ .

Тогда потенциал точки  $A$  от пары электродов 1-1' равен сумме потенциалов  $\varphi_{1A+}$  и  $\varphi_{1A-}$ , взятой с обратным знаком

$$\varphi_{A1} = \varphi_{A1-} - \varphi_{A1+} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r'}{r} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R}{R_1}.$$

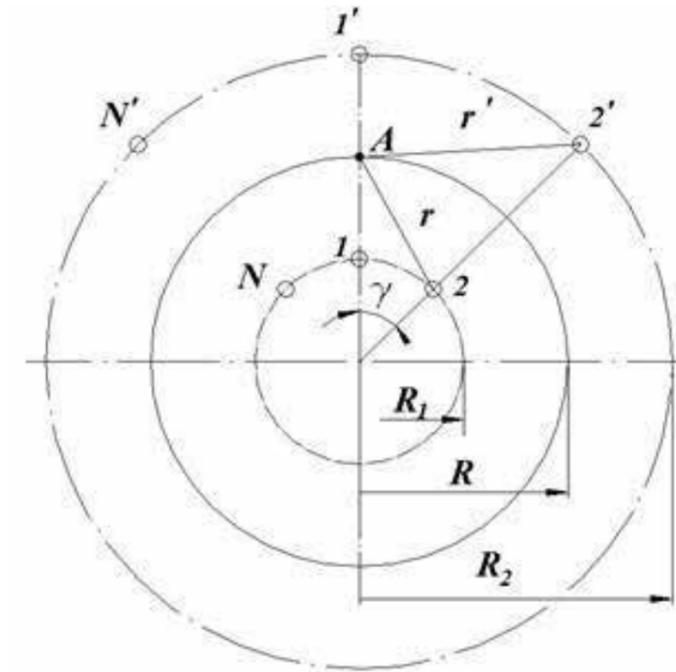


Рис.2. Определение потенциала на внутренней поверхности газоразрядной трубки

Для остальных пар электродов расстояния  $r$  и  $r'$  равны

$$r = \sqrt{R_1^2 + R^2 - 2R_1 \cdot R \cdot \cos\gamma},$$

где  $\gamma=2\pi k/N$ ;

$$r' = \sqrt{R_2^2 + \rho^2 - 2R_2 \cdot \rho \cdot \cos\gamma},$$

с учетом формулы (7) получаем

$$r' = \sqrt{\frac{R^2}{R_1^2} (R_1^2 + R^2 - 2R_1 \cdot R \cdot \cos\gamma)} = \frac{R}{R_1} \cdot r.$$

Потенциал в точке  $A$  примем равным напряжению между электродами озонатора, взятому со знаком «-». Следовательно

$$u_{\text{оз}} = \sum_{k=1}^N \varphi_{Ak-} - \sum_{k=1}^N \varphi_{Ak+} = \frac{N\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R}{R_1} = aN \ln \frac{R}{R_1}.$$

Отсюда получаем, что

$$a = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} = \frac{u_{\text{оз}}}{N \ln \frac{R}{R_1}},$$

тогда линейная плотность заряда  $\tau$  равна

$$\tau = \frac{2\pi\epsilon_0 u_{\text{оз}}}{N \ln \frac{R}{R_1}}. \tag{8}$$

Выражение (8) позволяет связать неявно выраженные характеристики электрического поля озона-

тора, с его геометрическими и заданными электрическими параметрами.

*Список литературы*

1. Шапиро С. В. Аналитический метод расчета высокочастотного озонатора с бегущим барьерным разрядом [Текст] / С.В. Шапиро, А.Г. Саенко // Электротехнические комплексы и системы. – 2015. – т. 11. – №2. – с. 5–9.  
 2. Шапиро С. В. (ред.) Ультразвуковые и субультразвуковые генераторы озона [монография] / С. В. Шапиро, С. А. Дунаев, А. Г. Саенко, М. А. Садыков, Е. В. Мичков. – LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 120 с.  
 3. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле [текст] / Бессонов Л. А. – М.: Высш. школа, 2001. – 231 с.

*References*

1. Shapiro S.V. Analiticheskiy metod rascheta vysokochastotnogo ozonatora s begushhim bar'ernym razrjadom [tekst] / S.V. Shapiro, A.G. Saenko // Jelektrotehnicheskie komplekсы i sistemy. – 2015. – т. 11. – № 2. – р. 5–9.  
 2. Shapiro S.V. (red.) Ul'trazvukovye i subul'trazvukovye gene-ratory ozona [monografija] / S.V. Shapiro, S.A. Dunaev, A.G. Saenko, M.A. Sadykov, E.V. Michkov. – LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 120 p.  
 3. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki: Jelektro-magnitnoe pole [tekst] / L.A. Bessonov. – М.: Vyssh. shkola, 2001. – 231 p.

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS



**Жалбеков И.М.**  
**Zhaltbekov I.M.**

аспирант,  
кафедра «Информационно-управляющие системы»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа



**Перш Я.**  
**Perš J.**

доктор технических наук,  
профессор, лаборатория  
машинного видения,  
Университет Любляны,  
Словения, г. Любляна



**Крымский В.Г.**  
**Krymskiy V.G.**

доктор технических наук,  
профессор, заведующий  
кафедрой «Информационно-управляющие системы»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа

УДК 004.896, 681.5

### ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В последнее время автономные мобильные роботизированные комплексы завоевывают все большую популярность при решении широкого спектра задач. Такие комплексы, как правило, оперируют в среде, где отсутствует возможность контроля ее параметров извне. С целью автономной навигации в подобных условиях рассматриваемые средства должны быть оснащены различными датчиками, в качестве которых, в первую очередь, выступают датчики кинематических параметров и видеосенсоры.

Характерными особенностями автономных мобильных платформ являются малый размер и высокая маневренность. Ввиду ограничений по габаритам подход с установкой датчиков на гиростабилизированной платформе принципиально не реализуем. Поэтому инерциальные датчики, установленные на таком объекте, в большей степени подвержены влиянию целого ряда возмущающих воздействий, что в конечном итоге приводит к росту погрешности в оценках положения объекта. С другой стороны, маневренность платформы обуславливает необходимость в эффективных и точных средствах для определения ее положения.

В статье рассматривается проблема определения ориентации мобильного объекта в пространстве по результатам обработки изображений, полученных от установленной на нем видеокамеры. Анализируются современные подходы и методы обработки изображений, применяемые для извлечения информации об углах крена и тангажа. Описываются типичные проблемы, с которыми сталкиваются исследователи при решении подобных задач, приводятся рекомендации по выбору того или иного метода.

Ключевые слова: определение ориентации, детектирование горизонта, автономные средства передвижения, роботизированные комплексы, обработка изображений

## PRINCIPLES OF ATTITUDE ESTIMATION FOR AUTONOMOUS VEHICLES BASED ON VISUAL DATA

Autonomous mobile robots gain popularity in solving broad spectrum of problems. Those vehicles usually operate in an uncontrollable environment. In order to successfully navigate in such an environment, they have to be equipped with various sensors. Arguably, the two most important ones are inertial and video sensors.

Some features of autonomous vehicles pose challenges to attitude estimation with inertial sensors. The latter one cannot be mounted in gimbals because of a small size of the vehicle. This leads to increased sensitivity of sensor measurements to various perturbations and larger errors in attitude estimates. On the other hand, high maneuverability of the robot stipulates the necessity of effective and precise methods to estimate the vehicle pose.

The paper considers the problem of attitude estimation for autonomous vehicles equipped with camera by means of image processing technique. It contains an analysis of modern approaches to the tilt angles extraction. There are also descriptions of the typical obstacles which the researchers meet when solving such a kind of problems, and some hints are given to choose the applicable method.

Keywords: attitude estimation, horizon detection, autonomous vehicles, mobile robots, image processing

### Введение

Автономные мобильные комплексы, оборудованные системами технического зрения, все чаще находят применение в решении задач контроля состояния промышленных объектов и коммуникаций, а также экологического мониторинга. К этим задачам следует отнести инспектирование сетей газораспределения [1], оценку состояния водных бассейнов [2], детектирование и локализацию утечек опасных веществ в закрытых помещениях [3]. Как правило, изображения сцен среды, в которой оперируют указанные объекты, существенно варьируются, что вызывает множество затруднений при построении алгоритмов обработки и анализа изображений, позволяющих надежно маневрировать на протяжении всей миссии.

С точки зрения автономной навигации важную роль играют параметры ориентации объекта в пространстве, которая может быть описана с помощью углов Эйлера, кватернионов или матрицы поворота. При этом углы Эйлера имеют наглядную и простую интерпретацию в отличие от двух других форм описания. Информация об углах крена и тангажа однозначно определяет проекцию линии горизонта, проходящую на изображении. В свою очередь, определение указанной линии сужает область последующего поиска препятствий для движения объекта и, тем самым, способствует снижению вычислительных затрат. Данные об углах крена и тангажа, в отличие от угла рыскания, также важны для стабилизации автономного объекта в пространстве.

Роботизированные платформы оборудуют датчиками, позволяющими определять значения параметров положения платформы в простран-

стве. При этом в силу ограничений по габаритным параметрам платформы и требований низкой стоимости, как правило, используют инерциальные MEMS-модули. Источники ошибок в измерениях углов ориентации инерциальным модулем могут быть различными. При этом, если смещение нуля датчиков можно компенсировать за счет процедуры калибровки перед миссией, то снизить воздействие дрейфа нуля, обусловленного температурой, напряжением питания и другими факторами, возможно путем совместной обработки показаний датчиков модуля, либо дополнительных модулей, установленных на платформе.

Определение углов ориентации объекта путем интеграции угловых скоростей, полученных от гироскопа, быстро приводит к аномальным значениям вследствие дрейфа показаний. Комплексование показаний акселерометра и гироскопа существенно снижает воздействие дрейфа, однако такая схема предполагает, что акселерометр выступает в роли датчика вертикального уровня, а, значит, любое отклонение движения объекта от перемещения с постоянной скоростью будет приводить к искусственному изменению углов ориентации. Более того, возмущающие воздействия со стороны среды могут существенно исказить характер движения объекта и привести к некорректным оценкам углов ориентации (например, движение судна в условиях качки). Компенсация подобных воздействий предполагает наличие их математической модели, построение которой довольно сложно. Комплексование данных от спутниковой системы навигации также снижает воздействие дрейфа на формируемые оценки, однако такая мобильная платформа не является автономной в

полном смысле этого слова. Кроме того, при навигации в помещениях сигнал от спутника экранируется.

Очевидно, что автономная навигация на необследованной местности немыслима без наличия визуальной поддержки. В связи с этим рядом исследователей обоснован поиск возможностей экстрагирования информации об ориентации объекта из изображений, полученных с камеры.

### Прямое детектирование линии горизонта на изображениях от перспективной камеры

Предполагая, что камера «смотрит» в направлении движения и выровнена с системой координат мобильного объекта, можно получить следующие формулы для определения углов крена  $\phi$  и тангажа  $\theta$  [4]:

$$\phi = -\arctg\left(a \frac{f_u}{f_v}\right), \quad (1)$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{b-q_0}{f_v} \cos\phi - \frac{u_0}{f_u} \sin\phi\right), \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – параметры в уравнении  $q=au+b$  прямой в плоскости изображения,  $u_0$  и  $q_0$  – проекции оптического центра на плоскость изображения,  $f$  с индексами – фокусное расстояние в пикселях для камеры с пикселями прямоугольной формы.

В случае, когда линия горизонта присутствует на изображении, задача может быть сведена к определению границы, разделяющей две области на изображении, соответствующих небу и подстилающей поверхности. Данный подход основан на предварительной сегментации изображения с помощью того или иного метода. В качестве признаков, согласно которым пиксель присваивается определенному классу, используют цветовое представление (в различных цветовых моделях), яркость и другие формы описания. Тем не менее, задача сегментации по цветовым характеристикам осложняется ввиду многих факторов. Особенности подстилающей поверхности (рельеф земной поверхности, зеркальное отражение объектов прибрежной территории водной гладью) и ее неравномерное освещение, явление дифракции световых волн в атмосфере приводят к тому, что условия наличия на изображении двух однородных по цвету областей выполняется довольно редко. В результате повышается ошибка классификации и, как следствие, ошибка в определении линии горизонта. Появление препятствий, занимающих небольшую часть площади, не будет существенно отражаться на результатах. Их воздействие также может быть

нивелировано благодаря описанию дополнительного класса, соответствующего препятствиям [5]. В то же время, массивные препятствия, частично или полностью загораживающие линию горизонта, существенно снижают надежность его детектирования указанными методами.

Возникновение бликов, вызванных отражениями от зеркальной поверхности (например, водной глади), а также попаданием в поле зрения камеры самих источников света на изображении, приводит к искажению работы алгоритмов сегментации. Одним из вариантов борьбы с подобным явлением является использование камер с поляризационными фильтрами. Методы на базе таких камер демонстрируют более робастные результаты в решении задач выделения областей на изображениях сцен, содержащих источники света и их отражения. Как показали исследования в работе [6], сегментация по углу и степени поляризации может быть осуществлена сравнительно быстро и без применения усложненных алгоритмов.

Для классификации областей изображения можно использовать методы машинного обучения. Так, в работе [7] для разделения изображения на 2 области использовался метод опорных векторов, байесовский классификатор и алгоритм J48. В качестве вектора признаков каждого пикселя изображения выступали значения интенсивностей и шесть различных показателей, характеризующих текстурную составляющую по каждому из трех цветовых каналов. Таким образом, итоговый вектор признаков содержал 21 компоненту. Тем не менее, такой подход требует наличия большого числа изображений в базе, на которой проводится обучение. В ряде тестов процент верно классифицированных пикселей падал до 74%. Учет разнообразных погодных условий, препятствий снижает возможность применения данного подхода при маневрировании автономных роботизированных комплексов.

Вместо определения линии, соответствующей наилучшему в некотором смысле разделению двух областей по результатам сегментации, может применяться иной подход – выделение контуров на изображении с дальнейшим отсевом границ, не соответствующих линии горизонта. В частности, в публикации [4] детектируется профиль горизонта путем выделения границ фильтром Собеля и выполнения процедуры морфологической дилатации, с целью удовлетворения условию соединения двух вертикальных краев изображения. Далее используют М-оценку для робастной аппроксимации профиля отрезком прямой. При тестировании метода на последовательности изображений, снятых во время

пилотируемого полета, указанный метод показал наилучшие по сравнению с [8] результаты в смысле среднеквадратичной ошибки определения углов ориентации и скорости выполнения, однако для ряда изображений абсолютное значение ошибки достигало  $6,91^\circ$  по углу крена и  $11,79^\circ$  по углу тангажа. В качестве истинных использовались значения углов крена и тангажа, полученные от индустриальной системы навигации.

Некоторые исследователи пытаются улучшить результаты детектирования горизонта, применяя как метод сегментации, так и алгоритмы извлечения границ. Авторы работы [9] на первом этапе получают карту контуров и извлекают потенциальную линию горизонта с помощью преобразования Хафа. Как отмечалось ранее, указанная линия может не совпадать с действительной линией горизонта на изображении вследствие особенностей подстилающей поверхности (типичными ложно детектируемыми элементами могут выступать профиль дороги или берега). Линия-кандидат разделяет область изображения на две подобласти, для каждой из которых строится своя модель интенсивности на базе метода взвешенных средних квадратов. Далее элементы с большим отклонением интенсивности от модельной могут быть исключены из анализа. Это осуществляется путем бинаризации изображения, содержащего указанные отклонения. На последнем этапе повторяют первый шаг и получают уточненную оценку линии горизонта.

#### Детектирование горизонта на изображениях от всенаправленных камер

Преимуществом всенаправленных камер является широкий угол обзора, что способствует выделению характерных черт на изображении при наличии частичных окклюзий линии горизонта. В то же время, установка подобных камер на небольшие автономные объекты приводит к серьезным затруднениям, обусловленным массогабаритными показателями ката- и полидиоптрических сенсоров.

В зависимости от ориентации камеры изображение горизонта будет представлять собой эллипс или часть его дуги, формирование которых можно рассматривать в два этапа: на первом выполняется проекция горизонта на сферу единичного радиуса, на втором – элементы на сфере проектируются на плоскость изображения. Радиус окружности, образуемой проекцией горизонта на сферу, будет зависеть от расстояния до подстилающей поверхности. Таким образом, путем предварительной калибровки возможно определить высоту маневрирования воздушного средства.

В работе [10] анализируются изображения, полученные с помощью всенаправленной камеры типа «рыбий глаз». На первом этапе алгоритма на предварительно сглаженном изображении выделяются границы с помощью детектора Кэнни. Используя информацию о высоте съемки, для каждой точки на контурах можно определить направление нормали к плоскости горизонта, а, значит, и углы крена и тангажа. Предполагая, что точек, соответствующих действительной проекции горизонта на изображении будет больше, можно считать, что истинные значения углов наклона соответствуют максимальному количеству точек, «проголосовавших» за то или иное решение. При наличии априорной информации о высоте  $h$  и углах наклона каждый голос может взвешиваться с коэффициентом, пропорциональным условной вероятности того, что точка с координатами  $(u, q)$  на изображении действительно принадлежит проекции горизонта при заданных параметрах. В общем случае указанные параметры могут принимать значения в некотором диапазоне, поэтому в [10] предлагается следующая формула для определения коэффициентов взвешивания:

$$w = \iiint p(u, q / h, \theta, \phi) dh d\phi d\theta. \quad (3)$$

Анализ 25-ти изображений показал отклонения от значений углов, определенных по результатам ручной разметки линии горизонта, менее чем на  $1^\circ$ .

Подход с использованием сегментации областей предложен в работе [11]. Особенности формирования изображений всенаправленных камер приводят к тому, что легче проводить анализ на сфере единичного радиуса, нежели в плоскости изображения, поэтому профиль кривой, разделяющей две области по результатам сегментации, проектируется на указанную сферу. Далее, задача определения углов наклона сводится к оценке плоскости, проходящей через точки профиля горизонта на сфере.

#### Косвенные методы определения линии горизонта на базе точек схода

Иной подход к «борьбе» с окклюзиями, обусловленными попаданием в поле зрения камеры массивных препятствий, заключается в косвенном определении линии горизонта с использованием точек схода. Данные методы также применимы при определении ориентации мобильной платформы внутри помещений.

Для изображений городских территорий и помещений характерно наличие линий параллельных и перпендикулярных направлению действия силы

гравитации. На перспективном изображении эти линии будут пересекаться в точках, называемыми точками схода. Линия, проведенная через две точки схода, которые лежат в горизонтальной плоскости, совпадает с линией горизонта; вертикальная точка схода задает направление нормали к ней. Таким образом, для вычисления углов крена и тангажа необходимо определить вертикальную точку схода либо две горизонтальные точки схода, направления к которым должны быть ортогональны друг другу. Для всенаправленных камер проекция прямой в трехмерном пространстве на сферу единичного радиуса будет представлять собой окружность. Пересечение окружностей, соответствующих параллельным прямым, определяет точку схода. Вращение системы координат отражается на вращении 3-х ортонормированных векторов, задающих направление к точкам схода. Таким образом, с помощью треккинга точек схода можно восстановить параметры ориентации объекта в пространстве.

Как правило, алгоритм определения точек схода состоит из двух этапов: выделение границ и кластеризация параллельных линий по точкам схода. Определение кластеров параллельных линий, соответствующих точке схода, зачастую является довольно трудоемкой операцией. Для выполнения данной операции можно анализировать все возможные пересечения пар линий и определить углы ориентации с помощью алгоритма Хафа. Существует также метод, основанный на выделении точек схода с помощью процедуры RANSAC, однако найденные точки не всегда удовлетворяют условию ортогональности. В связи с этим в работе [12] данный этап заменен на решение обратной задачи: при известной априорной матрице поворота (в качестве которой может выступать оценка в предыдущий момент времени) сформировать ряд гипотез о текущей ориентации объекта; определить количество линий, согласующихся с каждой гипотезой о расположении точек схода. Гипотеза

с максимальным числом линий, поддерживающих ее, будет соответствовать действительной ориентации объекта с некоторой погрешностью. Последовательно сужая диапазон изменения и интервал дискретизации значений оценок углов поворота, можно за несколько итераций получить достаточно хорошее приближение истинных значений углов ориентации.

В статье [13] предложен оригинальный метод выделения точек схода на изображениях открытого моря при отсутствии в поле зрения искусственных объектов в случае, если изображения содержат множество линий, параллельных и перпендикулярных направлению действия гравитации. Водная гладь на изображении рассматривается как область со случайной текстурой, обусловленной волнением ее поверхности. Предполагается, что элементы текстуры отличаются лишь размером, что обусловлено особенностью перспективной проекции. Авторы предлагают использовать дескриптор SIFT для сопоставления элементов текстуры различного масштаба и определения двух пар, соответствующих элементам текстуры. Точка пересечения прямых, которые касаются обеих окружностей, отражающих масштаб соответствующих элементов текстуры, выступает в качестве аппроксимации точки схода. Среднеквадратичная ошибка в определении наклона линии горизонта на наборе из 55 000 изображений составила  $7,84^\circ$ , что снижает привлекательность метода по сравнению с другими.

#### Использование оптического потока в задачах определения ориентации объекта

При условии, что оптическая ось камеры имеет вертикальное направление и фиксирует изображение под мобильным объектом, в данном случае – беспилотным летательным аппаратом (БПЛА), может быть получена следующая система уравнений для оптического потока [14]:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \frac{f+q \tan \phi - u \tan \theta / \cos \phi}{z} \begin{bmatrix} -v_x + \frac{uv_z}{f} \\ -v_y + \frac{qv_z}{f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{uq}{f} & -(f + \frac{u^2}{f}) & q \\ (f + \frac{q^2}{f}) & -\frac{uq}{f} & -u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $(u, q, \dot{u}, \dot{q})$  – вектор оптического потока, элементы которого задают координаты и скорость движения пикселя в плоскости изображения,  $f$  – фокусное расстояние в пикселях,  $z$  – расстояние до точки, для проекции которой вычисляется оптический поток,  $v$

и  $\omega$  с индексами – элементы векторов линейной и угловой скорости объекта.

Систему уравнений (4) можно дополнить моделью движения мобильного объекта, что позволит осуществить оценку кинематических

параметров и углов ориентации с использованием фильтра Калмана. Однако зачастую подобная модель заранее не известна. В таком случае прибегают к оценкам переменных состояния с помощью измерений, полученных от инерциального модуля.

На практике оптический поток определяется лишь для части пикселей изображения. В публикации [14] предварительно выделяют особые точки и устанавливают соответствия между точками на двух последовательных изображениях с использованием SIFT дескриптора. Альтернативой может являться вычисление оптического потока для точек, расположенных вдоль границ или других характерных черт, найденных на изображении. Формула (4) для случая, когда точки находятся на линии горизонта, существенно упрощается и приобретает вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{uq}{f} & -(f + \frac{u^2}{f}) & q \\ (f + \frac{q^2}{f}) & -\frac{uq}{f} & -u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

В работе [8] в качестве переменных состояния выступают угловые скорости и углы крена и тангажа БПЛА, система (5) связывает переменные состояния с измерениями на базе оптического потока. Модель измерений включает также оценки углов ориентации, полученные по результатам выделения границы, которая выступает в роли потенциальной линии горизонта. При построении модели движения авторы исходили из того, что изменения угловой скорости обусловлены только шумовой составляющей.

Для точек, расположенных на каждой линии-кандидате, вычисляется оптический поток, и в соответствии со схемой обобщенного фильтра Калмана выполняется оценка вектора невязки (обновления)  $v$  и соответствующей ему ковариационной матрицы  $S$ . В случае, если граница-кандидат в действительности совпадает с линией горизонта, то случайная величина

$$\gamma = v^T S^{-1} v \quad (6)$$

распределена по закону хи-квадрат и может использоваться для проверки гипотезы о соответствии выделенной границы истинной линии горизонта. Применение фильтра совместно с проверкой гипотезы по критерию хи-квадрат позволило увеличить процент изображений с верно распознанной линией горизонта с 90,7% (без применения фильтра) до 98,8% на видеопоследовательности, полученной в ходе взлета летательного аппарата. В то же время, при полете на некоторой высоте и наличии дымки

результаты ухудшаются. Авторы, однако, и в этом случае не приводят численных значений погрешности определения углов крена и тангажа, а ограничиваются процентом изображений с верно распознанной линией горизонта, что является более субъективной трактовкой.

#### Анализ стереоизображений с целью получения информации об ориентации мобильной платформы

С помощью пары изображений, полученных от стереокамеры, становится возможным определить расстояние до детектируемой точки в трехмерном пространстве и локализовать точку в системе координат камеры. Для нахождения относительного изменения ориентации достаточно установить соответствие между особыми точками в трехмерном пространстве тем или иным способом и решить задачу оптимизации [15]:

$$\sum_{n=1}^N \|X_n^t - (RX_n^{t-1} + s)\|^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$RR^T = I, \quad (8)$$

где  $R$  – матрица поворота, описывающая ориентацию камеры в пространстве,  $X_n^t$  – вектор положения особой точки в системе координат камеры в момент времени  $t$ ,  $s$  – вектор сдвига, описывающий изменение позиции камеры,  $N$  – количество соответствующих пар точек,  $I$  – единичная матрица.

Ввиду ошибок локализации особых точек сравнение только двух изображений с целью определения изменения углов ориентации будет приводить к дрейфу в их оценках. Методы, использующие сравнение с несколькими предыдущими изображениями и решающие задачу минимизации ошибок с учетом всех изображений в таком наборе, существенно снижают воздействие дрейфа при движении с малой скоростью [16].

В основе рассмотренного в этой работе метода лежит предположение о статичности наблюдаемой сцены. Наиболее типичный случай, при котором не выполняется указанное требование – маневрирование по поверхности моря. В публикации [17] поверхность водной глади аппроксимируется плоскостью с применением метода RANSAC. Направление нормали извлеченной плоскости позволяет вычислить углы крена и тангажа.

В статье [18] используется гибридная стереосистема, которая включает камеру, предназначенная как для перспективной, так и всенаправленной съемки, однако ориентация объекта определяется с помощью монокулярных методов, рассмотренных выше.

#### Основные выводы

Изображения от камеры, установленной на подвижном роботизированном комплексе, содержат большое количество информации о среде его маневрирования, что приводит к необходимости в использовании многошаговых алгоритмов извлечения характерных элементов. Подходы к определению ориентации объекта на базе методов обработки изображений отличаются большим разнообразием и хорошей точностью, но, в то же время, могут приводить к катастрофическим ошибкам в случае неверного выбора того или иного подхода. Из представленного анализа видно, что предпочтительный выбор метода должен осуществляться в зависимости от наблюдаемой сцены, а также свойств среды маневрирования. Одним из подходов к робастификации итоговой оценки является комплексирование данных об углах ориентации, полученных с помощью различных визуальных методов [19]. Последовательное выполнение двух методов, когда первый используется для получения грубой оценки или генерации гипотез, а второй – для уточнения или отсева гипотез (подходы, описанные в работах [9] и [8] соответственно), также возможно, однако при этом возрастает вычислительная нагрузка. Несмотря на низкую точность инерциальных датчиков, их показания, как правило, менее подвержены спорадическим изменениям, поэтому к решению вопроса робастификации целесообразно подходить, обеспечивая комплексирование видеоданных и показаний инерциального модуля с использованием рекурсивного фильтра Калмана и его нелинейных вариантов [20,21].

#### Заключительное замечание

В основу данной статьи положены исследования, выполненные в период прохождения Жалбековым И.М. научной стажировки в Университете Любляны (Словения) при поддержке стипендией Президента Российской Федерации для обучения за рубежом.

#### Список литературы

1. Hausamann D. Monitoring of gas pipelines – a civil UAV application [Text] / D. Hausamann, W. Zirrig, G. Schreier, P. Strobl // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. – 2005. – Vol. 77 – №5. – PP. 352-360.
2. Dunbabin M. Experimental evaluation of an autonomous surface vehicle for water quality and greenhouse gas emission monitoring [Text] / M. Dunbabin, A. Grinham // Proceedings of IEEE International Confer-

ence on Robotics and Automation (ICRA). – 2010. – PP. 5268-5274.

3. Bennetts V. H. Combining non selective gas sensors on a mobile robot for identification and mapping of multiple chemical compounds [Text] / V.H. Bennetts, E. Schaffernicht, V. Pomareda, A.J. Lilienthal, S. Marco, M. Trincavelli // Sensors. – 2014. – №14. – PP. 17331-17352.

4. Dumble S. J. (2012). Horizon profile detection for attitude determination [Text] / S.J. Dumble, P.W. Gibbens // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2012. – Vol.68. – №3-4. – PP. 339-357.

5. Kristan M. Fast image-based obstacle detection from unmanned surface vehicles [Text] / M. Kristan, V. Sulić Kenk, S. Kovačić, J. Perš // IEEE Transactions on Cybernetics – 2015. – in press.

6. Shabayek A.E.R. Vision based uav attitude estimation: Progress and insights. [Text] / A.E.R. Shabayek, C. Demonceaux, O. Morel, D. Fofi // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2012. – Vol. 65. – №1-4. – PP. 295-308.

7. Fefilatyevev S. Horizon detection using machine learning techniques [Text] / S. Fefilatyevev, V. Smarodzinava, L.O. Hall, D.B. Goldgof // Proceedings of the 5th International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA). – 2006. – PP. 17-21.

8. Dusha D. Attitude estimation for a fixed-wing aircraft using horizon detection and optical flow [Text] / D. Dusha, W. Boles, R. Walker // Proceedings of the 9th Conference on Digital Image Computing Techniques and Applications. – 2007. – PP. 485-492.

9. US Patent US9031285. Detection of floating objects in maritime video using a mobile camera [Text] / H.T. Nguyen, P. Ramu, H. Wei, X. Liu, J. Yadegar, publication date 23.10.2014.

10. Grelsson B. Probabilistic Hough Voting for Attitude Estimation from Aerial Fisheye Images [Text] / B. Grelsson, M. Felsberg // Proceedings of the 18th Scandinavian Conference on Image Analysis (SCIA). – 2013. – PP. 478-488.

11. Demonceaux C. Omnidirectional vision on UAV for attitude computation / C. Demonceaux, P. Vasseur, C. Pégard // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2006. – PP. 2842-2847.

12. Bazin J. C. Rotation estimation and vanishing point extraction by omnidirectional vision in urban environment [Text] / J. C. Bazin, C. Demonceaux, P. Vasseur, I. Kweon // International Journal of Robotics Research – 2012. – Vol. 31. – №1. – PP. 63-81.

13. Fefilatyevev S. Detection of the Vanishing Line of the Ocean Surface from Pairs of Scale-Invariant Keypoints [Text] / S. Fefilatyevev, M. Shreve, D. Goldgof

// Proceedings of the 17th International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP). – 2013. – PP. 161-169.

14. *Rhudy M. B.* Unmanned Aerial Vehicle Navigation Using Wide-Field Optical Flow and Inertial Sensors [Text] / M.B. Rhudy, Y. Gu, H. Chao, J. N. Gross // Journal of Robotics – 2015. – Vol. 501. – Article ID 251379 – 12 p.

15. *Hirschmuller H.* Fast, unconstrained camera motion estimation from stereo without tracking and robust statistics / H. Hirschmuller, P.R. Innocent, J.M. Garibaldi // Proceedings of the 7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV). – 2002. – Vol. 2. – PP. 1099-1104.

16. *Schmid K.* Stereo vision based indoor/outdoor navigation for flying robots [Text] / K. Schmid, T. Tomic, F. Ruess, H. Hirschmuller, M. Suppa // Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – 2013. – PP. 3955-3962

17. *Wang H.* Stereovision based obstacle detection system for unmanned surface vehicle / H. Wang, Z. Wei // Proc. of the IEEE International Conference

on Robotics and Biomimetics (ROBIO). – 2013. – PP. 917-921.

18. *Eynard D.* Real time UAV altitude, attitude and motion estimation from hybrid stereovision / D. Eynard, P. Vasseur, C. Demonceaux, V. Frémont // Autonomous Robots. – 2012. – Vol. 33. – № 1-2. – PP. 157-172.

19. *de Lima M.M. R.* A Visual Data Fusion to Aerial and Land Robots Odometry [Text] / M.M. R. de Lima, J.L.S. Pio, J.R.H. Carvalho // Proceedings of IEEE Latin American Robotics Symposium. – 2013. – PP. 43-48.

20. *Zhalbekov I.* Horizon detection for robotic marine vehicles based on fusion of visual and inertial measurements: reducing risk to miss the obstacles [Text] / I. Zhalbekov, J. Perš, R. Mandeljc, M. Kristan, S. Kovačič, V. Krymsky // Proceedings of the 13th International Scientific School on Modeling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems (MASR). – 2015. – PP. 151-156.

21. *Hwangbo M.* Visual-inertial UAV attitude estimation using urban scene regularities [Text] / M. Hwangbo, T. Kanade. // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2011. – PP. 2451-2458.



**Кучеров Б.А.**

**Kuchеров В.А.**

аспирант кафедры «Информационные технологии и управляющие системы»  
ГБОУ ВО МО «Технологический университет»  
Россия, г. Королев

УДК 681.5.034

## АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Рассматриваются вопросы, связанные с разработкой проектных решений для автоматизированной системы распределения средств управления космическими аппаратами. Осуществлен анализ предлагаемых решений по информационному, программному и техническому обеспечению, по технологии сбора, передачи, обработки и выдачи информации.

Приведены основные принципы построения информационного обеспечения и показаны способы их достижения. Представлено обоснование выбора системы управления базами данных (СУБД) для автоматизированной системы (АС) распределения средств управления (PCY) космическими аппаратами (КА). В качестве системы управления базами данных выбрана система Oracle Database Standard Edition. Проведено сравнение Oracle Database и Microsoft SQL Server, отмечены основные достоинства и недостатки указанных СУБД. Также учтен опыт успешной эксплуатации указанных СУБД в организации, эксплуатирующей орган планирования. Проведен анализ возможностей различных редакций Oracle Database. Показано, что выбор редакции Standard Edition обусловлен высокими требованиями по отказоустойчивости, доступности данных, предъявляемыми к АС PCY КА (т.к. редакция Standard Edition является минимальной редакцией, поддерживающей опцию Real Application Cluster (RAC)).

Рассмотрены проектные решения по технологии сбора, передачи, обработки и выдачи информации. Отмечено использование как автоматизированного, так и автоматического способа сбора и регистрации информации. Указано, что системой сбора и регистрации информации должны быть охвачены все точки возникновения информации, а также должны быть обеспечены требуемые степень полноты и достоверности.

Представлены проектные решения по программному обеспечению. Требования к общему программному обеспечению серверов сформулированы с учетом выбранной СУБД. Рассмотрено программное обеспечение, необходимое для создания кластера базы данных по технологии Oracle Real Application Cluster.

Приведены проектные решения по техническому обеспечению, принятые с учетом высоких требований по отказоустойчивости и доступности данных, предъявляемым к разрабатываемой автоматизированной системе PCY КА.

*Ключевые слова:* программное обеспечение, информационное обеспечение, техническое обеспечение, база данных, космический аппарат, наземный комплекс управления, орган планирования, Oracle, отказоустойчивость, проектные решения.

## ANALYSIS OF DESIGN SOLUTIONS FOR AUTOMATED SYSTEM OF ALLOCATION CONTROL FACILITIES FOR SPACECRAFTS

Issues related to developing design solutions for automated system of allocation control facilities for spacecrafts are considered. Analysis of proposed solutions for information support, software, hardware, technology of acquisition, transmission, processing and delivery of information are performed.

The basic principles of information support are given and ways of achieving them are showed. Rationale for the choice of database management system (DBMS) for automated system of allocation control facilities for spacecrafts is presented. Oracle Database Standard Edition is selected as a database management system. Comparison of Oracle Database and Microsoft SQL Server is performed, main advantages and disadvantages of these DBMS are noted. The experience of successful exploiting these DBMS in organization, which exploiting the planning authority, is also taken into account. Analysis of the capabilities of different editions of Oracle Database is performed. It is shown that the choice of Standard Edition is due to high requirements for failover, data availability imposed by automated system of allocation control facilities for spacecrafts (Standard Edition is the minimum edition supporting option Real Application Cluster (RAC)).

Design solutions for technology of acquisition, transmission, processing and delivery of information are considered. Usage of both automated and automatic methods of acquisition and registering information is noted. It is noted that the system of acquisition and registering information should include all the points of origin information and should ensure required degree of completeness and accuracy.

Design solutions for software are presented. The requirements for general server software are formulated taking into account the chosen DBMS. Software needed to create a database cluster by Oracle Real Application Cluster technology is considered.

Design solutions for hardware, made taking into account the high requirements for failover and data availability imposed by automated system of allocation control facilities for spacecrafts, are presented.

*Keywords:* software, information support, hardware, database, spacecraft, ground control complex, planning authority, Oracle, failover, design solutions.

#### Введение

В настоящее время происходит прогрессирующее увеличение числа космических аппаратов (КА), входящих в состав орбитальных группировок, для которых используется малопунктная технология управления. В складывающихся обстоятельствах к процессу управления группировкой КА, а также к его составным частям, таким как распределение средств управления (PCY) КА, предъявляются совершенно новые требования [1-6].

В складывающихся условиях возрастает нагрузка на специалистов органов управления, в том числе органа планирования. Вместе с этим повышаются требования по оперативности выполнения задач специалистами данного органа. Одним из возможных путей удовлетворения возрастающих требований является использование автоматизированной системы (АС) PCY КА [1, 2, 7-9].

Рассмотрим и проанализируем основные проектные решения, предъявляемые органом планирования к АС PCY КА.

#### Проектные решения по информационному обеспечению

Как известно, при построении информационного обеспечения используют следующие основные принципы [10]: принцип единой БД; принцип одноразового ввода и накопления информации; принцип минимизации ввода и вывода; принцип централизации обработки информации; принцип гибкости

информационной базы. Обеспечение перечисленных выше принципов достигается за счет использования базы данных.

Выделяют различные модели баз данных (БД): иерархическая, сетевая, реляционная, объектная, объектно-ориентированная и объектно-реляционная. В настоящее время реляционная модель БД (наряду с объектно-реляционной) является наиболее распространенной [10].

В организации, эксплуатирующий орган планирования, накоплен большой опыт успешной эксплуатации системы управления базами данных (СУБД) Oracle. Данная СУБД успешно применяется в различных направлениях деятельности организации. Для тех направлений, где важны отказоустойчивость и масштабируемость, используются кластеры БД на основе Oracle Real Application Clusters (RAC). Имеется возможность привлечения квалифицированных специалистов организации для настройки и сопровождения кластера БД Oracle RAC. В организации существует тенденция перехода к использованию, по возможности, только этой СУБД. Стоит отметить, что по СУБД Oracle доступна информативная и удобная в использовании документация.

Oracle Database – это производительная, масштабируемая, функциональная СУБД для решения широкого спектра задач. В настоящее время предлагается несколько редакций Oracle Database, удовлетворяющих бизнес и информационным потребностям организаций различного уровня и бюджета.

Все редакции основаны на единой архитектуре, полностью совместимы друг с другом и отличаются лицензионными ограничениями. Кроме того, существуют дополнительные программные продукты («опции» и «пакеты»), расширяющие возможности Oracle Database при решении конкретных прикладных задач [11].

Сравнение некоторых возможностей редакций Oracle Database [11-14] представлено в табл. 1, где

ASM – automatic storage management (автоматическое управление дисковыми ресурсами), OLAP – online analytical processing (аналитическая обработка в реальном времени), AWR – automatic workload management (автоматический репозиторий рабочей нагрузки), FGA – fine-grained auditing (детальный аудит).

Таблица 1.

Сравнение возможностей редакций Oracle Database

Редакция Oracle Database		Express Edition	Personal Edition	Standard Edition One	Standard Edition	Enterprise Edition
Назначение		бесплатная редакция, имеющая ряд ограничений	редакция для монопольного использования одним пользователем	бюджетная редакция для серверов	редакция для серверов или групп серверов	корпоративная редакция
Лицензионные ограничения	вычислительной мощности	1 ядро процессора	–	2 сокета	4 сокета	–
	оперативной памяти	1 Гб	–	–	–	–
	объема пользовательских данных	11 Гб	–	–	–	–
Oracle RAC		–	–	–	+	+*
Oracle ASM		–	–	+	+	+
Oracle OLAP		–	–	–	–	+*
AWR		–	–	–	+	+
FGA		–	–	–	–	+
Fail Safe		–	+	+	+	+

Примечание: +\* – опция, приобретаемая за дополнительную плату

Стоит отметить, что дополнительные опции и пакеты могут быть приобретены только к редакции Enterprise Edition. Данная редакция включает ряд возможностей, не входящих в другие редакции.

Проведем сравнение СУБД Oracle и СУБД Microsoft SQL Server, используемой в организации, эксплуатирующей орган планирования, в меньшей степени. СУБД Oracle является кроссплатформенной, в то время как СУБД Microsoft SQL Server поддерживает только операционную систему (ОС) Windows [11]. В организации, эксплуатирующий орган планирования, предпочтительной

серверной ОС является Linux. Обе СУБД поддерживают кластерные технологии (СУБД Oracle – начиная с редакции Standard Edition), но кластерные технологии применительно к СУБД Microsoft SQL Server – это поддержка кластера Active-Passive, когда второй сервер находится в резерве [11]. СУБД Oracle обеспечивает одновременную работу всех узлов кластера, распределяя нагрузку между ними, что повышает отказоустойчивость системы в целом и доступность данных. Помимо этого, СУБД Oracle обладает более широкой поддержкой разнообразных триггеров [11]. Это является плюсом при

разработке приложений БД. Выше были перечислены достоинства СУБД Oracle по сравнению с СУБД Microsoft SQL Server. К недостаткам СУБД Oracle по сравнению с СУБД Microsoft SQL Server можно отнести более высокую стоимость лицензий.

Для создания кластера БД в СУБД Oracle должна присутствовать опция Real Application Clusters (RAC). Для органа планирования отказоустойчивость и масштабируемость являются крайне важными характеристиками АС РСУ КА. Обеспечить удовлетворение таких требований возможно за счет объединения нескольких серверов в кластер базы данных на базе технологии Oracle RAC. Кроме того, из прочих достоинств данной технологии можно отметить обеспечение прозрачного доступа к БД для пользовательских приложений. Oracle RAC, работая на кластере, обеспечивает высочайшие уровни готовности и масштабируемости при низких затратах на вычислительные операции [13, 14].

Учитывая результаты проведенного анализа возможностей различных редакций СУБД Oracle и сравнения ее с СУБД Microsoft SQL Server, именно Oracle Database 11g Release 1 Standard Edition (с опцией RAC) выбрана для использования в автоматизированной системе РСУ КА. Выбор редакции Standard Edition обусловлен высокими требованиями по отказоустойчивости, доступности данных, предъявляемыми к разрабатываемой АС (т.к. редакция Standard Edition является минимальной редакцией, поддерживающей опцию RAC).

#### Проектные решения по технологии сбора, передачи, обработки и выдачи информации

В разрабатываемой автоматизированной системе сбор входной информации будет осуществляться как автоматизировано, так и автоматически. Однако, преобладать будет автоматизированный сбор данных.

Автоматизированная передача информации в АС может осуществляться из входящего факса или документа на бумажном носителе, полученным лично оператором.

Автоматическая передача информации в АС может осуществляться из xml-документа или из базы данных абонента органа планирования.

В разрабатываемой автоматизированной системе должен обеспечиваться контроль входной информации на предмет ее полноты и корректности. Такой контроль должен осуществляться в любой точке сбора входной информации. Стоит отметить, что своевременное получение достоверной информации необходимо как для эффектив-

ного функционирования органа планирования, так и для оперативного решения отдельных его задач.

Обработка поступившей информации может осуществляться как по команде пользователя, так и автоматически при наступлении определенного события (получения xml-файла, оповещение из БД абонента о необходимости получения информации).

Результаты обработки данных могут быть просмотрены в виде отчетов (документов), формирование которых осуществляется по команде пользователя. При этом должна быть обеспечена возможность печати сформированных документов. В формируемых документах должны присутствовать шаблоны для заполнения их реквизитов (например, регистрационного номера). Также в них должен присутствовать перечень лиц, подписывающих, согласовывающих и утверждающих документ (с указанием их должностей, фамилий и инициалов).

#### Проектные решения по программному обеспечению

Как известно, классифицировать программное обеспечение по назначению может на системное (общее), прикладное и инструментальное [15].

Требования к общему программному обеспечению (ОПО) серверов составляются с учетом выбранной СУБД. Так, при выборе ОС серверов следует учитывать, какие системы сертифицированы компанией Oracle для создания кластера БД по технологии Oracle RAC [12, 13].

Для работы Oracle RAC необходимо программное обеспечение (ПО) для объединения серверов в кластер. Таким ПО является Oracle Clusterware. Оно включается в комплект дистрибутива СУБД Oracle, начиная с версии 10g. Oracle Clusterware производит мониторинг и управления кластерными базами данных, а так же программными компонентами, обеспечивающими их функционал [13, 14].

Oracle RAC строится на основе архитектуры с разделяемыми дисками. Для работы с дисками рекомендуется использовать встроенную в СУБД систему автоматического управления дисковыми ресурсами – Automatic Storage Management (ASM). ASM обеспечивает высокопроизводительные операции дискового ввода-вывода, а так же простоту в управлении файловой системой. ASM автоматически производит оптимальное распределение данных между всеми дисковыми ресурсами для достижения наилучшей производительности, что исключает необходимость ручной настройки дискового ввода/вывода [13, 14].

На рис. 1 [14] представлена схема кластера БД, построенного на основе Oracle RAC.

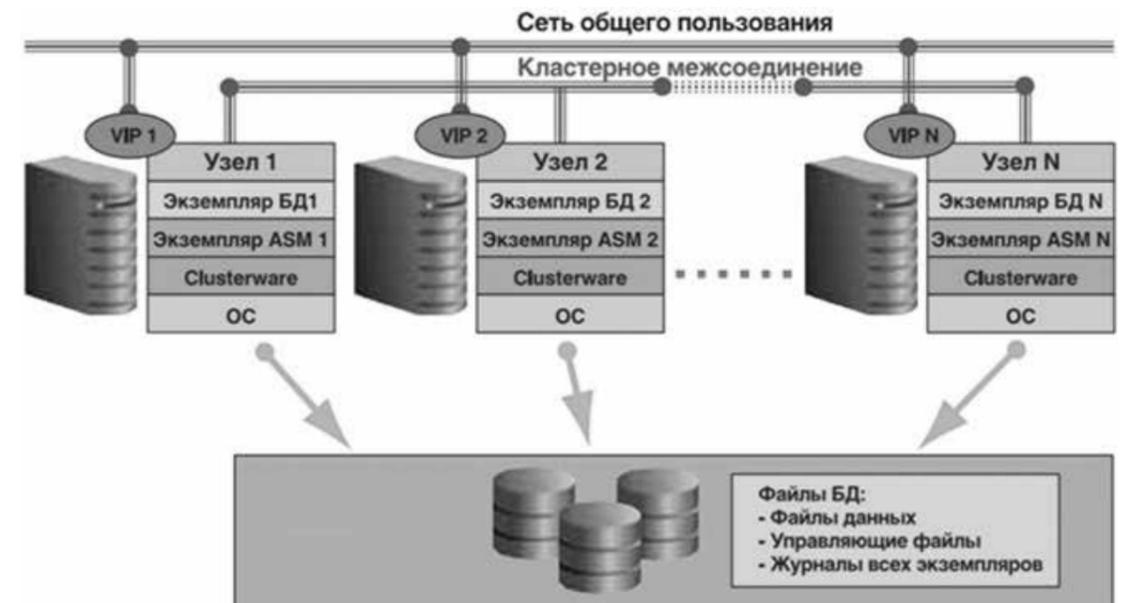


Рис. 1. Схема кластера БД, построенного на основе Oracle RAC

Таким образом, с учетом рассмотренных выше ОПО автоматизированной системы РСУ КА: аспектов сформулированы следующие требования к

Таблица 2.

#### Требования к общему программному обеспечению

На серверах кластера БД:	
ОС	Oracle Enterprise Linux версии не ниже 5.5
СУБД	Oracle Database 11g Release 1 Standard Edition с опцией RAC
Кластерное ПО	Oracle Clusterware
Прочее ПО	Oracle ASM
На персональных компьютерах:	
ОС	Windows версии XP или 7
Офисное ПО	средства Microsoft Office 2007
Прочее ПО	Oracle Database Client 11g Release 1
Прочие требования	поддержка протокола TCP/IP

К преимуществам использования ОС Linux на серверах кластера БД можно отнести безопасность, стабильность работы, бесплатность [13].

#### Проектные решения по техническому обеспечению

Для функционирования кластера БД, построенного по технологии Oracle RAC, требуется создание двух вычислительных сетей, изолированных одна от другой [13, 14]:

– сеть, обеспечивающая связь клиентских компьютеров с серверами кластера БД (публичная сеть). С использованием этой сети производится подключение клиентских сессий к базе данных, их балансировка между узлами и аварийное переключение в случае сбоя;

– сеть, обеспечивающая связь между серверами кластера (внутренняя сеть). В RAC такая сеть используется для реализации технологии «слияния» кэша (Cache Fusion) различных узлов кластера.

Таким образом, с учетом рассмотренных выше аспектов сформулированы следующие требования к техническому обеспечению разрабатываемой автоматизированной системы (рис. 2):



Рис. 2. Схема аппаратного обеспечения разрабатываемой автоматизированной системы

Стоит отметить, что сервера кластера БД и персональные компьютеры специалистов органа планирования должны удовлетворять минимальным системным требованиям, предъявляемым системным программным обеспечением.

Персональные компьютеры специалистов органа планирования должны обеспечивать эргономичное отображение информации. Для организации межсоединения между узлами кластера следует использовать коммутатор. Для этих целей Oracle рекомендует использовать отдельный коммутатор. Организация межсоединения с

помощью кросс-кабеля не сертифицирована компанией Oracle [13].

### Заключение

Таким образом, проведен анализ представленных проектных решений по АС распределения средств управления КА. Показано, что данные решения сформулированы исходя из требований, предъявляемых к АС РСУ КА. Одними из важнейших таких требований являются требования по оперативности выполнения задач специалистами органа планирования.

### Список литературы:

1. Schmidt M. Ground Station Networks for Distributed Satellite Systems, in Distributed Space Missions for Earth System Monitoring [Text] / M. Schmidt, K. Schilling // M. D'Errico, Editor. 2013, Springer New York. p. 355-371. DOI: 10.1007/978-1-4614-4541-8\_11.
2. Артюшенко В.М. Информационные технологии и управляющие системы: монография [Текст] / В.М. Артюшенко, Т. С. Аббасова, Ю. В. Стрелюк, В. И. Привалов, В. И. Воловач, Е. П. Шевченко, В. М. Зимин, Е. С. Харламова, А. Э. Аббасов, Б. А. Кучеров / под науч. ред. док. техн. наук, проф. В. М. Артюшенко. – М.: Издательство «Научный консультант», 2015. – 185 с.
3. Артюшенко В.М. Анализ энергетических характеристик линий корпоративной сети спутниковой связи [Текст] / В. М. Артюшенко, Б. А. Кучеров // Информационно-технологический вестник. – 2014. – №01 (01). – С. 13-19.
4. Artuschenko V.M. Modeling transmission rate of ground stations when working as part of a meshed network [Text] / V. M. Artuschenko, B. A. Kucherov // Austrian Journal of Technical and Natural sciences. – 2014. – №7-8. – pp. 96-99.
5. Артюшенко В.М. Повышение эффективности систем спутниковой связи путем оптимизации параметров земных станций [Текст] / В. М. Артюшенко, Т. С. Аббасова, Б. А. Кучеров // Радиотехника. – 2015. – №2. – С. 76-82.
6. Артюшенко В.М. Роль информатизации в повышении оперативности распределения средств управления космическими аппаратами [Текст] / В. М. Артюшенко, Б. А. Кучеров // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – №4. – С. 67-72.
7. Artushenko V.M. Threshold method of measurement of extended objects speed of radio engineering devices of short-range detection / V. M. Artushenko, V. I. Volovach // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2014). – Kiev, Ukraine, September 26-29, 2014. – Kharkov: KNURE. – 2014. – pp. 220-223. DOI: 10.1109/EWDTS.2014.7027078.
8. Артюшенко В.М. Алгоритмы адаптации линий спутниковой связи по мощности передающих устройств земных станций при работе в составе узловой сети [Текст] / В. М. Артюшенко, Б. А. Кучеров // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – №4, т.10. – С. 64-73.
9. Артюшенко В.М. Анализ состояния автоматизации распределения средств управления космическими аппаратами [Текст] / В. М. Артюшенко, Б. А. Кучеров // Приволжский научный вестник. – 2014. – №3-1 (31). – С. 14-17.
10. Роб П., Коронел К. Системы баз данных: проектирование, реализация и управление. – 5-е,

переаб. и доп. изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 1040 с.

11. Oracle Database производительная, масштабируемая, функциональная СУБД для среднего и малого бизнеса. OCS Distribution. URL: <http://ocs.ru/OCS/media/Products/Oracle/Сравнение-СУБД-Oracle-и-Microsoft.pdf>. Дата обращения: 22.08.2015.

12. Janet Stern, Mark Bauer, Vivian Schupmann, Douglas Williams. Oracle Database 2 Day + Real Application Clusters Guide 11g Release 1 (11.1). – Oracle, 2012. – 224 p.

13. Shaw S., Bach M. RAC Architecture, Pro Oracle Database 11g RAC on Linux. – Apress, 2010. – pp. 63-95. DOI: 10.1007/978-1-4302-2959-9\_3.

14. Преимущества СУБД Oracle. URL: <http://oracle.axoft.ru/fordev/advantagesOracle.php>. Дата обращения: 22.08.2015.

15. Avritzer A. Survivability Models for Global Software Engineering [Text] / A. Avritzer, S. Beecham, J. Kroll, M. Sadoc, J. Noll, M. Paasivaara // Proceedings of Global Software Engineering (ICGSE), 2014 IEEE 9th International Conference. – 2014. – pp. 100-109. DOI: 10.1109/ICGSE.2014.19.

### References

1. Schmidt M. Ground Station Networks for Distributed Satellite Systems, in Distributed Space Missions for Earth System Monitoring [Text] / M. Schmidt, K. Schilling // M. D'Errico, Editor. 2013, Springer New York. p. 355-371. DOI: 10.1007/978-1-4614-4541-8\_11.
2. Artushenko V.M. Informacionnye tehnologii i upravljajushhie sistemy: monografija [Tekst] / V.M. Artushenko, T. S. Abbasova, Ju. V. Strenaljuk, V. I. Privalov, V. I. Volovach, E. P. Shevchenko, V. M. Zimin, E. S. Harlamova, A. Je. Abbasov, B. A. Kucherov / pod nauch. red. dok. tehn. nauk, prof. V. M. Artushenko. – M.: Izdatel'stvo «Nauchnyj konsul'tant», 2015. – 185 p.
3. Artushenko V.M. Analiz jenergeticheskikh harakteristik linij korporativnoj seti sputnikovoj svjazi [Tekst] / V. M. Artushenko, B. A. Kucherov // Informacionno-tehnologicheskij vestnik. – 2014. – № 01 (01). – p. 13-19.
4. Artuschenko V.M. Modeling transmission rate of ground stations when working as part of a meshed network [Text] / V. M. Artuschenko, B. A. Kucherov // Austrian Journal of Technical and Natural sciences. – 2014. – № 7-8. – p. 96-99.
5. Artushenko V. M. Povyshenie jeffektivnosti sistem sputnikovoj svjazi putem optimizacii parametrov zemnyh stancij [Tekst] / V. M. Artushenko, T. S. Abbasova, B. A. Kucherov // Radiotekhnika. – 2015. – № 2. – p. 76-82.
6. Artushenko V. M. Rol' informatizacii v povyshenii operativnosti raspredelenija sredstv upravlenija

kosmicheskimi apparatami [Tekst] / V. M. Artjushenko, B. A. Kuchero // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. – 2014. – № 4. – S. 67-72.

7. *Artyushenko V.M.* Threshold method of measurement of extended objects speed of radio engineering devices of short-range detection / V. M. Artyushenko, V. I. Volovach // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2014). – Kiev, Ukraine, September 26-29, 2014. – Kharkov: KNURE. – 2014. – p. 220-223. DOI: 10.1109/EWDTS.2014.7027078.

8. *Artjushenko V.M.* Algoritmy adaptacii linij sputnikovoj svyazi po moshhnosti peredajushhij ustrojstv zemnyh stancij pri rabote v sostave uzlovoj seti [Tekst] / V. M. Artjushenko, B. A. Kuchero // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2014. – № 4, t.10. – p. 64-73.

9. *Artjushenko V.M.* Analiz sostojanija avtomatizacii raspredelenija sredstv upravlenija kosmicheskimi apparatami [Tekst] / V. M. Artjushenko, B. A. Kuchero // Privolzhskij nauchnyj vestnik. – 2014. – № 3-1 (31). – p. 14-17.

10. *Rob P., Koronel K.* Sistemy baz dannyh: proektirovanie, realizacija i upravlenie. – 5-e, pererab. i

dop. izd. – Spb.: BHV-Peterburg, 2004. – 1040 s.

11. Oracle Database proizvoditel'naja, masshtabiruemaja, funkcional'naja SUBD dlja srednego i malogo biznesa. OCS Distribution. URL: <http://ocs.ru/OCS/media/Products/Oracle/Sravnienie-SUBD-Oracle-i-Microsoft.pdf>. Data obrashhenija: 22.08.2015.

12. *Janet Stern, Mark Bauer, Vivian Schupmann, Douglas Williams.* Oracle Database 2 Day + Real Application Clusters Guide 11g Release 1 (11.1). – Oracle, 2012. – 224 p.

13. *Shaw S., Bach M.* RAC Architecture, Pro Oracle Database 11g RAC on Linux. – Apress, 2010. – pp. 63-95. DOI: 10.1007/978-1-4302-2959-9\_3.

14. Preimushhestva SUBD Oracle. URL: <http://oracle.axoft.ru/fordev/advantagesOracle.php>. Data obrashhenija: 22.08.2015.

15. *Avritzer A.* Survivability Models for Global Software Engineering [Text] / A. Avritzer, S. Beecham, J. Kroll, M. Sadoc, J. Noll, M. Paasivaara // Proceedings of Global Software Engineering (ICGSE), 2014 IEEE 9th International Conference. – 2014. – pp. 100-109. DOI: 10.1109/ICGSE.2014.19.



**Павлова А.С.**

**Pavlova A.S.**

аспирант,

кафедра «Системы управления и контроля химических производств» ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)»  
Россия, г. Москва

УДК 004.58

## СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ САПР В РОССИИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, ИМЕЮЩИХ МНОГОСВЯЗНУЮ СТРУКТУРУ

В статье рассмотрен комплекс вопросов по выбору и созданию систем управления технологическими объектами, имеющими многосвязную структуру на примере газодиффузионного производства. Представлены методы разделения изотопов урана и показана общая структурная схема газодиффузионного производства. Дана краткая характеристика газодиффузионного обогащения в России и описано состояние обогатительных комбинатов в нашей стране на настоящий момент. Выявлено, что разделительное производство отличается большим объемом данных контроля и управления, вследствие этого в статье раскрывается вопрос эффективности проектирования и эксплуатации систем подобных объектов автоматизации. Рассмотрены общеизвестные способы проектирования многосвязных систем: применение эталонных схем и копирование готовых узлов. Проанализированы особенности проектирования данными методами и выявлены слабые места систем автоматизированного проектирования и случаи взлома в современной автоматике на промышленных объектах разделительных производств. Представлены характеристики отечественных современных SCADA

-систем, указаны основные минусы систем под управлением операционных систем Windows или Linux. Затронута проблема внедрения вредоносного программного обеспечения (ВПО) в системах проектирования на промышленных объектах автоматизации. Целью ВПО является нарушение работы программно – аппаратных комплексов: удаление файлов, приведение в негодность структур размещения данных, дезинформация оператора автоматизированного рабочего места, блокирование работы оператора. Все действия ВПО могут носить террористический характер и приводить к катастрофе на предприятии, что влечет за собой не только экономический ущерб, но и потерю человеческих жизней в результате ошибок систем безопасности. На основе проведенного исследования автором предлагается уделить особое внимание аппаратуре и системам управления на чувствительность к проникновению и утечке информации. Сделаны выводы в создании решений, способных обеспечить надежную защиту критически важных объектов промышленности нашей страны. Указаны задачи, которые нужно реализовать в создании нового надежного комплекса для успешной эксплуатации объектов с повторяющейся структурой.

*Ключевые слова:* АСУТП, SCADA-системы, САПР, МЭК 61131, контроль, управление, ПЛК, эталонные схемы, вирус, Stuxnet, Simatic PCS7, кибератаки, программное обеспечение, операционная система.

## STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS FOR RUSSIA CAD TECHNOLOGICAL OBJECT HAVING A MULTIPLY STRUCTURE

In article, the complex of questions at a choice and creation of control systems of the technological objects having multicoherent structure on the example of gas-centrifugal production is considered. Methods of division of isotopes of uranium are presented and the general block diagram of gas-centrifugal production is shown. The short characteristic of gas-centrifugal enrichment in Russia is given and the condition of concentrating combines in our country currently is described. It is revealed that dividing production differs in large volume of data of control and management thereof in article the question of efficiency of design and operation of systems of similar objects of automation reveals. Well-known ways of design of multicoherent systems are considered: application of reference schemes and copying of ready knots. Features of design are analyzed by these methods and weak places of systems of the automated design and breaking cases in modern automatic equipment on industrial facilities of dividing productions are revealed. Characteristics of domestic modern SCADA – systems are submitted, the main minuses of systems under control of the Windows or Linux operating systems are specified. The issue of introduction of the malicious software (MS) in systems of design on industrial facilities of automation is touched. The purpose of MS is work violation programmatically – hardware complexes: removal of files, reduction in worthlessness of structures of placement of data, misinformation of the operator of the automated workplace, blocking of work of the operator. All actions of MS can have terrorist character and lead to accident at the enterprise that involves not only economic damage, but also I will lose human lives as a result of errors of security systems. On the basis of the conducted research by the author it is offered to pay special attention to the equipment and control systems to sensitivity to penetration and information leakage. Conclusions in creation of the decisions capable to provide reliable protection of crucial objects of the industry of our country are drawn. Tasks, which need to be realized in creation of a new reliable complex for successful operation of objects with the repeating structure, are specified.

*Keywords:* PCS, SCADA-systems, CAD, IEC 61131, control, management, PLC, reference circuit, virus, Stuxnet, Simatic PCS7, cyber-attacks, software, operating system.

### Введение

Человечеству с каждым годом требуется все больше электроэнергии, миллиарды баррелей нефти в год тратятся на производство электроэнергии. Решением проблемы нехватки ископаемых энергоресурсов является активное развитие ядерной энергетики. Природный уран состоит из трех радиоактивных изотопов:

- U-238 (около 99, 3 %)
- U-235 (около 0, 7 %)
- U-234 (около 0, 005 %)

Большинство энергетических реакторов работает на урановом топливе, обогащенном изотопом U-235. Каким способом можно выделить более легкие атомы урана U-235 из массы U-238? Ведь разница между ними всего три атомные единицы.

Существует четыре основных метода разделения (обогащения): магнитная сепарация, газодиффузионный метод, центрифужный и лазерный. Методы разделения изотопов урана различаются по степени селективности. Высокая селективность не всегда приводит к лучшим экономическим пока-

зателям. Соотношение капитальных вложений и энергетических затрат может сделать предпочтительными процессы с малой селективностью. Если селективность мала, требуемая концентрация конечного продукта может быть достигнута путем последовательного обогащения в установках, состоящих из большого числа ступеней. Невысокий эффект разделения в одной ступени

и низкое содержание изотопа U-235 в природном уране приводят к очень большим размерам завода. Основной единицей оборудования являются газовые центрифуги, скомпонованные в технологические агрегаты, группы и секции. [1] В общем виде структурная схема газодиффузионного производства представлена на рис.1.

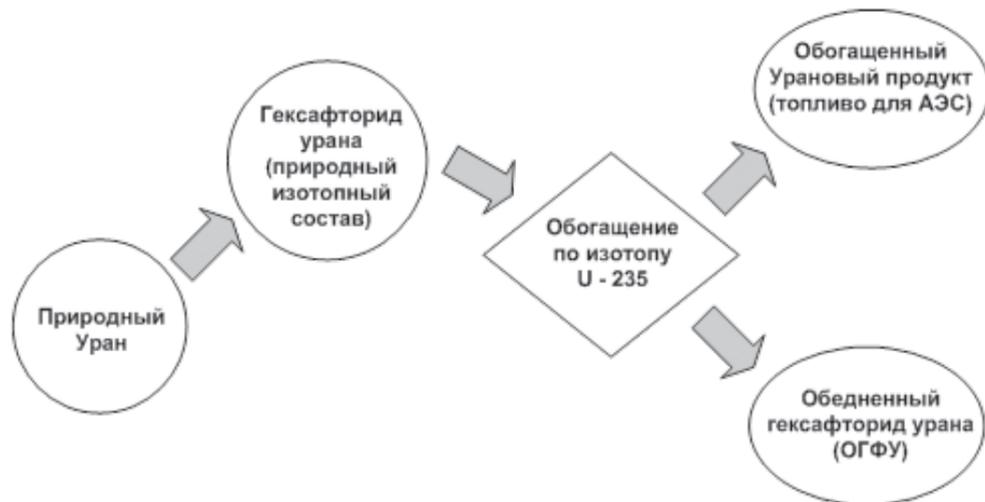


Рис.1. Общая структурная схема газодиффузионного производства [1]

Для процесса обогащения природный уран переводят в форму гексафторида. Разделительным элементом называется наименьшая часть установки для разделения изотопов, в которой питающая смесь разделяется на обогащенный урановый продукт (ОУП) и обедненный гексафторид урана (ОГФУ). ОУП передается потребителю, а ОГФУ направляется на хранение с последующей переработкой. Несколько разделительных элементов, соединенных

параллельно, образуют «ступень». На рисунке 2 показана схема соединения разделительных элементов в противоточный симметричный каскад. Требуемой концентрации выделяемого изотопа можно достичь путем последовательного соединения нескольких ступеней. Разделительное производство в целом характеризуется значительной территориальной распределенностью и большим числом однотипного технологического оборудования. [1]

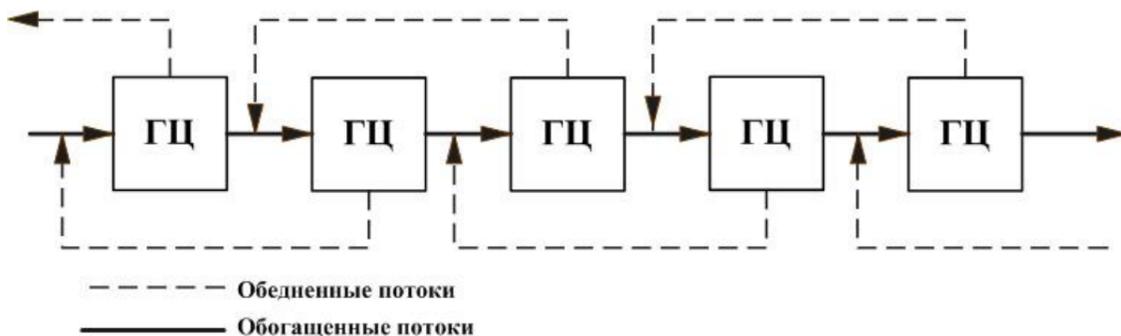


Рис.2. Пример противоточного симметричного каскада

**Разделительное производство в России**

Газодиффузионное обогащение – одна из тех технологий, в которых Россия удерживает безоговорочное лидерство. В настоящее время в нашей

стране действует четыре обогатительных комбината. [2] Разделительное производство было введено в эксплуатацию более 50 лет назад. В основных цехах предприятия для контроля и управления

оборудованием применяются системы на базе релейно-контактных систем, сданные в эксплуатацию 20-30 лет назад и выработавшие свой ресурс. Вскоре, перед предприятиями встанет задача замены устаревших систем на систему контроля и управления, которая бы отвечала современным требованиям, предъявляемых к программно-техническим средствам.

Разделительное производство сегодня – это каскады из сотен тысяч центрифуг, непрерывный режим работы, большое количество точек контроля, территориальная рассредоточенность точек контроля в пределах цеха, удаленность оборудования от диспетчерского пункта до 1 км, высокий уровень электрических помех, высокая стоимость оборудования, повышенные требования к надежности. Все эти технические сложности, должны быть четко проработаны. На рисунке 3 показана структурная схема объекта автоматизации с разбиением на зоны автоматизации.

Разделительное производство сегодня – это каскады из сотен тысяч центрифуг, непрерывный режим работы, большое количество точек контроля, территориальная рассредоточенность точек контроля в пределах цеха, удаленность оборудования от диспетчерского пункта до 1 км, высокий уровень электрических помех, высокая стоимость оборудования, повышенные требования к надежности. Все эти технические сложности, должны быть четко проработаны. На рисунке 3 показана структурная схема объекта автоматизации с разбиением на зоны автоматизации.

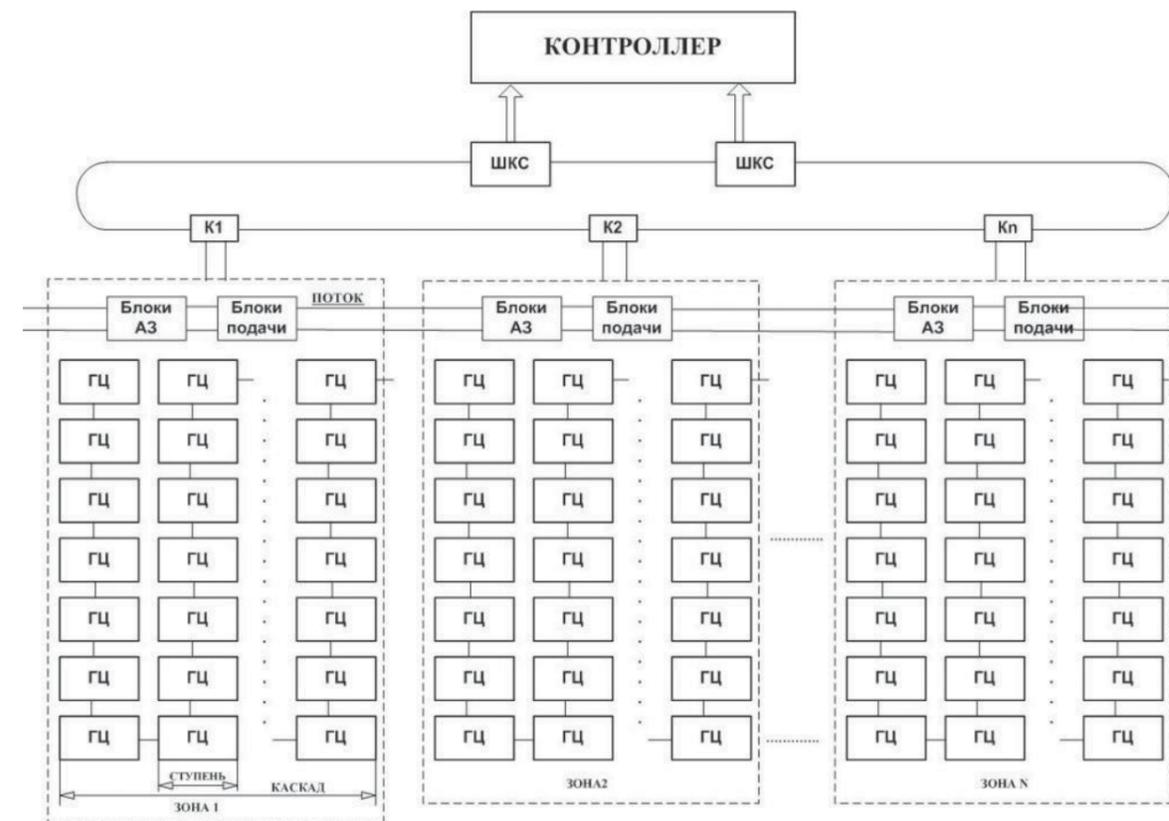


Рис.3. Структурная схема объекта автоматизации

Перед нами объект автоматизации с большим количеством данных и сразу возникает вопрос: “Как же этими данными эффективно управлять?” Это большое количество данных является результатом наличия многократно повторяющихся структур. Каждая центрифуга имеет набор параметров, за которыми осуществляется контроль по границам, пересчет различных параметров, а также выявление различных групповых сигналов. В АСУТП используются языки программирования, соответствующих стандарту МЭК 61131. [3] На первый взгляд, создание проекта, кажется тривиальным: создать блоки для управления отдельными параметрами центрифуги или использовать аппаратно-независимые библиотеки, соединить их

между собой, связать блоки с программируемым логическим контроллером (ПЛК) и благополучно отправить на верхний уровень, для отображения информации оператору.

Традиционно все изготовители ПЛК имеют свои собственные фирменные наработки в области инструментального программного обеспечения. Безусловно, большинство из них представляют удобные инструменты, оптимизированные под конкретную аппаратуру. Практически все SCADA-системы имеют один и тот же принцип создания системы управления механизмами, отличие сосредоточены в реализации интерфейса, в стиле графики, наборе сервисных функций, дополнительных библиотек. Главная задача инструментов

комплекса программирования ПЛК состоит в автоматизации работы разработчика прикладной системы. Он должен быть избавлен от рутинной работы и использовать хорошо организованную среду программирования, которая сама толкает к созданию надежного, читабельного и пригодного для повторного применения кода. В интегрированных комплексах программирования ПЛК сложился определенный набор возможностей, позволяющий относить их к средствам быстрой разработки. Сервисные функции программирования не являются требованием стандарта. Но от полноты набора доступных программисту инструментов существенно зависит скорость и качество его работы.

Для нашего случая существует один самый известный способ размножения системы – это использование эталонных схем, или копирование уже готовых узлов объектов. Основная особенность данного метода – это наличие графического редактора или текстового. Принцип действия таких схем основан на создании страницы рабочего кода, многократно используемого при создании проекта. Использование данного принципа может оказаться совсем не удобной процедурой.

Во-первых, в процессе размножения может возникнуть потеря уникальных имен для идентификации объекта управления, следствием чего будет потеря данных. За потерей данных следует второй фактор – это проблема некорректной архивации и хранения очень большого объема данных. Данные поступают от каждой газовой центрифуги, примерно, по 10 аналоговых сигналов и 10 дискретных. Возьмем, к примеру, 5000 газовых центрифуг. Количество сигналов, которые будут последовательно поступать на верхний уровень равно 100000 тысяч сигналов. Это только одна ступень, которая содержит сто тысяч сигналов, а если добавить групповые сигналы и сигналы систем неисправности, и следующую ступень – то архив просто напросто переполнится, что приведет к большим ошибкам и очень пагубно отразится на производстве.

И наконец, когда дело доходит до реализации, встает вопрос о том, что эти сотни-тысяч газовых центрифуг, соединены между собой определенными потоками, и далеко не идентичным способом. Управлять и контролировать приходится не только отдельными объектами, но и в дополнении контролировать связь между ними, связь потоков ОУП и ОГФУ. При создании единой системы, существующими средствами САПР, проект превращается в сплошную паутину, разобраться в коде очень

сложно, и если кодировщик, не оставил исходных файлов или хорошо написанного руководства по эксплуатации, то внести изменения в проект становится практически невозможно. Все это приводит к тому, что при отсутствии сопровождения, этап модернизации проекта превращается в мертвую зону с проблемой переделывания проекта заново.

#### *Вирус в современной автоматике*

Один из примеров современной автоматике – это программное обеспечение (ПО) фирмы Siemens – Simatic PCS7 под управлением операционных систем (ОС) семейства Microsoft Windows NT. Данное ПО является одним из лидеров в среде автоматизации технологических объектов и установлено на производстве по обогащению урана в городе Натанза (Иран). SCADA-система, вместе с аппаратной частью, во втором полугодии 2010 года была атакована вредоносным программным обеспечением (ВПО) под названием «Stuxnet». [4] Данное ВПО перехватывает и модифицирует информационный поток между программируемыми логическими контроллерами марки Simatic S7 и рабочими станциями SCADA-системы Simatic WinCC. Уникальность программы заключалась в том, что впервые в истории информационных технологий вирус физически разрушал инфраструктуру. [5] Существует предположение, что Stuxnet представляет собой специализированную разработку спецслужб Израиля и США, направленную против ядерного проекта Ирана. Приходится только гадать правдива эта информация или нет, однако остается неоспорим тот факт, что появились новые методы разрушения объектов – так называемые кибератаки.

В ходе последних событий и политической обстановки в мире, по отношению к нашей стране, остро встает вопрос – “Что же применять на наших заводах по обогащению урана?”

Аппаратура и система управления должна быть чувствительна к проникновению и утечке информации, необходимо обеспечить надежную защиту критически важных промышленных объектов нашей страны.

#### *Сравнительная характеристика отечественных систем*

Представители отечественных SCADA-систем – это знаменитые «TRACE MODE», «MasterSCADA», «КРУГ-200». В таблице 1 представлена сравнительная характеристика отечественной продукции.

Характеристики отечественных SCADA-систем

Критерии	TRACE MODE	MasterSCADA	КРУГ-200
Операционная система	Windows, Linux	Windows, Linux	Windows, Linux
Описание устройств нижнего уровня (контроллеров)	основано на OPC-серверах; также поддерживаются драйвера	основано на OPC-серверах; также поддерживаются драйвера	основано на OPC-серверах; также поддерживаются драйвера
Способы программирования алгоритмов	МЭК 6-1131/3	МЭК 6-1131/3	МЭК 6-1131/3
Используемые Базы данных	ANSI SQL	ANSI SQL	ANSI SQL
Демо-версии	Свободно распространяются демо-версии.		

Каждая из этих систем под управлением Windows или Linux, умеет работать с большинством известных контроллеров и имеет стандартный OPC-сервер и протоколы для обмена данными. Общедоступность данных ПО непременно говорит об уязвимости системы для проникновения ВПО. Зараженные объекты могут нанести действия, которые приводят к катастрофе, при этом дезинформируют оператора. Для безопасной работы оператору критически важно получать достоверную информацию и, исходя из этой информации, управлять производством. Проблема внедрения ВПО на объектах наводит на необходимость в создании решений, способных обеспечить надежную защиту критически важных объектов промышленности. Это позволит избежать ошибок управления и поможет при необходимости вовремя остановить производство, не допустив аварии. В настоящее время не существует ОС и ПО результатам, работы которых, мы могли бы полностью доверять. Данный факт не оставляет нам иного пути, кроме как приступить к самостоятельной разработке таких средств. Базовым средством обеспечения безопасности является операционная система. Закрытая операционная система даст гарантию, что информация корректна, достоверна и не содержит вредоносной составляющей.

Известный российский производитель антивирусного программного обеспечения «Лаборатория Касперского» заявил о создании своей операционной системы, которая будет использоваться в промышленности и не имеет аналога [3]. Правда данное предложение было выдвинуто в 2010 году и до сих пор не реализовано, и каков шанс «закрытости» операционной системы в большой компании, которая знаменита на весь мир. В каждой большой

корпорации существует пути «утечки» кадров, которые разглашают информацию и продают данные для разработок ВПО. Вопрос создания ОС ведет за собой создание ПО для технологических объектов, а также соответствующей ему аппаратной части. Что касается нашего оборудования и объекта исследования, можно сказать, что создание ОС – это очень трудоемкий и долгий процесс, а фактор времени в нашем случае необходимо учитывать, что не оставляет нам выбора, как найти пути решения среди создания нового или поиск среди существующих, не общедоступных ПО, и аппаратных частей.

#### *Вывод*

Написание системы управления для технологического объекта процедура довольно сложная. Важно понимать, что на эффективную работу системы в целом, влияет не только среда разработки, но также устройства ввода – вывода, управляющий контроллер и система верхнего уровня отображения информации для оператора.

На сегодняшний день, не существует однозначного представления, что делать с огромным набором одинаковых параметров. Необходимо создать целую стандартизованную методологию с подходом рациональной организации структуры управления документами и схемам, найти наиболее эффективный способ представления передачи данных. Если данные вопросы получится реализовать, то в нашей стране появиться отличное ПО, которое позволит сократить время на разработку и создание условий для успешной эксплуатации системы обогащения урана, а в дальнейшем и применение ее на заводах с повторяющейся структурой.

В заключении, хотелось бы отметить, что при выборе АСУ ТП для данного технологического объекта, нужно руководствоваться не только именем бренда, поставляющим аппаратуру, но

и задуматься, над уязвимости системы, над тем, что нужно искать отечественный, надежный программный комплекс, позволяющий защитить наши технологические объекты.

#### Список литературы

1. Беккер Е. Обогащение урана [Текст] / Е. Беккер, Ф. Босхотен, Б. Бриголи, Р. Дженсен, Д. Массиньон, Н. Натрат, К. Робинсон, Суббарамайер, С. Виллани; под ред. С. Виллани; пер. с англ. под ред. И.К. Кикоина. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
2. Официальный сайт АО «ТВЭЛ» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.tvel.ru> (дата обращения 21.12.2012)
3. PLCopen. Введение в языки стандарта МЭК 61131-3.
4. Сайт PLCopen [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.plcopen.org>.
5. Материал из Википедии – свободной энциклопедии [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Stuxnet>.

#### References

1. Bekker E. Obogashhenie urana [Tekst] / E. Bekker, F. Boshoten, B. Brigoli, R. Dzhensen, D. Massin'on, N. Natrat, K. Robinson, Subbaramajer, S. Villani; pod.red. S. Villani; per. s angl. pod red. I.K. Kikoina. – M.: Jenergoatomizdat, 1983. – 320 p.
2. Oficial'nyj sajt AO «TVJeL» [Jelektronnyj resurs]. – URL: <http://www.tvel.ru> (data obrashhenija 21.12.2012)
3. PLCopen. Vvedenie v jazyki standarta MJeK 61131-3.
4. Sajt PLCopen [Jelektronnyj resurs]. – URL: <http://www.plcopen.org>.
5. Material iz Vikipedii – svobodnoj jenciklopedii [Jelektronnyj resurs]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Stuxnet>



**Нурисламова Л.Ф.**  
**Nurislamova L.F.**

ассистент кафедры «Математика и математическое моделирование», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа



**Губайдуллин И.М.**  
**Gubaydullin I.M.**

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



**Сафин Р.Р.**  
**Safin R.R.**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Математика и математическое моделирование» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа

УДК 519.6:517, 001.891.573

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ

Математическое моделирование широко востребовано и применяется для обеспечения масштабного перехода от лабораторных установок к пилотным и опытно-демонстрационным реакторам. Ки-

нетическая модель, содержащая необходимую информацию об основных закономерностях химических превращений, являются первоосновой математической модели химического реактора. Поэтому вопрос разработки кинетической модели, описывающей превращения реагентов для широкого диапазона температур, становится актуальным. Однако установление схемы, по которой строится кинетическая модель реакции, является нетривиальной задачей. Использование детальных кинетических схем (включают десятки веществ и сотни стадий) при моделировании процесса важно для полного и точного описания процессов в широком диапазоне температур и условий. Однако использование детальных кинетических схем требует значительных вычислительных затрат при моделировании, в то время как кинетику реакции можно описать, используя гораздо меньшее число стадий, которые важны для рассматриваемой задачи при заданных условиях. Кроме того, задача редуцирования кинетических схем механизма реакции является необходимым этапом на пути проведения многомерных расчетов реакторов. Редуцирование детальных схем состоит в замене исходной системы системой меньшей размерности, в определенном смысле эквивалентной исходной, то есть близким образом описывающей изменение концентраций целевых для моделируемого процесса веществ.

Авторами предложена методика упрощения математической модели химической реакции за счет сокращения числа стадий и веществ схемы реакции, основанная на анализе чувствительности целевой функции к изменению параметров модели. В настоящей работе построена кинетическая модель газофазного пиролиза пропана с применением методики анализа чувствительности, адекватно описывающая экспериментальные данные низкотемпературного пиролиза пропана (820-980 К) при атмосферном давлении в условиях внешнего нагрева стенок реактора. Представлены результаты сравнительного анализа моделирования пиролиза пропана по детальной и редуцированной схемам и результаты исследования кинетики реакции газофазного пиролиза пропана при различных температурах проведения реакции и разных расходах смеси с использованием редуцированной кинетической модели.

**Ключевые слова:** анализ чувствительности, математическая модель реакции, кинетическая модель, газофазный пиролиз, низкотемпературный пиролиз пропана, редуцирование схемы реакции, химическая кинетика, пиролиз углеводородов, закон действующих масс, глобальный анализ чувствительности

## APPLICATION OF SENSITIVITY ANALYSIS FOR CONSTRUCTION OF CHEMICAL REACTION KINETIC MODEL

Mathematical modeling is widely demanded and used to provide a large-scale transition from laboratory to pilot plants and demonstration reactors. The kinetic model with the necessary information about the basic laws of chemical reactions is a fundamental principle of a mathematical model of a chemical reactor. Therefore the question of the development of a kinetic model that describes the transformations of reagents for a wide range of temperatures, becomes relevant. However, the establishment of the scheme, which is based on the kinetic model of the reaction is a nontrivial task. Using detailed kinetic schemes (include substances tens and hundreds of steps) in the modeling process is important for a complete and accurate description of the processes in a wide range of temperatures and conditions. However, the use of detailed kinetic schemes require considerable computational cost in the simulation while the reaction kinetics can be described using a much smaller number of steps, which are essential for the problem under predetermined conditions. In addition, the task of reducing the kinetic schemes of the reaction mechanism is a necessary step on the path of multi-dimensional calculations of reactors. The reduction of detailed schemes implies a replacement of the initial system by a system with a lower dimensionality, which is equivalent in some respect to the initial system and describes in a similar way the changes in concentrations of the target substances for the modeled process.

Methods simplified mathematical model of a chemical reaction by reducing the number of stages and substances reaction scheme, based on an analysis of the sensitivity of the objective function to change the parameters of the model are proposed by the authors. In this work, the kinetic model of the gas phase pyrolysis of propane adequately describes the experimental data of low-temperature pyrolysis of propane (820-980 K) under atmospheric pressure conditions, external heating of the reactor wall is constructed. Results of comparative analysis simulation by pyrolysis of propane and reduced detailed diagrams and the results of

the reaction kinetics study of gas-phase pyrolysis of propane at various temperatures and various reaction mixture flow rate with reduced kinetic model presented.

**Keywords:** sensitivity analysis, mathematical model of reaction kinetic model, the gas-phase pyrolysis, low-temperature pyrolysis of propane, reducing reaction scheme, chemical kinetics, pyrolysis of hydrocarbons, the law of mass action, the global sensitivity analysis

В настоящей работе предложена оригинальная методика получения сокращенной схемы химической реакции [1-3]. Объект исследования данной работы – процесс пиролиза пропана, проводимый в лабораторном реакторе в условиях внешнего нагрева стенок реактора при атмосферном давлении [3-5]. Исследование газофазного пиролиза пропана проводилось в проточном реакторе постоянного давления с внешним обогревом реакционной зоны. Эксперименты проводили в температурном диапазоне пристеночных температур 820-980 К при атмосферном давлении. Основными продуктами пиролиза пропана были этилен, метан, водород и пропилен. Также были обнаружены в небольшом количестве ацетилен, этан, бутadiен и бутилен (не превышают 3%).

Цель работы заключается в разработке редуцированной кинетической модели, позволяющей описать процесс низкотемпературного (820-980 К) пиролиза пропана при атмосферном давлении. Моделированию реакций пиролиза C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> углеводородов посвящено множество работ и предложено множество различных схем химических превращений (в том числе скелетных) различных

по назначению, степени адекватности и технологии конструирования. Проведенный анализ классических схем дегидрирования пропана [6, 7] с относительно небольшим числом стадий, до 20, показал, что расчетные кинетические зависимости имеют расхождения с экспериментально получаемыми результатами для процесса низкотемпературного пиролиза пропана при атмосферном давлении. В основу расчетов была положена детальная схема (включает в себя 157 стадий и 21 вещество), полученная на основе анализа и комбинирования схем, приведенных в работах [8-10].

Уравнения химической кинетики, составленные для описания реакции пиролиза пропана представляют собой систему нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений для модели изотермической нестационарной реакции, протекающей без изменения объема реакционной смеси в закрытой системе по закону действующих масс. Уравнение, описывающее реакцию разложения/образования продуктов и промежуточных веществ реакции, движущихся по реактору, имеет вид:

$$u \frac{dc_i}{dl} = \sum_{j=1}^N S_{ij} w_j, \quad i = 1 \dots M. \quad (1)$$

$$u = \frac{m}{\rho S} = \frac{m}{\rho \pi D^2 / 4}. \quad (2)$$

$$w_j = k_j \prod_{i=1}^M (c_i)^{\alpha_{ij}} - k_{-j} \prod_{i=1}^M (c_i)^{\beta_{ij}}. \quad (3)$$

$$k_i = A_i \cdot \left( \frac{T}{298} \right)^{n_i} \cdot e^{-\frac{E_i}{RT}}. \quad (4)$$

Начальные условия:  $c_i(0) = c_i^0$  – концентрация  $i$ -го вещества на входе в реактор.

Здесь  $c_i$  – концентрации участвующих в реакции веществ (моль/л);  $M$  – количество

веществ;  $N$  – количество стадий,  $S_{ij}$  – стехиометрические коэффициенты;  $\alpha_{ij}$  – отрицательные элементы  $S_{ij}$ ,  $\beta_{ij}$  – положительные элементы  $S_{ij}$ ,  $w_j$  – скорость  $j$ -ой стадии (моль/(л·с));

$k_j, k_{-j}$  – константы скоростей прямой и обратной стадии соответственно (1/с или л/(моль·с));  $u$  – скорость движения реакционной смеси по трубе (мм/с);  $\rho$  – плотность реакционной среды (кг/мм<sup>3</sup>);  $S$  – площадь сечения реактора (мм<sup>2</sup>);  $D$  – диаметр реактора (мм);  $l$  – координата по длине реакционной зоны (мм);  $L$  – длина реакционной зоны (мм);  $A_i$  – предэкспоненциальный множитель (1/с или л/(моль·с));  $E_i$  – энергия активации  $i$ -ой стадии (кДж/моль),  $n_i$  – температурная экспонента,  $R$  – газовая постоянная (кДж/(моль·К)),  $T$  – температура (К).

Полученная система уравнений, представляющая собой жесткую систему дифференциаль-

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K w_i (c_{ijk}^{sh1} - c_{ijk}^{sh2})^2 \quad (5)$$

где  $c_{ijk}^{sh1}$  – расчетные значения концентраций веществ, полученные по исходной схеме;  $c_{ijk}^{sh2}$  – расчетные значения концентраций веществ, полученные изменением (возмущением) параметров в схеме;  $w_i$  – вес вещества, который вводится для того, чтобы все переменные имели одинаковую значимость,  $K$  – количество точек времени,  $M$  – количество веществ.

Анализ чувствительности функционала модели позволяет выявить те параметры, которые обеспечивают наибольший (или наименьший) вклад на результат моделирования процесса. Математическая модель может содержать параметры, изменение значений которых не влияет на качественное и количественное описание процесса. Вклад таких параметров в значение функционала не будет иметь большого значения. Поэтому стадии, которые не служат для моделирования кинетических кривых веществ можно исключить из рассмотрения.

Вследствие высокой размерности задачи, первоначально, для 157 стадийной схемы, использовалась процедура локального анализа чувствительности функционала (5) к изменению констант скоростей стадий по формуле конечно-разностного приближения. При проведении локального анализа для каждого анализируемого параметра модели (константа скорости стадий) задача запускалась по одному разу с изменением значения параметра на 5%. На основании проведенного анализа была получена 58 стадийная схема

ных уравнений, решалась численно методом Гира в среде Matlab. Задаваемая точность вычислений – 10<sup>-9</sup>.

Компактная схема химических превращений пиролиза пропана была получена путем анализа чувствительности функционала модели к изменению констант скоростей стадий (либо к кинетическим параметрам Аррениуса), где функционал характеризует меру близости расчетных значений по исходной схеме и схеме, которая получается возмущением ее параметров в различные моменты времени и/или для различных температур:

(редуцированная схема 1) исключением параметров, для которых значения коэффициентов чувствительности были менее 10<sup>-3</sup>. Для проверки точности описания процесса частично редуцированной схемой 1, были проведены расчеты зависимости расхода пропана, образование основных и побочных продуктов реакции по времени при разных температурах. Максимальное отклонение с расчетами по детализированной схеме составило 0,1 %.

Для частично редуцированной схемы 1 проводился глобальный анализ чувствительности функционала (5) к изменению констант скоростей стадий. Для ранжирования влияния всех констант скоростей стадий на изменение значений функционала (5) использовались полные глобальные показатели чувствительности [11]. Интегралы для определения дисперсий вычислялись методом Монте-Карло. Генерировались различные значения констант скоростей (2<sup>11</sup> различных наборов) в пределах заданного диапазона и с помощью дисперсии оценивали как вариация констант оказывает влияние на изменение функционала. Для равномерного распределения возможных значений констант скоростей в интервале использовались точки ЛПт-последовательности, предложенные Соболев И.М. Была получена 30-ти стадийная редуцированная схема 2 (компактная схема), которая приведена в таблице 1 с оптимизированными значениями кинетических параметров.

Таблица 1.

Компактная кинетическая схема пиролиза пропана (редуцированная схема 2)

№	Стадия	№	Стадия
1	$C_3H_8 \rightarrow C_2H_5\cdot + CH_3\cdot$	16	$H_2 + C_3H_5\cdot \rightarrow C_3H_6 + H\cdot$
2	$C_2H_5\cdot + CH_3\cdot \rightarrow C_3H_8$	17	$C_3H_8 + C_3H_5\cdot \rightarrow C_3H_6 + n-C_3H_7\cdot$
3	$C_2H_5\cdot \rightarrow C_2H_4 + H\cdot$	18	$C_2H_4 + CH_3\cdot \rightarrow CH_4 + C_2H_3\cdot$
4	$C_2H_4 + H\cdot \rightarrow C_2H_5\cdot$	19	$CH_4 + C_2H_3\cdot \rightarrow C_2H_4 + CH_3\cdot$
5	$C_3H_8 + CH_3\cdot \rightarrow CH_4 + n-C_3H_7\cdot$	20	$H_2 + CH_3\cdot \rightarrow CH_4 + H\cdot$
6	$C_3H_8 + CH_3\cdot \rightarrow CH_4 + iso-C_3H_7\cdot$	21	$C_2H_4 + C_2H_3\cdot \rightarrow C_4H_7\cdot$
7	$C_3H_8 + H\cdot \rightarrow H_2 + n-C_3H_7\cdot$	22	$C_3H_6 + C_2H_3\cdot \rightarrow C_2H_6 + C_3H_5\cdot$
8	$C_3H_8 + H\cdot \rightarrow H_2 + iso-C_3H_7\cdot$	23	$C_4H_7\cdot \rightarrow C_4H_6 + H\cdot$
9	$n-C_3H_7\cdot \rightarrow C_2H_4 + CH_3\cdot$	24	$C_4H_7\cdot \rightarrow C_2H_4 + C_2H_3\cdot$
10	$iso-C_3H_7\cdot \rightarrow C_3H_6 + H\cdot$	25	$C_2H_6 + H\cdot \rightarrow H_2 + C_2H_5\cdot$
11	$n-C_3H_7\cdot \rightarrow C_3H_6 + H\cdot$	26	$C_3H_5\cdot \rightarrow C_2H_2 + CH_3\cdot$
12	$C_3H_6 + H\cdot \rightarrow n-C_3H_7\cdot$	27	$C_4H_8 \rightarrow C_3H_5\cdot + CH_3\cdot$
13	$C_3H_8 + C_2H_5\cdot \rightarrow C_2H_6 + n-C_3H_7\cdot$	28	$CH_3\cdot + CH_3\cdot \rightarrow C_2H_6$
14	$C_3H_8 + C_2H_3\cdot \rightarrow C_2H_4 + iso-C_3H_7\cdot$	29	$C_3H_5\cdot + CH_3\cdot \rightarrow C_4H_8$
15	$C_3H_6 + H\cdot \rightarrow H_2 + C_3H_5\cdot$	30	$C_2H_3\cdot + CH_3\cdot \rightarrow C_3H_6$

На рис. 1 приведены расчетные зависимости концентрации основных веществ реакции от температуры, где сплошной линией обозначены расчеты по детальной 157-стадийной схеме, штриховой – по компактной схеме для температурного диапазона 820-1050 К. Максимальное значение относительного отклонения расчетных значений концентраций веществ реакции по детальной и компактной схемам

составило 25%, видимо, в процесс включаются другие процессы, не учтенные в компактной схеме, однако сокращение схемы не изменило общую качественную динамику изменения концентраций веществ по температуре. По этой причине исследование полученной компактной кинетической модели пиролиза пропана проводилось для расширенного температурного диапазона 820-1050 К.

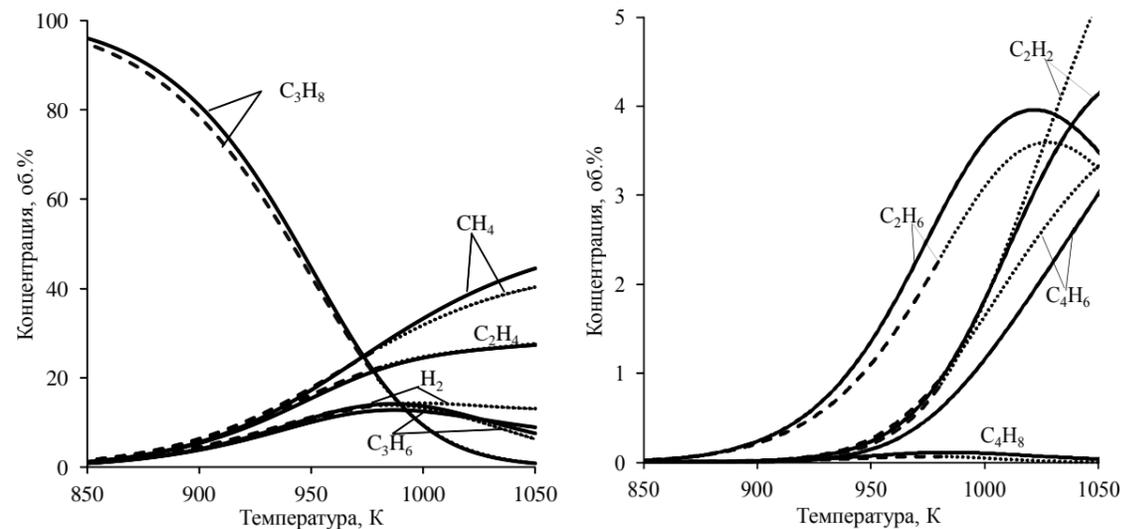


Рис. 1. Расчетные зависимости концентрации основных и побочных веществ реакции пиролиза пропана от температуры

На рис. 2 представлены результаты моделирования пиролиза пропана: образование продуктов реакции и расход пропана при разных температурах по длине реакционной зоны.

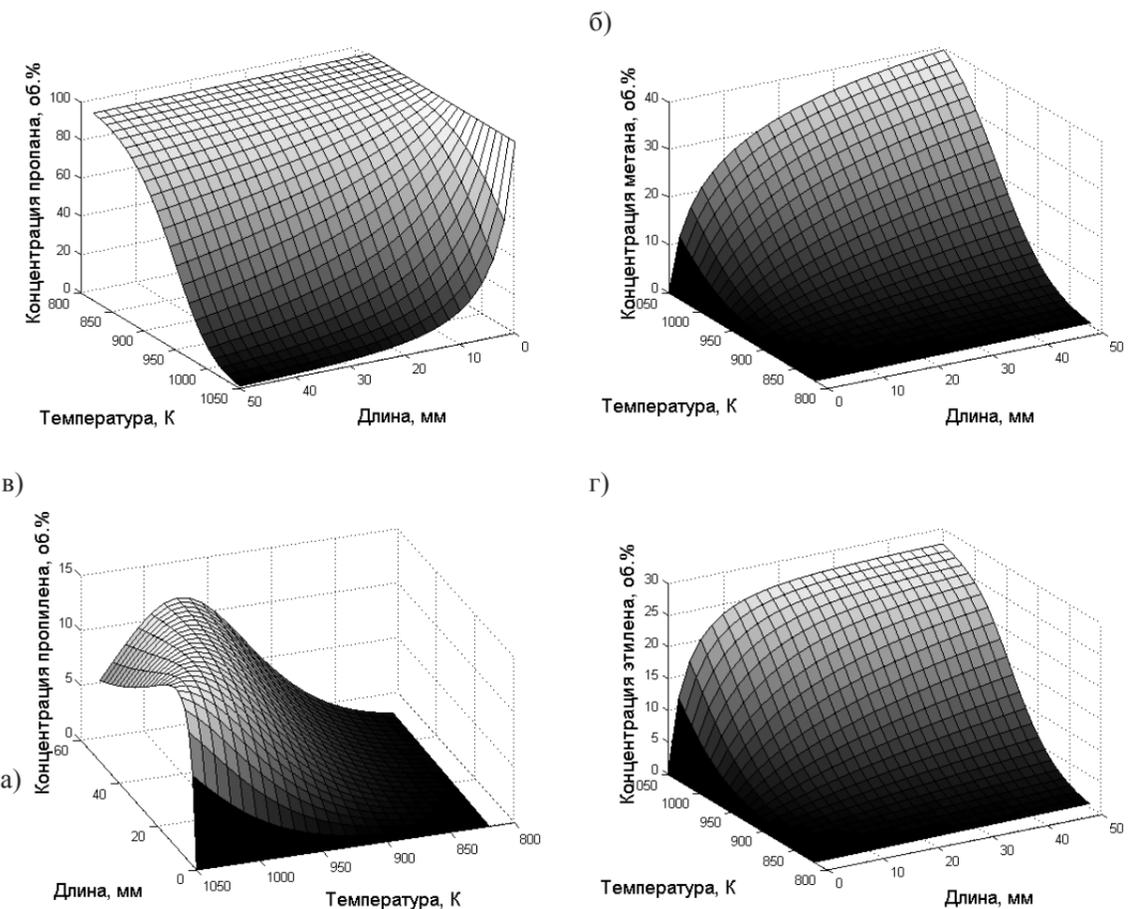


Рис. 2. Теоретические зависимости концентраций основных веществ реакции от температуры по длине реакционной зоны

Разложение пропана (рис. 2.а) постепенно увеличивается с увеличением температуры, и полное превращение может быть достигнуто при более высоких температурах (около 1050 К). Обращает на себя очень небольшой температурный интервал, в котором происходит переход от едва заметной реакции к значительному превращению пропана: при переходе пристеночной температуры от 910 К до 965 К расход пропана увеличивается в 2,3 раза.

Выход метана с увеличением времени пребывания в реакционной зоне и пристеночной температуры непрерывно возрастает (рис. 2.б). Постоянный рост доли пропилена наблюдается в температурном диапазоне 820-1000 К (рис. 2.в). Чем выше температура, тем быстрее доля пропилена достигает своего максимального значения в начале реакционной зоны, а затем постепенно уменьшается.

С ростом температуры происходит очень быстрая наработка этилена (рис. 2.г). При высоких температурах концентрация этилена достигает наивысшего значения в начале реакционной зоны и затем практически не меняется. При переходе пристеночной

температуры от 910 до 965 К выход этилена увеличивается в 3 раза.

Таким образом, разработана методика упрощения схемы химических превращений, основанная на анализе чувствительности функционала модели к изменению ее кинетических параметров, где функционал характеризует меру близости расчетных значений по исходной схеме реакции и схеме, полученной возмущением ее параметров. Построена компактная кинетическая модель и определены кинетические параметры модели газофазного пиролиза пропана с применением методики анализа чувствительности, адекватно описывающая экспериментальные данные низкотемпературного пиролиза пропана (820-980 К) при атмосферном давлении в условиях внешнего нагрева стенок реактора (максимальная относительная погрешность составила не более 13%). Исследована кинетика реакции газофазного пиролиза пропана при различных температурах проведения реакции и разных расходах смеси с использованием компактной кинетической модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-07-01764)

## Список литературы

1. Нурисламова Л.Ф. Методика получения редуцированной математической модели химической реакции [Текст] / Л.Ф. Нурисламова, И.М. Губайдуллин // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – Т. 3, № 57. – С. 266-271.
2. Нурисламова Л.Ф. Редукция детальных схем химических превращений окислительных реакций формальдегида и водорода на основании результатов анализа чувствительности математической модели [Текст] / Л. Ф. Нурисламова, И. М. Губайдуллин // Вычислительные методы и программирование. – 2014. – Т. 15. – С. 685-696.
3. Nurislamova L.F. Few-Step Kinetic Model of Gaseous Autocatalytic Ethane Pyrolysis and Its Evaluation by Means of Uncertainty and Sensitivity Analysis [Text] / L. F. Nurislamova, O. P. Stoyanovskaya, O. A. Stadnichenko, I. M. Gubaidullin, V. N. Snytnikov, A. V. Novichkova // Chemical Product and Process Modeling. – 2014. – 9(2) – P. 143-154.
4. Snytnikov V.N. Autocatalytic dehydrogenation of propane [Text] / V. N. Snytnikov, T. I. Mishchenko, V. N. Snytnikov, I. G. Chernykh // Research on Chemical Intermediates. – 2014. – Vol. 40. – P. 345-356.
5. Snytnikov V.N. Autocatalytic gas-phase dehydrogenation of ethane [Text] / V.N. Snytnikov, T.I. Mishchenko, V.I. Avdeev, V.N. Parmon // Research on Chemical Intermediates. – 2012. – Vol. 38. – P. 1133-1147.
6. Мухина Т.Н. Пиролиз углеводородного сырья [Текст] / Т.Н.Мухина Н.Л. Барabanov, С. Е. Бабаш и др. – Москва: Химия, 1987. – 240 с.
7. Жоров Ю.М. Кинетика промышленных органических реакций: справочник [Текст] / Ю. М. Жоров. – Москва : Химия, 1989. – 384 с.
8. Raseev S.D. Thermal and catalytic processes in petroleum refining [Text] / S.D. Raseev. – New York, USA, 2003. – 920 p.
9. Saеys W.S. Construction of an ab initio kinetic model for industrial ethane pyrolysis [Text] / W.S. Saеys Wenjie // AIChE Journal. – 2011. – Vol. 57, №9. – P. 2458-2471.
10. Marinov N.M. Aromatic and polycyclic aromatic hydrocarbon formation in a laminar premixed n-butane flame [Text] / N.M. Marinov, W.J. Pitz, C.K. Westbrook, et.al. // Combustion and Flame. – 1998. – Vol. 114, № 1-2. – P. 192-213.
11. Соболев И.М. Глобальные показатели чувствительности для изучения нелинейных математических моделей [Текст] / И.М. Соболев // Математическое моделирование. – 2005. – Т. 7, №9. – С. 43-52.

## References

1. Nurislamova L.F. Metodika poluchenija reducirovannoj matematicheskoj modeli himicheskoj reakcii [Tekst] / L.F. Nurislamova, I.M. Gubajdullin // Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii. – 2014. – Т. 3, № 57. – p. 266-271.
2. Nurislamova L.F. Redukcija detal'nyh shem himicheskij prevrashhenij okislitel'nyh reakcij formal'degida i vodoroda na osnovanii rezul'tatov analiza chuvstvitel'nosti matematicheskoj modeli [Tekst] / L.F. Nurislamova, I.M. Gubajdullin // Vychislitel'nye metody i programmirovanie. – 2014. – Т. 15. – p. 685-696.
3. Nurislamova L.F. Few-Step Kinetic Model of Gaseous Autocatalytic Ethane Pyrolysis and Its Evaluation by Means of Uncertainty and Sensitivity Analysis [Text] / L. F. Nurislamova, O. P. Stoyanovskaya, O. A. Stadnichenko, I. M. Gubaidullin, V. N. Snytnikov, A. V. Novichkova // Chemical Product and Process Modeling. – 2014. – 9 (2) – p. 143-154.
4. Snytnikov V. N. Autocatalytic dehydrogenation of propane [Text] / V. N. Snytnikov, T. I. Mishchenko, V. N. Snytnikov, I. G. Chernykh // Research on Chemical Intermediates. – 2014. – Vol. 40. – p. 345-356.
5. Snytnikov V.N. Autocatalytic gas-phase dehydrogenation of ethane [Text] / V.N. Snytnikov, T.I. Mishchenko, V.I. Avdeev, V.N. Parmon // Research on Chemical Intermediates. – 2012. – Vol. 38. – p. 1133-1147.
6. Muhina T.N. Piroлиз uglevodorodnogo syr'ja [Tekst] / T.N.Muhina N.L. Barabanov, S.E. Babash i dr. – Moskva: Himija, 1987. – 240 p.
7. Zhorov Ju.M. Kinetika promyshlennyh organicheskij reakcij: spravochnik [Tekst] / Ju. M. Zhorov. – Moskva: Himija, 1989. – 384 p.
8. Raseev S.D. Thermal and catalytic processes in petroleum refining [Text] / S.D. Raseev. – New York, USA, 2003. – 920 p.
9. Saеys W.S. Construction of an ab initio kinetic model for industrial ethane pyrolysis [Text] / W.S. Saеys Wenjie // AIChE Journal. – 2011. – Vol. 57, № 9. – p. 2458-2471.
10. Marinov N.M. Aromatic and polycyclic aromatic hydrocarbon formation in a laminar premixed n-butane flame [Text] / N.M. Marinov, W.J. Pitz, C.K. Westbrook, et.al. // Combustion and Flame. – 1998. – Vol. 114, № 1-2. – p. 192-213.
11. Sobol' I.M. Global'nye pokazateli chuvstvitel'nosti dlja izuchenija nelinejnyh matematicheskij modelej [Tekst] / I.M. Sobol' // Matematicheskoe modelirovanie. – 2005. – Т. 7, № 9. – p. 43-52.



**Козловский В.Н.**  
**Kozlovskiy V.N.**

доктор технических наук,  
заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника»,  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Россия, г. Самара.



**Антипов Д. В.**  
**Antipov D.V**

доктор технических наук,  
доцент, заведующий кафедрой  
«Торговое дело и управление производством»,  
ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», Россия, Тольятти.



**Панюков Д. И.**  
**Panukov D.I.**

кандидат технических наук,  
доцент, заведующий кафедрой  
«Современное естествознание»,  
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет сервиса», Россия, г. Тольятти.

УДК 658.562; 658.511

## ИНФОРМАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС И СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ПРОБЛЕМ КАЧЕСТВА АВТОМОБИЛЕЙ

Статья посвящена разработке и реализации информационно-аналитического комплекса и системы определения ключевых проблем качества автомобилей на этапах жизненного цикла. В работе решены задачи связанные: с определением общих принципов, положенных в основу классификации проблем по частоте возникновения и затратам на устранение; с разработкой и реализацией в рамках корпоративной системы мониторинга качества продукции, метода вскрытия ключевых проблем качества автомобилей.

Одной из основных задач обеспечения эксплуатационной эффективности автотранспортных средств является мониторинг качества продукции на этапах жизненного цикла. Мониторинг представляет собой процесс измерения показателей качества автомобилей в производстве и эксплуатации. Основным этапом измерения качества является эксплуатация. Именно здесь вскрываются ключевые проблемы конкурентоспособности продукции, а это, как правило, вопросы качества и надежности.

В условиях массового производства автомобильной техники, для построения и реализации комплекса мониторинга и системы вскрытия ключевых проблем качества, требуется решать задачи по созданию и поддержанию в актуальном состоянии электронных баз данных по всем инцидентам, связанным с недостаточным качеством продукции. При этом важной задачей является построение системы классификации несоответствий и дефектов, вскрываемых на этапах жизненного цикла продукции. Решение задачи классификации инцидентов предлагается осуществлять по нескольким критериям, среди которых основными являются частота возникновения и затраты на устранение. Кроме этого, предлагается учитывать тренд изменения частоты инцидентов с целью получения показателя актуальности проблем качества, а также количественный критерий определяющий сезонность инцидентов для обеспечения достоверности информации по наиболее важным проблемам. В результате работы, разработан и реализован на практике метод классификации проблем качества автомобилей в производстве и эксплуатации, позволяющий вскрывать ключевые проблемы качества автомобилей.

*Ключевые слова:* качество, надежность, автомобиль, информационный комплекс, информационная система

## INFORMATION CENTER AND SYSTEM FOR DETERMINING THE QUALITY CAR KEY ISSUES

The article is devoted to the development and implementation of information-analytical complex systems and identify key problems of quality cars on the stages of the life cycle. The paper solved problems related to: the

definition of the general principles underlying the classification of the problems by frequency of occurrence and cost of the removal; the development and implementation within the corporate system for monitoring the quality of products, the method of opening the key issues of quality cars.

One of the main tasks of ensuring the operational efficiency of vehicles is to monitor the product quality lifecycle. Monitoring is the process of measuring quality parameters of vehicles in production and operation. The main stage is a measurement of the quality of operation. It is here that opened the key issues of competitiveness of production, which, as a rule, question quality and reliability.

In the mass production of motor vehicles, for the construction and implementation of a complex system of monitoring and opening of the key issues of quality, it is required to solve the problem of creating and maintaining up to date electronic database of all incidents related to poor quality products. This important task is to build a system of classification inconsistencies and defects unsealed at the stages of product life cycle. Solution of the classification of incidents is proposed to carry out on several criteria, among which the main ones are the frequency of occurrence and the cost of the removal. In addition, it is proposed to take into account the trend of change of frequency of incidents in order to obtain the relevance indicator of quality problems, as well as a quantitative criterion for determining the seasonality of incidents to ensure the reliability of information on the most important issues. As a result of work developed and implemented in practice the method of classifying problems of quality cars in production and operation, allowing to open the key issues of quality cars.

Keyword: quality, reliability, car information systems, information system.

В условиях массового производства высокотехнологичной, сложной продукции, к числу которой относится автомобильный транспорт, задачи связанные с обеспечением эффективности эксплуатационного периода, для автопроизводителей, являются определяющими. Именно для этого в рамках корпоративных систем управления предприятий создаются аналитические секторы, где эксперты – аналитики, системно изучают вопросы, связанные с качеством, надежностью, а также в последнее время, с удовлетворенностью потребителей автомобилями в эксплуатационный этап жизненного цикла [8, 9, 10].

В настоящее время, в период кризиса, основные лидеры рынка сократили объемы выпуска новой продукции, однако, даже сейчас эти объемы остаются значительными. Выпуск новой продукции в эксплуатацию формирует гарантийный парк автотранспортных средств, а далее формирует общий парк автомобилей, определенной марки, находящихся в эксплуатации. Гарантийный парк крупного автопроизводителя составляет, как правило, несколько сотен тысяч, а иногда несколько миллионов транспортных средств. Каждый автомобиль нуждается в проведении технического обслуживания и ремонта, а с учетом того что современная единица автотранспорта состоит из десятков тысяч узлов и агрегатов, становится понятна актуальность задачи создания и обеспечения работы комплекса инструментов мониторинга качества, и системы вскрытия ключевых проблем качества автомобилей.

Именно поэтому целью представленной работы является разработка и реализация метода классифи-

кации дефектов и несоответствий автомобилей, проявившихся как при изготовлении, так и при эксплуатации, для планирования корректирующих действий по устранению их причин, а также информационно-аналитической системы решающей практическую задачу поиска ключевых проблем качества, в рамках корпоративного комплекса мониторинга эффективности продукции на этапах жизненного цикла.

Для достижения указанной цели в работе решаются задачи:

- определение общих принципов, положенных в основу классификации дефектов и несоответствий;
- разработки и реализации в рамках корпоративной системы мониторинга качества продукции, метода вскрытия ключевых проблем качества автомобилей, как совокупность методик: классификации дефектов гарантийной эксплуатации; предпродажной подготовки; внутренних дефектов производства; классификации несоответствий.

Классификация дефектов используется на подготовительном этапе процесса решения проблем качества продукции (8D).

На подготовительном этапе процесса решения проблем «Определение проблемы». Предпосылкой существования проблемы является дефект или несоответствие. Однако не каждый дефект или несоответствие является проблемой. Под проблемой понимается ситуация, при которой ожидаемый уровень выполнения определенной работы не достигается, и причина невыполнения этого норматива не известна. Таким образом, в нашем случае проблема это дефект или несоответствие, один из показателей которого

(например, частота возникновения, значимость, изменение частоты возникновения) не укладывается в допустимые пределы по неизвестной причине.

Предлагаемый метод позволяет поставить в соответствие каждому дефекту или несоответствию количественную оценку важности устранения как для потребителя, так и автопроизводителя – приоритетное число риска. Это позволяет установить одинаковое для всех дефектов или несоответствий перечня нормативное значение по этому показателю (например, 100 баллов) и из всего множества существующих дефектов и несоответствий выделить проблемы, т.е. дефекты, имеющие высокий приоритет устранения и неизвестную причину возникновения.

Таким образом, классификация является своеобразным фильтром, позволяющим (еще до начала процесса 8D) определить дефекты или несоответствия, для которых необходимо инициировать процесс решения проблем качества продукции [1, 7].

Проблемы качества для классификации определяются из перечня постоянных (т.е. встречающихся в каждом из рассматриваемых месяцев) дефектов, несоответствий. Под таким перечнем подразумевается множество различных проблем (по сочетанию «код детали», «код дефекта» и «место дефекта»), проявившихся на автомобилях за анализируемый период времени.

Для дальнейшего анализа (причин проблемы и планирования корректирующих действий) для каждого постоянного дефекта, несоответствия составляется перечень моделей или модификаций автомобилей, на которых он встречается, а также перечень подразделений, на которые относилась проблема за рассматриваемый период времени.

Каждая проблема в области качества характеризуется набором элементарных показателей: частотой

возникновения (количеством дефектов на один выпущенный автомобиль); значимостью (затратами или трудоемкостью устранения); трендом частоты возникновения. Для преобразования значений различных элементарных показателей проблемы в сопоставимые (безразмерные) единицы производится их перевод в ранги с помощью шкал. Ранг показателя проблемы представляет собой результат сопоставления значения элементарного показателя с его граничными значениями (например, минимальным и максимальным). После того как элементарные значения показателей проблемы переведены в соответствующие ранги, производится их свертка в комплексный показатель – приоритетное число риска (ПЧР). Свертка осуществляется по принципу, приведенному в руководстве по FMEA (ГОСТ Р 51814.2), т.е. ПЧР равно произведению элементарных рангов [1, 4, 5, 6].

При выборе проблемы качества на предмет применения к их причинам корректирующих действий все постоянные дефекты, несоответствия или отказы ранжируются по убыванию ПЧР. В первую очередь следует рассматривать дефекты, занявшие «первые места» в полученном перечне.

Таким образом, алгоритм ранжирования проблем надежности состоит из следующих этапов (рис. 1): получение перечня постоянных проблем надежности продукции в анализируемый период; расчет значений элементарных показателей – для каждой постоянной проблемы осуществляется по формулам по всем показателям, входящим в комплексный ранг; перевод значений элементарных показателей в ранги – осуществляется при помощи шкал перевода; свертка элементарных рангов в комплексный – ПЧР; ранжирование проблем по ПЧР и выбор объектов для корректирующих действий.

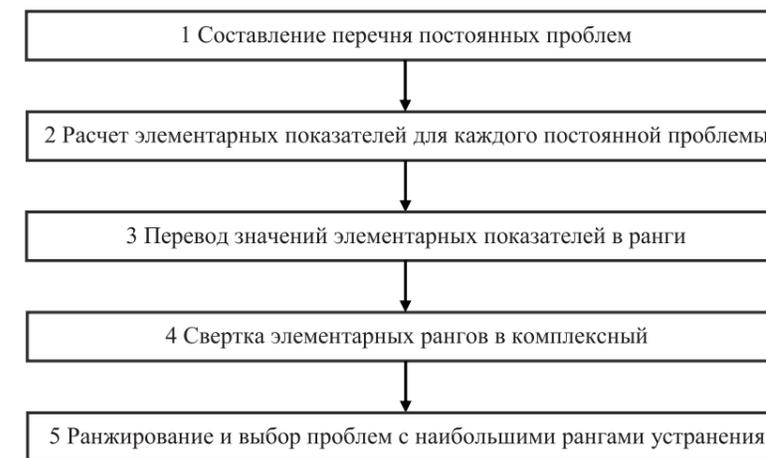


Рис. 1. Общая схема ранжирования проблем

Формализация задачи классификации проблем заключается в следующем. Имеется набор объектов, каждый из которых обладает системой параметров. Набор объектов ранжируется по системе параметров. Менеджер моделирует различные ситуации, управляя способом ранжирования, и производит выбор объекта или группы объектов [1, 2, 3, 7].

Для классификации проблем качества используется метод, основанный на принципе, приведенном в руководстве по FMEA: каждому дефекту, несоответствию ставится в соответствие число – ПЧР, характеризующее их по некоторым факторам (например, частоте его возникновения, значимости для потребителя, сложности устранения или обнаружения и т.п.). По полученным ПЧР производится ранжирование.

Предлагаемый метод, основан на правиле теории вероятностей: вероятность наступления

нескольких независимых событий одновременно вычисляется как произведение вероятностей наступления каждого из событий. Отличием, являются шкалы измерения рангов. Как показывает практика, ранжирование проблем качества только по одному признаку (например, массовости или затратам) не является эффективным. Проводить корректирующие действия необходимо как для массовых, но мало-значительных, так и для более редких, но значимых (дорогостоящих) дефектов, несоответствий.

Ранжирование проблем надежности необходимо производить ежемесячно. Месяц, в который производится ранжирование, называется расчетным месяцем.

Следовательно, для определения приоритета устранения той или иной проблемы, необходим комплексный показатель, включающей как минимум оценку массовости и оценку значимости (рис. 4).

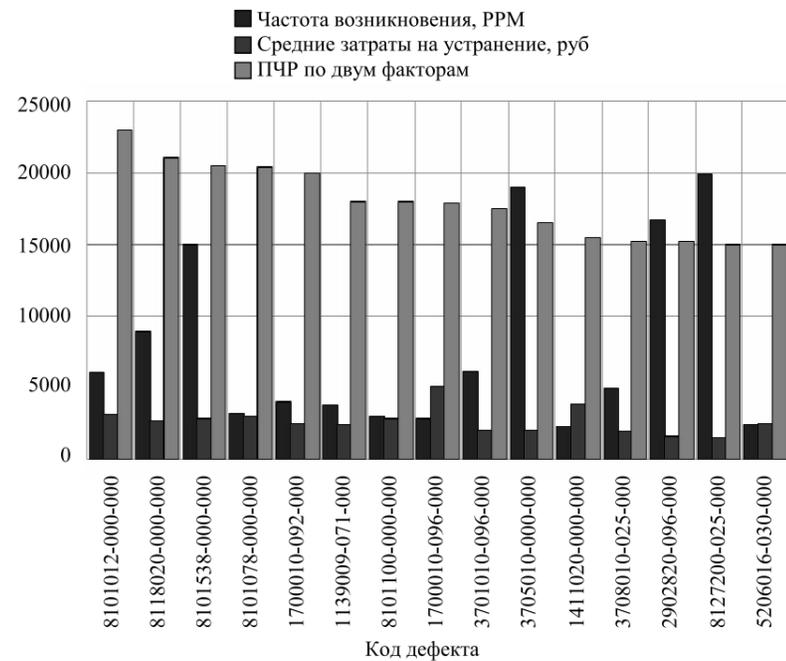


Рис. 2. Ранжирование проблем надежности автомобилей по совокупности двух факторов: частоте возникновения и средним затратам на устранение

В качестве оценки массовости проявления проблем надежности в предлагаемом методе рассматривается ранг возникновения или результат перевода в баллы частоты проявлений рассматриваемого дефекта, несоответствия или отказа на одном (выпущенном или проверенном) автомобиле.

В качестве оценки значимости рассматривается результат перевода в баллы средних затрат на

устранение (или трудоемкости устранения) одного проявления рассматриваемой проблемы. Значимость несоответствия определяется коэффициентом дефектности (по 50-ти балльной шкале).

Также в последнее время на первый план выходит задача наискорейшего обнаружения проблем, вероятность проявления которых на автомобиле растет (рисунок 3). Поэтому для выделения проблем надежности, причины которых необхо-

димо устранить в первую очередь, предлагается или тенденции изменения (роста или снижения) также учитывать тренд частоты возникновения вероятности проявления.

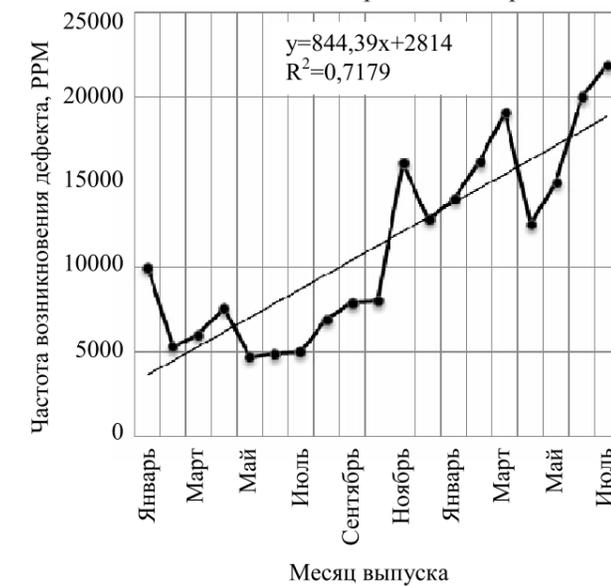


Рис. 3 – Динамика частоты возникновения «растущей» проблемы надежности по коду 8127200-025-000

Проявление некоторых проблем подвержено влиянию сезонных факторов, таких как различная интенсивность эксплуатации автомобилей, различные задержки продаж автомобилей (разница между датами выпуска и продажи автомобиля) и т.п. Вероятность проявления таких дефектов изменяется периодически (или описывается гармонической функцией). Следовательно, оценивание тенденций изменения проблем будет значительно зависеть от периода года, в который проводится анализ.

Так, например, для временного ряда частоты проявления одного из дефектов линейные тренды, построенные по различным периодам года, значительно отличаются (рисунок 4). Следовательно, результаты ранжирования таких дефектов будут не постоянными от месяца к месяцу в течение года, что существенно затруднит планирование и анализ результативности (эффективности) корректирующих действий.

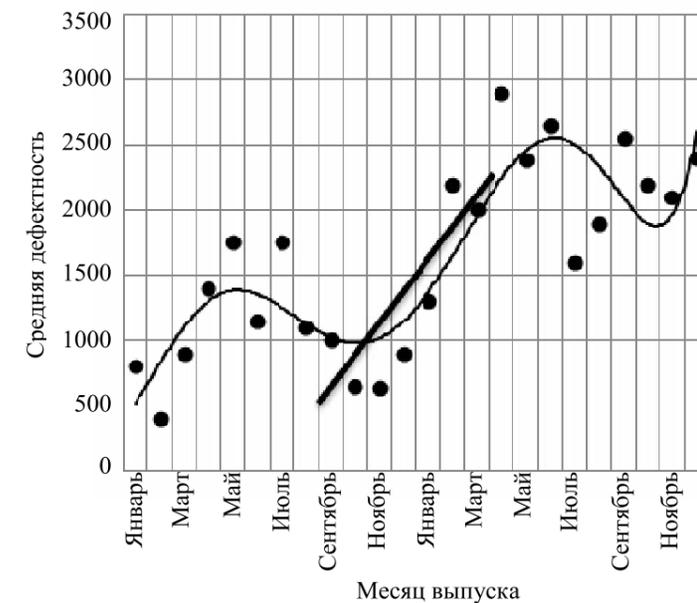


Рис. 4 – Иллюстрация влияния сезонности (дефект 6105013-056-001)

Пусть линейный тренд, наилучшим образом смысле метода наименьших квадратов (рисунок 5), приближающий шесть рассматриваемых точек в описывается уравнением:

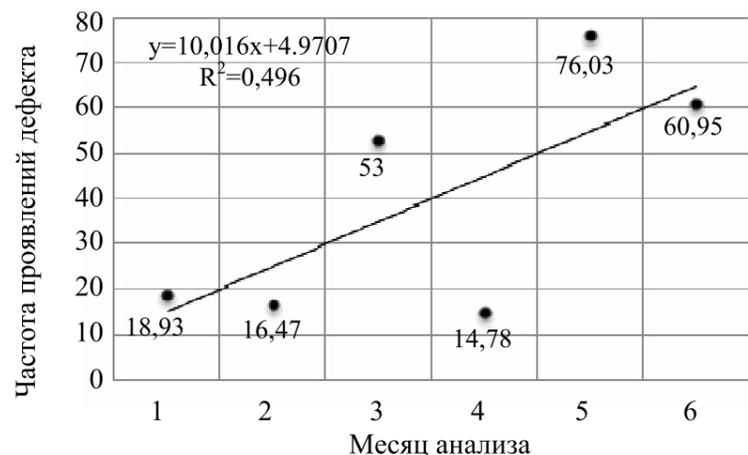
$$y_n = b + kn, \tag{1}$$

где  $n$  – порядковый номер месяца,  $b$  и  $k$  – параметры линейного тренда, вычисляются по формулам:

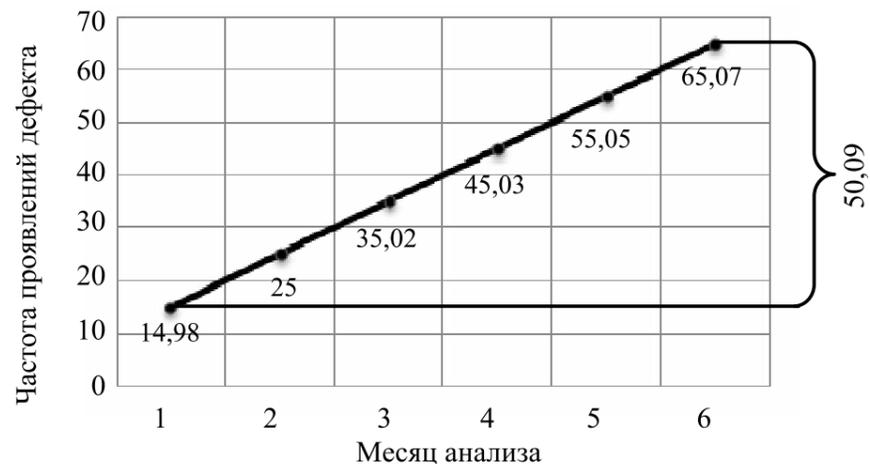
$$b = \frac{\left(\sum_{n=1}^N n^2\right) \cdot \left(\sum_{n=1}^N \bar{d}_n\right) - \left(\sum_{n=1}^N n\right) \cdot \left(\sum_{n=1}^N n \cdot \bar{d}_n\right)}{N \cdot \left(\sum_{n=1}^N n^2\right) - \left(\sum_{n=1}^N n\right)^2}, \tag{2}$$

$$k = \frac{N \cdot \left(\sum_{n=1}^N n \cdot \bar{d}_n\right) - \left(\sum_{n=1}^N n\right) \cdot \left(\sum_{n=1}^N \bar{d}_n\right)}{N \cdot \left(\sum_{n=1}^N n^2\right) - \left(\sum_{n=1}^N n\right)^2}. \tag{3}$$

где  $N$  – количество рассматриваемых месяцев анализа ( $N=6$ ).



а)



б)

Рис. 5. Вычисление тренда частоты возникновения отказа

Как видно из рисунка (рис. 1 б), за весь период анализа частота возникновения увеличилась (по тренду) на  $y_N - y_1$  ( $N=6$ ). Для вычисления относительного изменения тренда за один месяц анализа разделим полученную величину на значение линии тренда в первой точке анализа  $y_1$  на 5 (длительность периода анализа минус один месяц) по формуле:

$$tr = \frac{1}{N-1} \cdot \frac{y_N - y_1}{y_1} \cdot 100\% = \frac{(b + Nk) - (b + k)}{(N-1)(b+k)} \cdot 100\% = \frac{k}{b+k} \cdot 100\%. \tag{4}$$

Оценить степень зависимости частоты возникновения от времени (месяца выпуска) позволяет коэффициент корреляции, вычисляемый по формуле (рис. 6):

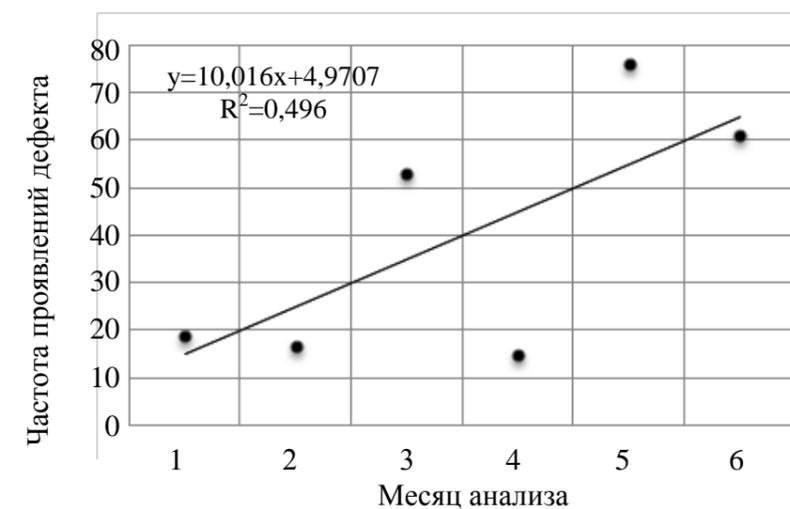
$$R^2 = \frac{N \cdot \left(\sum_{n=1}^N n \cdot \bar{d}_n\right) - \left(\sum_{n=1}^N n\right) \cdot \left(\sum_{n=1}^N \bar{d}_n\right)}{\left(N \cdot \left(\sum_{n=1}^N (\bar{d}_n)^2\right) - \left(\sum_{n=1}^N \bar{d}_n\right)^2\right) \left(N \cdot \left(\sum_{n=1}^N n^2\right) - \left(\sum_{n=1}^N n\right)^2\right)}. \tag{5}$$

Тренд частоты возникновения за месяц с учётом степени зависимости частоты возникновения от времени определяется по формуле:

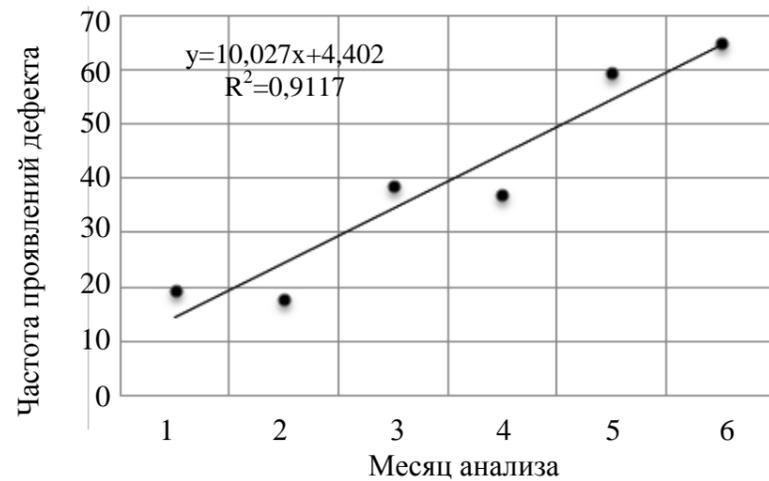
$$tr^* = tr \cdot R^2. \tag{6}$$

Этот показатель и используется в оценке факторов сезонности для определения изменения частоты возникновения отказов.

Период анализа влияния сезонности должен включать как минимум два предполагаемых периода колебаний, при этом желательно рассматривать три периода колебаний – 36 месяцев. Не рекомендуется включать в период анализа влияния сезонности месяцы, в которые на временной ряд действовали известные особые причины (если эти причины и их влияние идентифицированы, то следует устранить из анализируемого ряда результаты действия таких причин).



а)



б)

Рис. 6. Оценивание степени зависимости частоты возникновения отказа от времени

Для определения первого и последнего (тридцать шестого) месяцев выпуска используется табл. 1. Для каждого  $i$ -го отказа рассчитывается количество его проявлений на автомобилях, выпущенных в каждом месяце периода анализа влияния сезонности  $D_1^i, D_2^i, \dots, D_N^i$  ( $N$  – количество месяцев периода анализа влияния сезонности). Для каждого отказа вычисляется частота возникновения в каждом месяце анализа по формуле [1, 8]:

$$\bar{d}_n^i = \frac{D_n^i}{V_n} \cdot 10^6, \quad (7)$$

где  $n$  – порядковый номер месяца анализа влияния сезонности ( $n = \overline{1, N}$ ),  $V_n$  – количество автомобилей, выпущенных в каждом месяце.

Таблица 1

Определение периода анализа влияния сезонности

Расчетный месяц	Дата выпуска автомобиля	
	Первый месяц периода анализа влияния сезонности	Последний месяц периода анализа влияния сезонности
Январь [год] <sup>3</sup>	Июнь [год-4]	Январь [год]
Февраль [год]	Июль [год-4]	Февраль [год]
Март [год]	Август [год-4]	Март [год]
Апрель [год]	Сентябрь [год-4]	Апрель [год]
Май [год]	Октябрь [год-4]	Май [год]
Июнь [год]	Ноябрь [год-4]	Июнь [год]
Июль [год]	Декабрь [год-4]	Июль [год]
Август [год]	Январь [год-3]	Август [год]
Сентябрь [год]	Февраль [год-3]	Сентябрь [год]
Октябрь [год]	Март [год-3]	Октябрь [год]
Ноябрь [год]	Апрель [год-3]	Ноябрь [год]
Декабрь [год]	Май [год-3]	Декабрь [год]

<sup>3</sup> – год, в который производится расчет

Выделяем из рассматриваемого ряда дефектности (1)  $y_n$  линейную (долгосрочную) составляющую по формуле:

$$x_n = y_n - (b + kn) = y_n - b - kn, \quad n = \overline{1, N}, \quad (8)$$

где  $y_n$  – исходный временной ряд частоты возникновения,  $x_n$  – временной ряд частоты возникновения, из которого удалена линейная составляющая. Параметры линейного тренда  $b$  и  $k$  определяются по формулам (2) и (3) для периода соответствующей длительности  $N$ . В качестве математической модели, описывающей сезонные изменения в поведении отказов, рассматриваем уравнение:

$$g_n = a \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T}n + \varphi_0\right), \quad n = \overline{1, N}. \quad (9)$$

где  $a$ ,  $T$  и  $\varphi_0$  – амплитуда, период и начальная фаза сезонных колебаний соответственно. Начальную фазу колебаний  $\varphi_0$  также достаточно определять с точностью до месяца, таким образом, рассматриваются только начальные фазы колебаний, кратные  $1/12$  периода, то есть повторяющиеся от года к году.

Период колебаний  $T$  равен 12 месяцам, т.к. рассматриваются сезонные изменения отказов, колебаний, кратные  $1/12$  периода, то есть повторяющиеся от года к году.

$$\varphi_0 = \frac{2\pi}{T}\tau_0 = \frac{\pi}{6}\tau_0, \quad \tau_0 = \overline{0, 11}. \quad (10)$$

При поиске оптимальной аппроксимирующей функции вида (9) необходимо рассмотреть только 12 возможных начальных фаз. Влияние сезонности на отказы в зависимости от начальной фазы колебаний приведено в табл. 2.

Таблица 2

Влияние месяца выпуска автомобиля на сезонные изменения отказов

Начальная фаза	Максимальное увеличение дефектности из-за сезонности	Максимальное уменьшение дефектности из-за сезонности	Отсутствует влияние сезонности
0	Апрель	Октябрь	Январь, июль
1	Май	Ноябрь	Февраль, август
2	Июнь	Декабрь	Март, сентябрь
3	Июль	Январь	Апрель, октябрь
4	Август	Февраль	Май, ноябрь
5	Сентябрь	Март	Июнь, декабрь
6	Октябрь	Апрель	Июль, январь
7	Ноябрь	Май	Август, февраль
8	Декабрь	Июнь	Сентябрь, март
9	Январь	Июль	Октябрь, апрель
10	Февраль	Август	Ноябрь, май
11	Март	Сентябрь	Декабрь, июнь

Кроме того, функция синус, представленная в уравнении (9), обладает следующим свойством:

$$\sin(\varphi) = -\sin(\pi + \varphi). \quad (11)$$

Следовательно, с точностью до знака амплитуды, можно сократить количество рассматриваемых начальных фаз до шести (например,  $\tau_0 = \overline{0, 5}$ ).

Таким образом, уравнение, описывающее сезонные колебания отказов, имеет вид:

$$g_n = a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}(n + \tau_0)\right), \quad n = \overline{1, N}, \quad \tau_0 = \overline{0, 5}. \quad (12)$$

Для определения амплитуды колебаний воспользуемся методом наименьших квадратов (МНК) [2, 15]. Минимизируется функция:

$$G = \sum_{n=1}^N \left( x_n - a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}(n + \tau_0)\right) \right)^2 \rightarrow \min, \quad \tau_0 = \overline{0, 5}. \quad (13)$$

При помощи МНК получаем значения оптимальных амплитуд (в зависимости от  $\tau_0$ ):

$$a_{\tau_0} = \frac{\sum_{n=1}^N x_n \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}(n + \tau_0)\right)}{\sum_{n=1}^N \left[ \sin\left(\frac{\pi}{6}(n + \tau_0)\right) \right]^2}, \quad \tau_0 = \overline{0, 5}. \quad (14)$$

Очевидно, что минимальное значение функции  $G$  достигается при максимальной по модулю амплитуде  $a_{\tau_0}$ . Следовательно, для поиска гармонической функции, наилучшим образом приближающей  $x_n$ , достаточно найти максимальную по модулю амплитуду из  $a_0, a_1, \dots, a_5$  и начальную фазу  $\tau_0 = \overline{0, 5}$ , при которой достигается эта амплитуда. Для оценивания значимости полученных сезонных колебаний сравним качество приближения исходного ряда отказов  $y_n$  при помощи линейного тренда, определяемое по формуле:

$$F_{\text{ЛИН}} = \sum_{n=1}^N [y_n - b - kn]^2, \quad (15)$$

с качеством приближения исходного ряда отказов  $y_n$  при помощи комбинации линейного и гармонического трендов, определяемым по формуле:

$$F_{\text{ЛИН+ГАРМ}} = \sum_{n=1}^N \left[ y_n - b - kn - a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}(n + \tau_0)\right) \right]^2. \quad (16)$$

Серия проведенных экспериментов позволяет получить эмпирическое правило определения значимости гармонической составляющей (или влияния сезонности на изменение отказов): если

$$\frac{F_{\text{ЛИН}}}{F_{\text{ЛИН+ГАРМ}}} \geq 1,5, \quad (17)$$

то влияние гармонической составляющей тренда признается значимым. В противном случае влияние сезонности на частоту проявления отказов признается не значимым.

Для отказов, влияние сезонности на которые признано значимым, в дальнейшем производится коррекция исходного временного ряда  $y_n$ . Для этого из анализируемого исходного временного ряда частоты проявления отказов вычитается сезонная (гармоническая) составляющая определенная ранее. Все дальнейшие вычисления для таких отказов необходимо производить с учетом этой коррекции [7, 9]. Выбор периода эксплуатации. Проблемы, выявляемые на предпродажной подготовке (ППП), внутренние производственные несоответствия проявляются (и фиксируются в специализированных базах данных) непосредственно после выпуска автомобиля (задержка между обнаружением дефекта и регистрацией информации о нем в базе данных составляет не более недели), поэтому для анализа

таких проблем не требуется время. Каждый месяц можно рассматривать (анализировать и ранжировать) проблемы на автомобилях предыдущего месяца выпуска.

За шесть месяцев эксплуатации проявляется 70% дефектов гарантийной эксплуатации (при одно-годовой гарантии). Затраты на их устранение также составляют около 70% общих затрат за период гарантийной эксплуатации.

Выбор длительности периода анализа определяется только исходя из целей классификации проблем. При этом не рекомендуется брать длительность

периода анализа менее трех месяцев, т.к. анализ таких линейных трендов не имеет смысла (через две точки можно провести только одну прямую). Рассмотрение слишком длинных периодов анализа и, соответственно, линий тренда параметров проблем может существенно исказить ситуацию, т.к. происходит значительный «уход в прошлое». В качестве периода анализа рассматривается период равный 6 месяцам.

Схема выбора периода анализа для ранжирования дефектов гарантийной эксплуатации при выбранном периоде эксплуатации 6 месяцев приведена на рисунке 7.

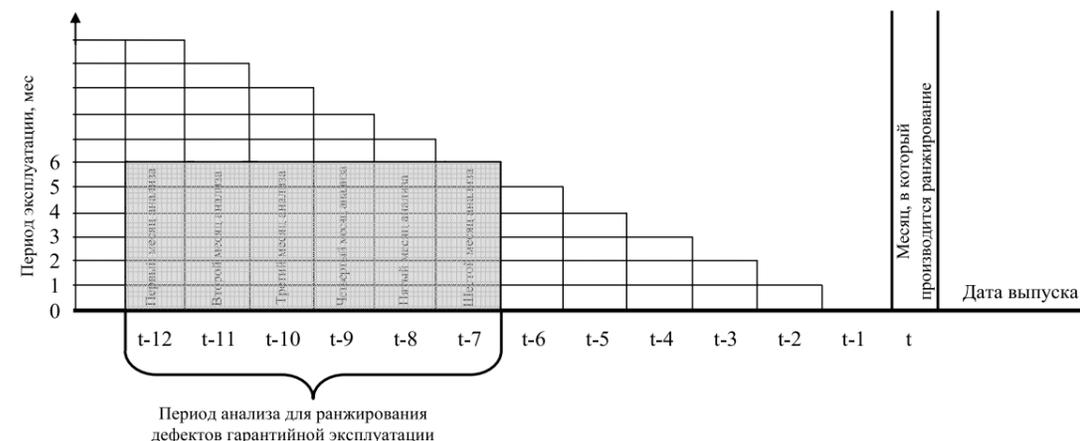


Рис. 7. Определение периода анализа для классификации дефектов гарантийной эксплуатации

Для анализа проблем качества с целью применения к их причинам корректирующих действий нет необходимости исследовать их все. Достаточно взять только «постоянные», так как на них приходится 94,6% всех проявлениях и 92,2% всех затрат на устранение проблем в гарантии.

На каждую проблему, выявляемую и устраняемую в ходе предпродажной подготовки и гарантийной эксплуатации автомобиля, оформляется акт гарантийного обслуживания (АГО).

Обработка базы данных АГО осуществляется с помощью специализированной корпоративной информационной системы.

Для классификации отбираются проблемы, проявившиеся за шесть месяцев эксплуатации. При этом под периодом эксплуатации подразумевается количество полных месяцев, прошедших с даты продажи, до даты предъявления дефекта на предприятие сервисно-сбытовой сети. Для автомобилей

каждой модели составляется перечень всех эксплуатационных отказов согласно кодификатору. Для каждой проблемы качества автомобилей, рассчитывается количество месяцев выпуска (из периода анализа) с проявлением соответствующей проблемы на автомобилях. Для дальнейшего рассмотрения отбираются только постоянные проблемы, то есть те, которые проявляются на автомобилях каждого из шести рассматриваемых месяцев выпуска.

Для каждой  $i$ -й проблемы рассчитывается количество ее проявлений на автомобилях, выпущенных в каждом месяце периода анализа влияния сезонности  $D_1^i, D_2^i, \dots, D_N^i$  ( $N$  – количество месяцев периода анализа влияния сезонности) [10, 11].

**Ранг частоты возникновения проблемы** ( $R_{\text{ВОЗН}}^i$ ) – балльная оценка вероятности появления проблемы надежности на выпущенном автомобиле – рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{ВОЗН}}^i = \begin{cases} 10 - 9 \cdot \left| 1 - \frac{\bar{d}^i}{\bar{d}^*} \right|^s & \bar{d}^i \leq \bar{d}^* \\ 10, & \bar{d}^i > \bar{d}^* \end{cases} \quad (17)$$

где  $\bar{d}^*$  – граничное значение частоты возникновения проблемы,  
 $s$  – параметр функции перевода (при  $s=1$  функция перевода линейная, при  $s=2$  функция перевода квадратичная и т.д.).

Ранг значимости ( $R_{ЗН}^i$ ) – балльная оценка затрат на устранение проблемы в гарантийной эксплуатации – рассчитывается по формуле:  
 Приоритетное число риска проблемы (ПЧР) определяется по формуле:

$$R_{ЗН}^i = \begin{cases} 10 - 9 \cdot \left| 1 - \frac{\bar{z}^i}{\bar{z}^*} \right|^s, & \bar{z}^i \leq \bar{z}^* \\ 10, & \bar{z}^i > \bar{z}^* \end{cases} \quad (18)$$

где  $\bar{z}^*$  – граничное значение средних затрат на устранение одного проявления проблемы,  $s$  – параметр функции перевода.

Ранг тренда ( $R_{ТР}^i$ ) – балльная оценка тенденций изменения дефектности во времени – рассчитывается по формуле:

$$R_{ТР}^i = \begin{cases} 1, & tr_* < tr^i \\ 10 - 9 \cdot \left| \frac{tr^* - tr^i}{tr^* - tr_*} \right|^s, & tr_* \leq tr^i \leq tr^* \\ 10, & tr^i > tr^* \end{cases} \quad (19)$$

где  $tr_*$  и  $tr^*$  – нижнее и верхнее граничные значения трендов,  $s$  – параметр функции перевода.

Приоритетное число риска проблемы (ПЧР) определяется по формуле:

$$ПЧР = R_{ВОЗН} \cdot R_{ЗН} \cdot R_{ТР} \quad (20)$$

Классификация всех дефектов производится по убыванию значения ПЧР. Проблемы, имеющие наибольшее ПЧР, следует рассматривать для анализа их причин и планирования корректирующих действий, направленных на устранение наиболее значимых из этих причин.

В качестве примера, в таблице 3 приведены результаты классификации проблем качества автомобилей одного из ведущих брендов.

Таблица 3

Результаты классификации проблем качества

№ п/п	Код и наименование проблемы надежности	Частота возникн.	Затраты	Тренд	Ранг возникн.	Ранг затрат.	Ранг тренда	ПЧР
1	3701010-096-000 Шум при работе генератора	6 253	1 568	-0,03	9,8	7,3	5,5	395
2	1700010-092-000 Затруднено переключение передач	4 125	2 468	-4,03	8,9	8,9	4,6	366
3	8118020-000-000	8 982	2 076	-6,39	10,0	3,4	4,1	339
4	1411020-000-000	1 998	3 746	-0,19	6,3	9,8	5,5	338
5	8 101538-000-000 Дефект заслонки управления отопителем	15121	1 960	-6,41	10,0	8,2	4,1	331
6	8101078-000-000 Дефект электродвигателя с вентилятором	3 573	3 191	-6,87	8,5	9,6	4,0	320
7	3705010-000-000	19 068	1 370	-3,69	10,0	6,8	4,7	318

№ п/п	Код и наименование проблемы надежности	Частота возникн.	Затраты	Тренд	Ранг возникн.	Ранг затрат.	Ранг тренда	ПЧР
8	1008081-000-000	14407	538	10,99	10,0	3,8	8,0	305
9	3701051-000-000	2 664	1 605	0,00	7,4	7,4	5,5	301
10	3701010-145-000	2 518	1 622	0,00	7,2	7,5	5,5	294
11	5604514-227-000	633	2 822	80,34	3,1	9,3	10,0	286
12	1700010-053-000	1 705	5 026	-2,37	5,7	10,0	5,0	285
13	8101100-000-000 Дефект заслонки канала отопителя	3 053	2 747	-7,08	7,9	9,2	3,9	285
14	3708010-025-000	4 661	1 306	-3,91	9,3	6,6	4,6	284
15	1701043-024-000	9 469	845	-0,01	10,0	5,1	5,5	280
16	3705040-000-000	6 058	315	43,92	9,8	2,7	10,0	268
17	3701010-179-002	2 258	1 589	-0,67	6,8	7,4	5,4	267
18	1139009-071-000	3 638	2201	-8,89	8,5	8,6	3,5	255
19	5206016-030000 Разрушено ветровое стекло	2 209	2 437	-5,38	6,7	8,9	4,3	255
20	2215011-096-000 Шум левого привода передних колес	2 550	1 901	-5,96	7,2	8,0	4,2	242

Таким образом, в результате разработки и реализации метода классификации проблем качества автомобилей, получен информационный комплекс и система определения ключевых дефектов, несоответствий, которые наиболее существенно влияют на конкурентоспособность продукции. В качестве основы классификации выбраны два показателя определяющих частоту возникновения и затраты на устранения проблем.

Реализация разработанного метода классификации проблем качества на практике обеспечивает возможности для быстрого и объективного поиска наиболее важных проблем в области качества, что создает предпосылки для разработки и реализации глобальных корпоративных программ повышения конкурентоспособности продукции.

Список литературы

1. Анализ видов и последствий потенциальных отказов. FMEA. Ссылочное руководство; пер. с англ. [Текст] – Н. Новгород: ООО СМЦ «Приоритет», 2012. – 282 с.
2. Брандт З. Анализ данных. Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров [Текст] / З. Брандт; пер. с англ. – М.: Мир, 2003. – 686 с.
3. Ватсон Г. Методология «Шесть сигм» для лидеров, или как достичь 3,4 дефекта на миллион возможностей [Текст] / Г. Ватсон; пер. с англ. А.Л. Раскина; Ю.П. Адлера под науч. ред. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2006. – 224 с.
4. Годлевский, В.Е. Применение статистических методов в автомобилестроении [Текст] / В. Е. Годлевский, А. Н. Плотников, Г. Л. Юнак; под

- ред. А.В. Васильчука – Самара: П «Перспектива», 2003. – 196 с.
5. Годлевский В.Е. Менеджмент качества в автомобилестроении: монография [Текст] / В.Е. Годлевский, Г.Л. Юнак; под ред. А.В. Васильчука – Самара: ООО «Офорт»; ЗАО «Академический инженеринговый центр», 2005. – 628 с.
6. Панюков Д.И. Комплекс обеспечения качества системы электрооборудования автомобилей: монография [Текст] / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский– Saarbrucken, Palmarium Academic Publishing, AV Akademikerverland GmbH&Co., Deutschland, 2014. – 360 с.
7. Перспективное планирование качества продукции и план управления. APQP. Ссылочное руководство; пер. с англ. [Текст] – Н. Новгород: ООО СМЦ «Приоритет», 2012. – 221 с.

8. *Строганов В.И.* Обеспечение качества электромобилей и гибридов в эксплуатации: монография [Текст] / В. И. Строганов. – Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing, AV Akademikerverland GmbH&Co., Deutschland, 2015. – 397 с.

9. *Строганов В.И.* Модели аналитических исследований качества и надежности легковых автомобилей в эксплуатации [Текст] / В.И. Строганов, С.И. Клейменов // Автомобильная промышленность. – 2013. – №9. – С. 2–6.

10. Разработка методов оценки экономической эффективности мероприятий и проектов, направленных на повышение качества продукции. Технический отчет по проекту «Развитие системы качества» [Текст]. – Самара: «Академический инжиниринговый центр», 2005. – 70 с.

11. Разработка методов оценки экономической эффективности мероприятий и проектов, направленных на повышение качества продукции. Технический отчет по направлению «Оценка эффективности корректирующих действий в информационной системе «Учет, планирование и контроль мероприятий по улучшению качества автомобилей» [Текст]. – Тольятти, 2003. – 48с.

#### References

1. *Analiz vidov i posledstvij potencial'nyh otkazov.* FMEA. Ssylochnoe rukovodstvo; per. s angl. [Текст] – N. Novgorod: ООО SMC «Prioritet», 2012. – 282 p.

2. *Brandt Z.* Analiz dannyh. Statisticheskie i vychislitel'nye metody dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov [Текст] / Z. Brandt; per. s angl. – M.: Mir, 2003. – 686 p.

3. *Vatson G.* Metodologija «Shest' sigm» dlja liderov, ili kak dostich' 3,4 defekta na million vozmozhnostej [Текст] / G. Watson; per. s angl. A.L. Raskina; Ju.P. Adlera pod nauch. red. – M.: RIA «Standarty i kachestvo», 2006. – 224 p.

4. *Godlevskij V.E.* Primenenie statisticheskikh metodov v avtomobilestroenii [Текст] / V.E. Godlevskij,

A.N. Plotnikov, G.L. Junak; pod red. A.V. Vasil'chuka – Samara: GP «Perspektiva», 2003. – 196 p.

5. *Godlevskij V.E.* Menedzhment kachestva v avtomobilestroenii: monografija [Текст] / V.E. Godlevskij, G.L. Junak; pod red. A.V. Vasil'chuka – Samara: ООО «Ofort»; ЗАО «Академический инжиниринговый центр», 2005. – 628 p.

6. *Panjukov D.I.* Kompleks obespechenija kachestva sistemy jelektrooborudovanija avtomobilej: monografija [Текст] / D.I. Panjukov, V.N. Kozlovskij–Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing, AV Akademikerverland GmbH&Co., Deutschland, 2014. – 360 p.

7. *Perspektivnoe planirovanie kachestva produkcii i plan upravlenija.* APQP. Ssylochnoe rukovodstvo; per. s angl. [Текст] – N. Novgorod: ООО SMC «Prioritet», 2012. – 221 p.

8. *Stroganov V.I.* Obespechenie kachestva jelektromobilej i gibridov v jekspluatcii: monografija [Текст] / V.I. Stroganov. – Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing, AV Akademikerverland GmbH&Co., Deutschland, 2015. – 397 p.

9. *Stroganov V.I.* Modeli analiticheskikh issledovanij kachestva i nadezhnosti legkovykh avtomobilej v jekspluatcii [Текст] / V.I. Stroganov, p.I. Klejmenov // Avtomobil'naja promyshlennost'. – 2013. – №9. – p. 2–6.

10. *Razrabotka metodov ocenki jekonomicheskoi jeffektivnosti meroprijatij i proektov, napravlennyh na povyshenie kachestva produkcii.* Tehnicheskij otchet po proektu «Razvitie sistemy kachestva» [Текст]. – Samara: «Академический инжиниринговый центр», 2005. – 70 p.

11. *Razrabotka metodov ocenki jekonomicheskoi jeffektivnosti meroprijatij i proektov, napravlennyh na povyshenie kachestva produkcii.* Tehnicheskij otchet po napravleniju «Ocenka jeffektivnosti korrektrujushhih dejstvij v informacionnoj sisteme «Uchet, planirovanie i kontrol' meroprijatij po uluchsheniju kachestva avtomobilej» [Текст]. – Tol'jatti, 2003. – 48 p.

## МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES



**Грахов П.А.**  
**Grakhov P.A.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Теоретические  
основы электротехники»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный авиационный  
технический университет»,  
Россия, г. Уфа.



**Федин А.В.**  
**Fedin A.V.**

аспирант,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный  
авиационный технический  
университет»,  
Россия, г. Уфа.



**Ясовеев В.Х.**  
**Yasoveev V. Kh.**

доктор технических наук,  
профессор, заведующий кафедры  
«Информационно-измерительная  
техника», ФГБОУ ВО  
«Уфимский государственный  
авиационный технический  
университет»,  
Россия, г. Уфа.

УДК 621.313

### ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПЛАСТИН ПРИ ДЕЙСТВИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ

В данной статье рассмотрены вопросы исследования магнитоотриксционных устройств угловых перемещений при изменении температуры и наличии предварительных упругих напряжений, вызванных действием внешнего момента сил. Анализ проведен для схемы устройства с балочной шарнирной установкой активного элемента на основании. Изгибные деформации активного элемента в виде многослойной магнитоотриксционной пластины преобразуются в чисто угловые перемещения нагрузки. Пластина, выполненная из материалов с различными коэффициентами теплового расширения. Магнитоотриксционное устройство рассмотрено в рамках уточненной дискретной модели как нелинейный многосторонний преобразователь, с учетом влияния на магнитные, магнитомеханические и упругие характеристики активного элемента, изменений по толщине внутренних и внешних статических и динамических напряжений. Моделирование осуществлено в пакете прикладных программ Matlab Simulink. Неоднородные по толщине

слоев напряжения из-за теплового расширения, рассматривались как предварительные упругие.

Практическую ценность имеют полученные статические характеристики магнитоэлектрических устройств угловых перемещений для различных соотношений коэффициентов линейного расширения слоев активного элемента и направления действия внешнего момента сил и изменений температуры разного знака.

В результате исследований уточнено влияние на статические характеристики устройства величины изгибающего момента внешних сил и его знака. Показано, что для устройств с активным слоем, обладающим положительной магнитоэлектрической, пассивный слой целесообразно выполнять из материала с меньшим коэффициентом линейного температурного расширения чем у активного слоя. При этом для увеличения значения максимального перемещения следует накладывать внешний предварительный изгибающий момент в сторону сжатия активного слоя, а для снижения зависимости статических характеристик устройства от изменений температуры при нагреве, в сторону растяжения активного слоя.

Практическая значимость работы состоит в возможности на основании предложенной модели построить новые алгоритмы проектирования магнитоэлектрических устройств угловых перемещений при раздельном и совместном действии внешнего момента сил и изменении температуры с целью уменьшения температурной погрешности и повышения их эффективности.

**Ключевые слова:** магнитоэлектричество, устройство угловых перемещений, микроперемещения, изгибные деформации, упругие напряжения, математическая модель, угловые перемещения, изменения температуры, предварительные упругие напряжения, коэффициент температурного расширения, статические характеристики.

## CHARACTERISTICS OF ANGULAR MOVEMENT DEVICES ON THE BASIS OF MAGNETOSTRICTION PLATES IN PRESENCE OF ELASTIC PRESTRESSES

In the article questions of modelling and research of angular movements magnetostriction devices on the basis of flexural deformations of the active element during temperature changes and in presence of elastic prestresses caused by the action of external torque.

The analysis has been performed for the device with beam pivotally installing the active element on the base. The Flexural deformations of the active element in the form of a multi-layered magnetostrictive plate are converted to the angular displacement of the load. Plate is made of materials with different coefficients of thermal expansion, Magnetostrictive devices has been described as a specify discrete model as a nonlinear multilateral converter, taking into account the influence on the magnetic and magnetomechanical elastic characteristics of the active element, changes through-thickness of internal and external static and dynamic stress. Simulation was performed in Matlab Simulink. Non-homogenous on the thickness of the layer stress due to thermal expansion, were considered as preliminary elastics.

As a practical value are static characteristics of the magnetostrictive device angular movements for different ratios of the coefficients of linear expansion of the layers of the active element and the direction of action of external moment of forces and temperature changes.

In consequence of research clarifies the influence on the static characteristics of the device the magnitude of the bending moment of the external forces and its sign.

It was shown that for devices with an active layer that has positive magnetostriction, the passive layer is advantageously made of a material with a lower coefficient of linear thermal expansion than that of the active layer. To increase the maximum displacement should be applied to the external bending moment to the compression side of the active layer, and to reduce of the dependence of the static characteristics of the device from temperature changes during heating, to the direction of the stretch of the active layer.

The practical significance of the work consists in the possibility on the basis of the model which has been proposed to construct new algorithms for de-signing magnetostrictive device of angular movements by the separate and join action of the external force moment temperature to reduce the temperature error and improve their effectiveness.

**Keywords:** magnetostriction, device of angular movements, micromovements, flexural deformations, elastic tension, mathematical model, temperature changes, elastic prestresses, coefficients of linear expansion, static characteristics.

Магнитоэлектрические исполнительные устройства (МСИУ) угловых перемещений изгибного действия на основе многослойных пластин (МП) весьма перспективны как движители прецизионных электронно-оптических систем, узлов компенсации статических и динамических возмущений в системах привода и т.д. [1,2].

В схеме МСИУ (рис. 1) с балочной шарнирной

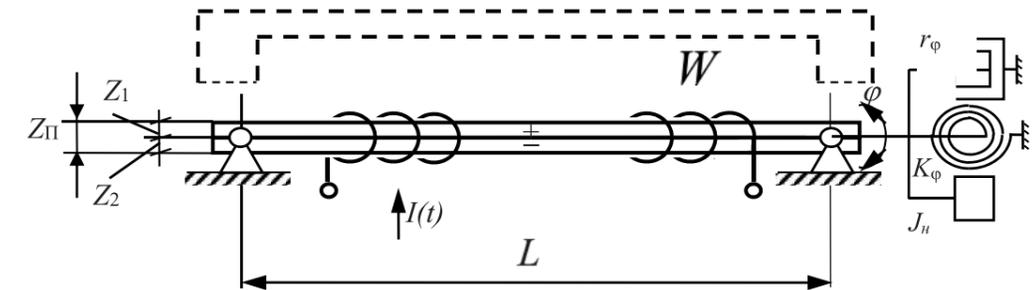


Рис. 1. Схема МСИУ с балочной шарнирной установкой активного элемента

(толщиной  $Z_1$  и  $Z_2$ ), лежащие по разные стороны от плоскости изгиба, изготавливаются из материалов с различными (и даже противоположными по знаку) магнитоэлектрическими свойствами.

Активные слои пластины могут представлять собой также многослойную структуру, однотипную по магнитоэлектрическим свойствам. Обмотка содержит  $W$  витков. Управляющее воздействие – ток обмотки  $I(t)$ . Замкнутая магнитная цепь (на рис. 1 обозначена пунктиром) реализуется в плоскости по ширине МП. Параметры нагрузки – «обобщенной опоры»  $J_и$ ,  $K_φ$  и  $r_φ$  соответственно: инерционность, жесткость на кручение и демпфирование нагрузки [4].

Значительная инерционность перемещаемых объектов и жесткость их установки на основании предполагают работу активных материалов в широком диапазоне изменения намагниченности для достижения максимальных характеристик ИУ по диапазону и быстродействию. В этой связи МСИУ рассмотрен как нелинейный многосторонний преобразователь [5], с учетом влияние на магнитные, магнитомеханические и упругие характеристики изменений по толщине (в рамках уточненной дискретной модели [4]) внутренних и внешних статических и динамических напряжений. Предложенная схема изменений напряжений по толщине [3] определила математическое описание МСИУ, в котором МП рассматривается как сложный элемент, состоящий из «подслоев» в каждом активном слое с усредненным значением напряжения, действующего в этом подслое. При такой разбивке по подслоям, значение усредненного напряжения, действующего

установкой МП на основании её изгибные деформации преобразуются в чисто угловые перемещения нагрузки  $\Phi(t)$  закрепленной на одном из концов у шарниров.

Хотя бы один слой МП обладает магнитоэлектрическими свойствами [3]. Если оба слоя являются активными, то в МП толщиной  $Z_и$  длиной  $L$  и шириной  $b$  слои

в каждом подслое, является алгебраической суммой магнитоэлектрических, термодинамических и упругих напряжений, действующих в нем.

Для создания МСИУ с улучшенными параметрами целесообразно в первую очередь оценить влияние изменений температуры МП и предварительных напряжений вызываемых моментом внешних сил на статические характеристики инерционно нагруженного МСИУ.

Вследствие «биметаллического» прогиба МП, выполненной из материалов с различными коэффициентами теплового расширения  $\alpha$ , в МСИУ возникают значительные дополнительные неоднородные по толщине слоев напряжения. Термодинамическая постоянная времени МП более чем на два порядка превышает время всего электромеханического переходного процесса, поэтому напряжения при текущей температуре могут рассматриваться как предварительные упругие внутренние напряжения.

Моделирование осуществлено в пакете прикладных программ Matlab Simulink. Статические характеристики  $\Phi(I)$  получены для размеров МП, соответствующих толщине пластины  $Z_и = 2 \times 10^{-3}$  м, длине  $L = 0,1$  м., ширине  $b = 0,01$  м., при количестве витков обмотки  $W$  равном 200 и при однополярном входном воздействии тока  $I$ .

Предварительные упругие напряжения от внешних сил, изгибающих пластину чаще всего создаются пружинным элементом (жесткость которого существенно меньше жесткости МП), который устанавливается в месте крепления нагрузки.

На рис.2. приведены статические характеристики  $\Phi(I)$  МСИУ с активным элементом из пермендюра 49К2Ф и никеля в отсутствии изменений температуры МП, но нагруженного моментом

внешних сил. Зависимости  $\Phi(I)$  получены для моментов  $M$  (0,265Н·м-1,06Н·м), создающих предварительные упругие напряжения  $\sigma$  в подслоях, от  $-2 \cdot 10^7$  кг/м<sup>2</sup> до  $+8 \cdot 10^7$  кг/м<sup>2</sup>.

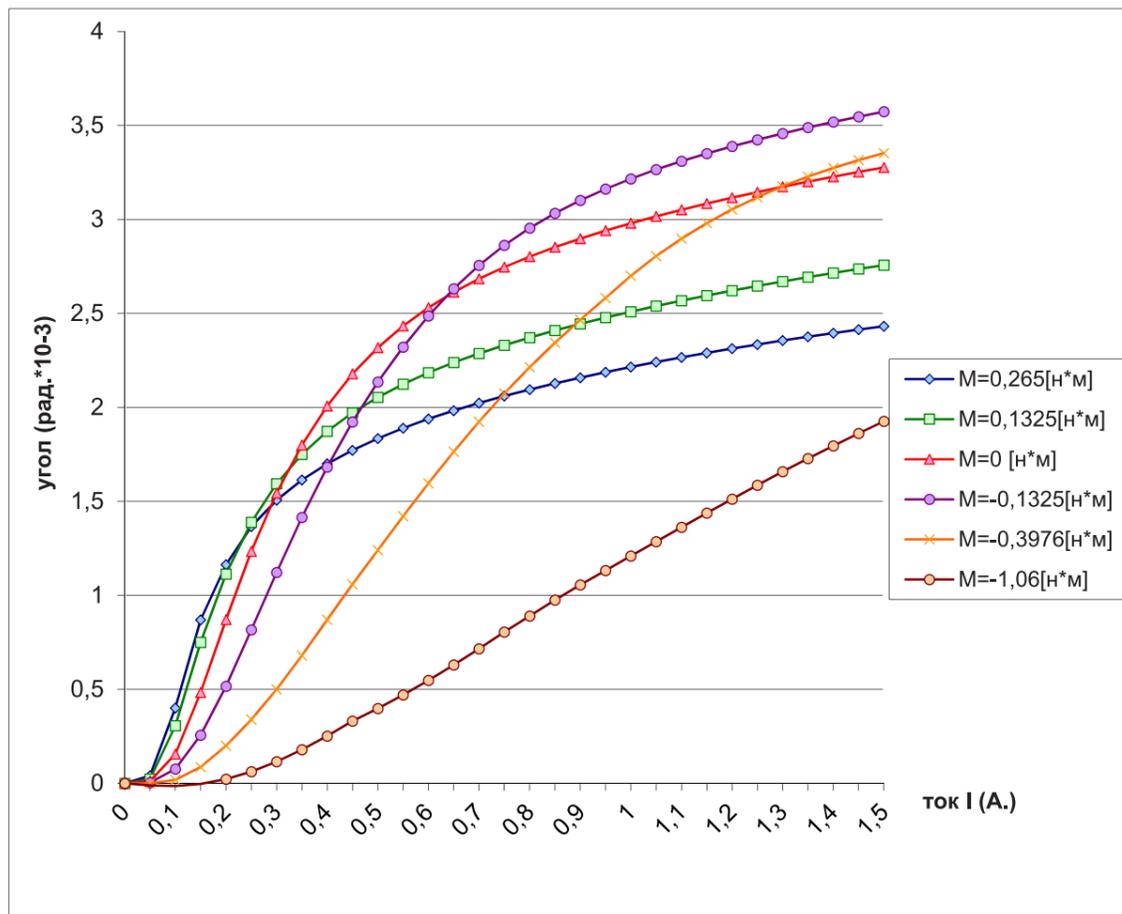


Рис. 2. Статические характеристики МСИУ с учётом предварительных упругих напряжений вызванных внешним моментом

Результаты в целом соответствуют положениям теории линейной магнестрикции [6]. При действии внешнего изгибающего момента в направлении противоположном направлению магнестрикторного изгиба МП ( $M=0,1325$ (Н·м)) МСИУ более эффективны при малых управляющих воздействиях и выходное перемещение достигает своего насыщения быстрее при более слабых управляющих воздействиях, чем в отсутствие предварительных упругих напряжений. Отметим, что снижение перемещений в области насыщения здесь не такое значительное как в линейных МСИУ.

Кривые  $\Phi(I)$  полученные для значений момента  $M$  в диапазоне от -0,13 до -1,06 (Н·м) показывают, что как и в случае линейных МСИУ, присутствует эффект увеличения максимального выходного перемещения и заметная линеаризация характеристики

в более значительном диапазоне управляющих воздействий. Поскольку картина распределения упругих напряжений по толщине неоднородна [3], закручивание выходного конца не достигает увеличения в 1,5 раза, свойственного линейным МСИУ.

Предварительные упругие напряжения, вызванные изменением температуры МСИУ имеют более сложный характер распределения по толщине МП. В различных подслоях одной половины МП присутствуют как растягивающие, так и сжимающие напряжения, меняющие своё значение и направление в зависимости от изменений температуры.

Оценить влияния таких напряжений удобнее рассматривая МП с одним активным слоем. В этом случае легче интерпретировать характеристики МСИУ и при чередовании коэффициентов линейного расширения материалов активного и пассивного

слоев, и при нагреве или охлаждении МП относительно исходного состояния (полагая, что при комнатной температуре термодинамические напряжения отсутствуют).

Кривые статических характеристик  $\Phi(I)$  МСИУ (рис.3 – 4) в целом подобны виду зависимостей полученным при действии предварительных упругих напряжений, создаваемых внешними силами. Эффект увеличения или уменьшения выходного перемещения насыщения наблюдается и при изменении температуры МСИУ относительно исходной температуры соединения слоев за счет появления напряжений, вызванных температурными деформациями.

Когда направления предварительного термодинамического и рабочего магнестрикторного прогибов одинаковы, наблюдается зона более выраженного действия внешних предварительно растянутых подслоев для пермендюра 49К2Ф (рис. 3, зона 0-0,7А). Это позволяет получить более эффективные по диапазону управляющих воздействий характеристики  $\Phi(I)$ , нежели в случаях, где биметаллический прогиб и рабочее перемещение направлены в разные стороны (рис.4), однако при этом общее максимальное перемещение насыщения с ростом температуры уменьшается.

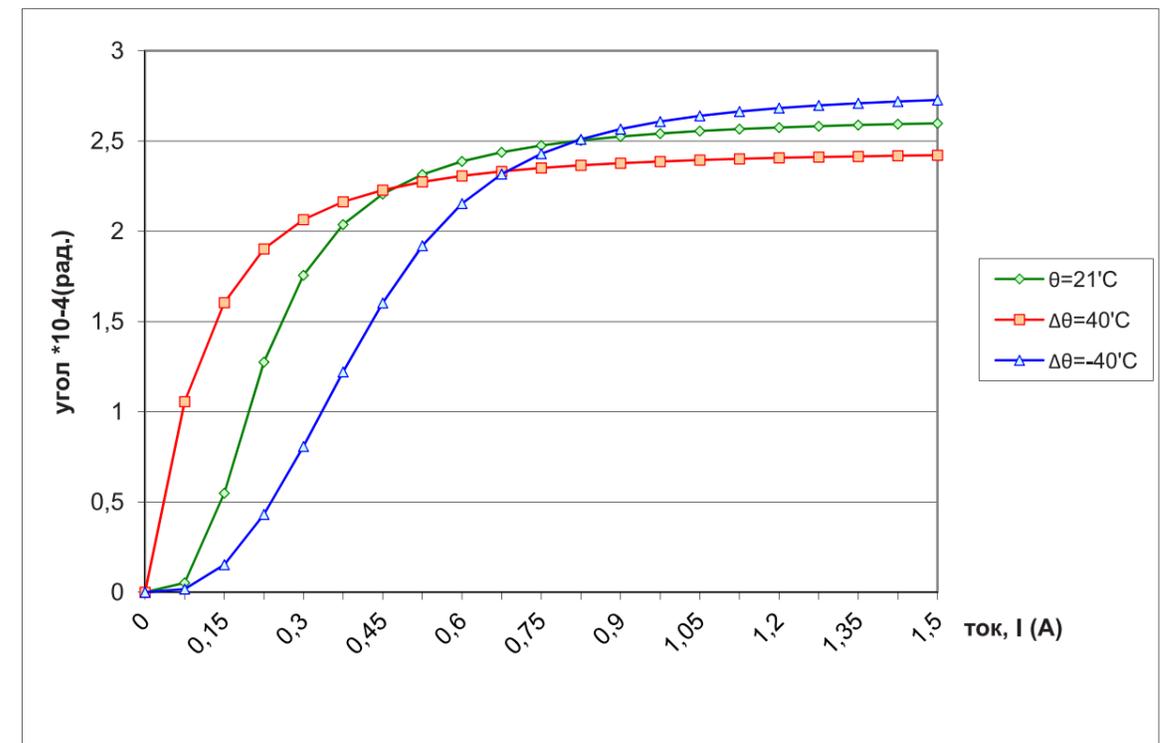


Рис. 3. Статическая характеристика МСИУ с МП выполненной из 49К2Ф и пассивного слоя из стали с коэффициентом линейного расширения  $\alpha=6,2 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ .

В случае  $\alpha_2$  пассивного слоя  $> \alpha_1$  активного слоя, наблюдается уменьшение перемещения во всем диапазоне управляющих воздействий с увеличением температуры (рис.4) поэтому такой случай становится менее интересным с точки зрения стабильности и эффективности устройства в условиях увеличения температуры. Если  $\alpha_2$  пассивного слоя  $< \alpha_1$  активного слоя, то с увеличением температуры, наблюдается увеличение перемещения в диапазоне малых управляющих воздействий, и уменьшение общего углового перемещения  $\Phi$  в зоне насыщения (рис.3). Аналогичные результаты получены при использовании в качестве активного слоя никеля.

Картина распределения напряжений по толщине МП усложняется еще больше, если упругие напряжения вызваны суммой внутренних и внешних моментов сил, даже для случая МП с одним активным слоем (например, выполненного из пермендюра 49К2Ф, обладающего положительной магнестрикцией). При построении характеристик (рис. 5-7) рассматривались только положительные по знаку изменения температуры МП, (например за счет выделения энергии внутри катушки). Такой режим функционирования МСИУ часто возникает при отсутствии термостатирования.

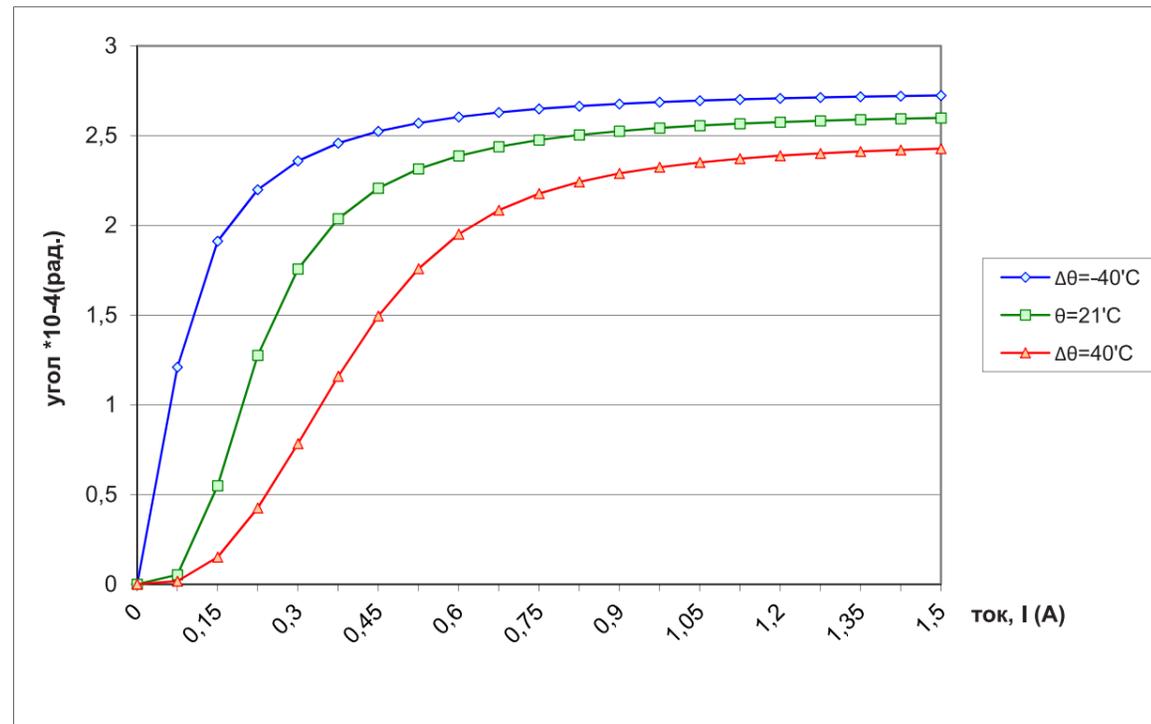


Рис. 4. Статическая характеристика МСИУ с МП выполненной из 49К2Ф и пассивного слоя из стали с коэффициентом линейного расширения  $\alpha=12,2 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ .

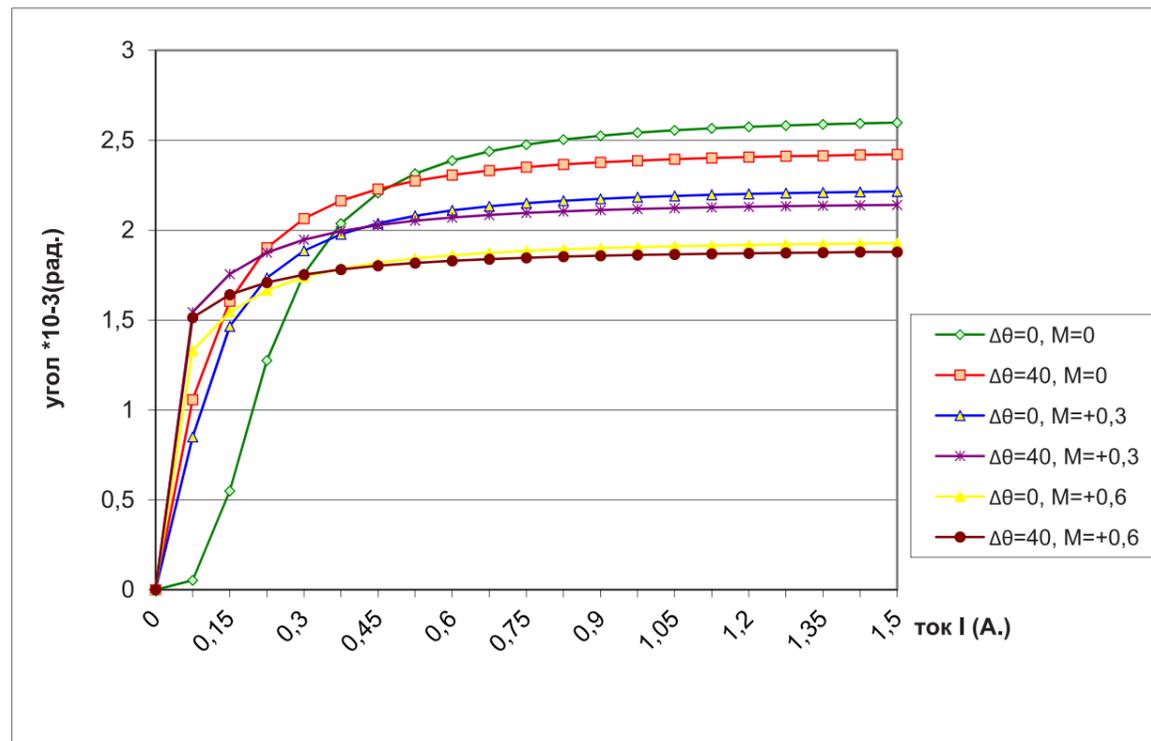


Рис. 5. Статическая характеристика МСИУ с МП выполненной из 49К2Ф и пассивного слоя из стали с коэффициентом линейного расширения  $\alpha=6,2 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , внешний момент М изгибает МП в сторону рабочего прогиба

При наложении внешнего предварительного изгибающего момента в сторону растяжения активного слоя (рис. 5,  $M=+0,3; +0,6$ ) характеристики  $\phi(I)$  при определенном моменте внешних сил ( $M=+0,6$ )

оказываются очень близкими при изменениях температуры. Количество предварительно растянутых подслоев в активном слое при этом становится больше и как следствие снижается максимальное перемещение движителя до 27%. Однако, не смотря на некоторое снижение диапазона перемещений, при увеличении значения внешнего предварительного момента данного знака увеличивается угол наклона

начального участка статической характеристики  $\Phi(I)$ . Следовательно, в таком МСИУ наблюдается слабая чувствительность статической характеристики к изменению температуры, и это может быть положено в основу разработки и проектирования более эффективных «термостабильных» устройств, работающих при меньших значениях управляющих воздействий.

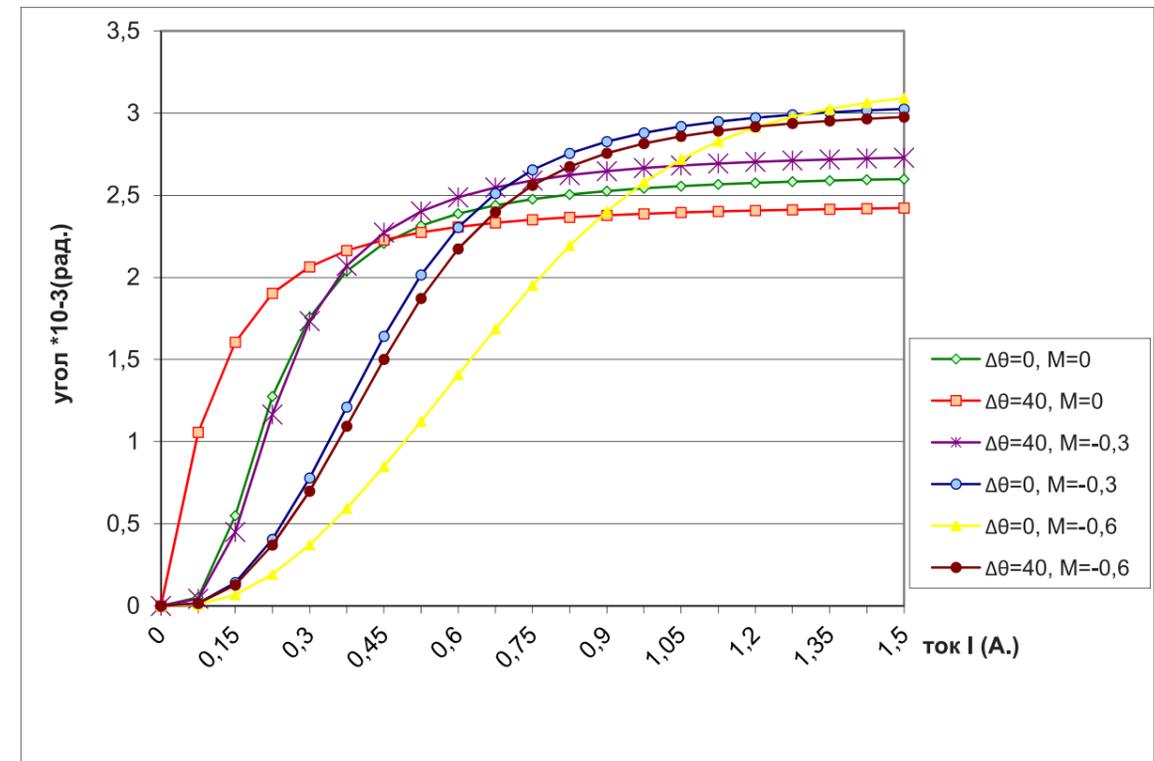


Рис. 6. Статическая характеристика МСИУ с МП выполненной из 49К2Ф и пассивного слоя из стали с коэффициентом линейного расширения  $\alpha=6,2 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , внешний момент М изгибает МП в сторону противоположную рабочему прогибу.

Введение внешнего момента в сторону сжатия активного слоя (рис.6) для пластины, у которого активный слой с положительной магнитострикцией обладает большим коэффициентом линейного температурного расширения, чем пассивный слой, приводит к увеличению максимального перемещения и линеаризации характеристики такого привода.

Проведенные исследования показали, что, для МСИУ с МП с активным слоем, обладающим положительной магнитострикцией: пассивный слой целесообразно подбирать с меньшим коэффициентом линейного температурного расширения, чем у активного слоя. Для увеличения значения максимального перемещения следует накладывать внешний предварительный изгибающий момент

в сторону сжатия активного слоя, а для снижения зависимости статических характеристик МСИУ от изменений температуры при нагреве, в сторону растяжения активного слоя. Для МСИУ с МП с активным слоем, обладающим отрицательной магнитострикцией получены аналогичные рекомендации.

Предложенная модель позволила уточнить поведение МСИУ при изменении температуры. Выбирая коэффициенты линейного расширения материала пассивного слоя МП и предварительные упругие напряжения, вызываемые внешним моментом сил можно существенным образом влиять на характеристики с изменением температуры. Это позволяет при проектировании уменьшить температурную погрешность и повысить эффективность МСИУ.

## Список литературы

1. *Грахов П. А.* Магнотриксционные исполнительные устройства для активной оптики (Развитие теории, исследования характеристик и конструкций) [Текст] / П.А. Грахов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Уфа: Изд. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 1999. – 226 с.
2. *Михайлов О. П.* Магнотриксционные исполнительные устройства микроперемещений [Текст] / О.П. Михайлов // Электричество. – 1976. – №2. – С. 55-61.
3. Патент на изобретение №2292611 РФ МПК H01L41/12 Магнотриксционное устройство угловых перемещений и способ управления им [Текст] / Грахов П.А., Федин А.В.; патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уфимский государственный авиационный технический университет (RU). – №2005118213/28. – заявл. 14.06.2005. – опубл. 27.01.2007. – Бюл. №3.
4. *Грахов П. А.* Моделирование устройств угловых перемещений на основе магнотриксционных пластин с учетом упругих напряжений [Текст] / П.А. Грахов, А.В. Федин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т.9. – №1. – С.9-17.
5. *Грахов П. А.* Моделирование устройств угловых микроперемещений на основе магнотриксционных пластин [Текст] / П.А. Грахов, А.В. Федин // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2011. – №3. – С. 134-141.
6. *Белов К. П.* Магнотриксционные явления и их технические применения [Текст] / К.П. Белов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 160 с.

## References

1. *Grahov P.A.* Magnostriksionnye ispolnitel'nye ustrojstva dlja aktivnoj optiki (Razvitie teorii, issledovaniya harakteristik i konstrukcij) [Tekst]/ P.A. Grahov // Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskijh nauk. – Ufa: Izd. Ufimsk. gos. aviac. tehn. un-t, 1999. – 226 p.
2. *Mihajlov, O.P.* Magnostriksionnye ispolnitel'nye ustrojstva mikroperemeshhenij [Tekst]/ O.P. Mihajlov // Jelektrichestvo. – 1976. – №2. – p. 55-61.
3. Patent na izobretenie №2292611 RF MPK H01L41/12 Magnostriksionnoe ustrojstvo uglovjyh peremeshhenij i sposob upravlenija im [Tekst]/ Grahov P.A., Fedin A.V.; patentoobladatel': Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija Ufimskij gosudarstvennyj aviacionnyj tehniceskij universitet (RU). – №2005118213/28. – zajavl. 14.06.2005. – opubl. 27.01.2007. – Bjul. №3.
4. *Grahov P. A.* Modelirovanie ustrojstv uglovjyh peremeshhenij na osnove magnostriksionnyh plastin s uchetom uprugih naprjazhenij [Tekst]/ P.A. Grahov, A.V. Fedin // Jeletrotehniceskije i informacionnye komplekxy i sistemy. – 2013. – T.9. – №1. – p. 9-17.
5. *Grahov P. A.* Modelirovanie ustrojstv uglovjyh mikroperemeshhenij na osnove magnostriksionnyh plastin [Tekst]/ P.A. Grahov, A.V. Fedin // Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tehniceskogo universiteta. – 2011. – №3. – S. 134-141.
6. *Belov K. P.* Magnostriksionnye javlenija i ih tehniceskije primenenija [Tekst]/ K.P. Belov. – M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1987. – 160 p.



**Ураксеев М.А.**  
**Urakseev M.A.**

*доктор технических наук,  
профессор кафедры «Технологические  
машины и оборудование», ФГБОУ ВО  
«Уфимский государственный нефтяной  
технический университет»,  
Россия, г. Уфа.*



**Закурдаева Т.А.**  
**Zakurdaeva T.A.**

*аспирант кафедры «Информационно-  
измерительная техника», ФГБОУ ВО  
«Уфимский государственный авиацион-  
ный технический университет»,  
Россия, г. Кумертау.*

УДК 621.383.8 + 535.8

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В последние годы появилось большое количество публикаций по созданию современных волоконно-оптических приборов измерительных систем, основанных на электрооптическом эффекте Погеля. В последнее время они находят широкое применение в электроэнергетике, металлургии, стекольной промышленности, приборостроении и других отраслях. Это объясняется их высокими техническими характеристиками, которые удается получить за счет использования новейших технологий и материалов для создания элементной базы. Авторами на основании анализа патентов на изобретения и полезные модели выявлены принципы построения и конструирования электрооптических измерительных систем, позволяющие улучшить основные характеристики новых технических решений. Для достижения технических характеристик и их улучшения достигаются: введение на выходе анализатора последовательной цепочки преобразования, обработки и отображения сигнала.; введение двух оптических систем с линзами; введение между основными электродами дополнительных, установленных параллельно основным; введение двух фотодиодов, подключенных своими выходами к блоку обработки сигналов; введение на выходе PIC-микроконтроллера устройства, выход которого соединен с устройствами отображения информации и записи; введение дополнительных плоских электродов между четырьмя диафрагмами; выполнение электрооптических элементов в виде призм, в основании которых расположены электроды; введение анализатора между кристаллами чувствительного элемента и параллельная ориентация оптических осей кристаллов; выход дифференциального усилителя через интегратор соединен с источником света.

В настоящее время разработкой волоконно-оптических датчиков электрического тока напряжения и напряженности магнитного и электрического поля занимается целый ряд компаний, среди которых следует отметить канадскую компанию NxtPhase T&D Corporation, шведскую фирму PowerSense, американские фирмы OptiSense Network, Inc., Airak, Inc., FieldMetrics, Inc. (FMI), шведско-швейцарскую компанию ABB.

В России разработкой и исследованием подобных датчиков и измерительных систем занимается ООО «Уникальные волоконные приборы» и в ряде других организаций России.

*Ключевые слова:* линейный электрооптический эффект, ячейка Поккельса, датчики электрического напряжения и напряженности, электрооптика, двойное лучепреломление.

**PRINCIPLES OF MEASUREMENT AND CONSTRUCTION ELECTRO SYSTEMS**

In recent years, a large number of publications on the creation of modern fiber-optic instrument measurement systems based on electro-optical Pockels effect. Recently, they are widely used in electric power, metallurgy, glass industry, instrument-making and other industries. This is due to their high performance, which can be obtained through the use of new technologies and materials to create components. The authors based on the analysis of patents for inventions and utility models are revealed principles of construction and design of electro-optical measuring systems that improve the basic characteristics of new technical solutions. In order to achieve specifications and improvements are achieved: an introduction to the output of the analyzer daisy chain transformation, process and display signal; administration of two optical systems of lenses; introduction between the main electrodes of additional installed parallel to the main; administration of two photodiodes connected by their outputs to the signal processing unit; introducing at the output-PIC microcontroller device, the output of which is connected to the display device and recording; introduction of additional plane electrodes among four diaphragms; performing electrooptic elements in the form of prisms, which are located at the base electrodes; the introduction of the analyzer crystals between the sensor and the parallel orientation of the optical axes of the crystals; the output of the differential amplifier is connected via an integrator to the light source. Currently, the development of fiber-optic sensors electric current voltage and the magnetic and electric fields has been a number of companies, notably the Canadian company NxtPhase T & D Corporation, the Swedish company PowerSense, American firms OptiSense Network, Inc., Airak, Inc., FieldMetrics, Inc. (FMI), the Swedish-Swiss company ABB. In Russia, the development and research of such sensors and measuring systems engaged LLC “Unique optic devices” and a number of other organizations in Russia.

*Keywords:* linear electro-optic effect, Pockels cell, voltage sensors, and tension, electro-optics, birefringence.

В последние годы появилось большое количество публикаций по созданию современных волоконно-оптических приборов измерительных систем, основанных на электрооптическом эффекте Поккельса [1 -5].

Эффект Поккельса использует двойное лучепреломление в оптических средах электрооптических кристаллов при наложении постоянного или переменного электрического поля. Электрооптический эффект - это изменение коэффициента преломления некоторых материалов под действием электрического поля. Материалы, обладающие такими свойствами, называют электрооптическими материалами. Электрооптические эффекты бывают двух видов:

1) первый называют линейным электрооптическим эффектом Поккельса. При нем коэффициент

преломления линейно зависит от силы поля, приложенного к кристаллу, не имеющему внутренней симметрии;

2) второй называют квадратичным электрооптическим эффектом Керра. При нем коэффициент преломления пропорционален квадрату силы поля в веществах с внутренней симметрией [1].

Авторами на основании анализа патентов на изобретения и полезные модели выявлены принципы построения и конструирования электрооптических измерительных систем, позволяющие улучшить основные характеристики новых технических решений. При этом учитывались во всех патентах достигаемые технические результаты и пути их реализации. В результате исследований получены улучшаемые характеристики, приведенные на рисунке 1.

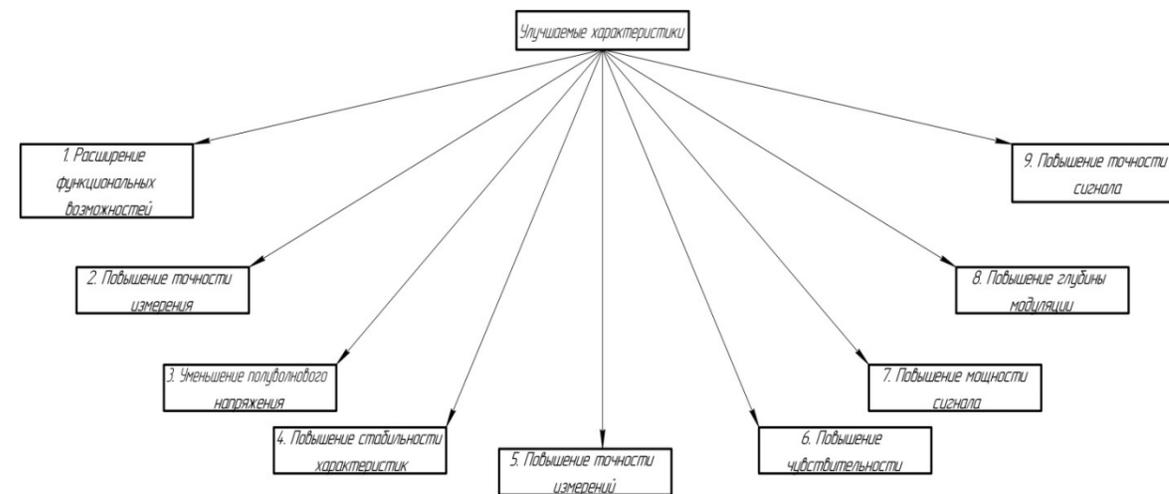


Рис. 1 Улучшаемые характеристики и пути их достижения

Далее рассмотрим на примерах технических решений пути их улучшения характеристик по результатам анализа патентных материалов.

1. Расширение функциональных возможностей. Данная цель достигается в патенте № 71441 (Рис. 2) [6].

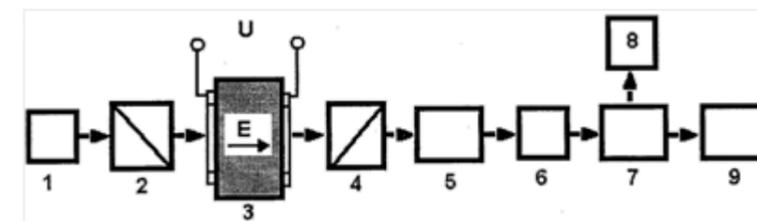


Рис. 2. Схема для измерения напряженности электрического поля и напряжения:

- 1 – источник оптического излучения; 2 – поляризатор; 3 – электрооптическая ячейка Поккельса; 4 – анализатор;
- 5 – фотодиод; 6 – преобразователь ток – напряжение на базе операционного усилителя; 7 – микроконтроллер;
- 8 – устройство записи информации; 9 – жидкокристаллический индикатор.

Луч света проходит по оптической цепочке, образованной элементами 1, 2, 3, 4, 5. Электрическое напряжения U подводится к электродам элемента 3, электрический сигнал с выхода элемента 5 проходит по цепочке, содержащей звенья 6, 7, 8, 9.

2. Повышение точности измерения. Данная цель достигается в патенте № 67723 (рисунок 3) [7].

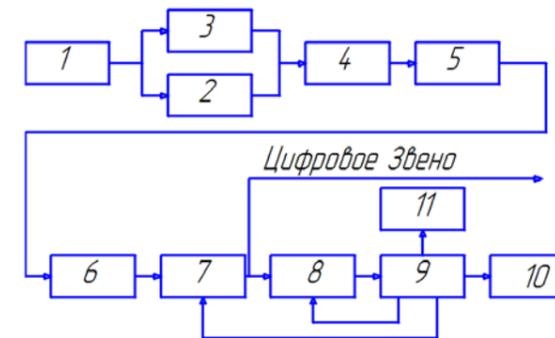


Рис. 3. Структурная схема волоконно-оптического информационно-измерительного устройства:

- 1 – источник оптического излучения; 2 – первая оптическая система с микрообъективом; 3 – электрооптическая ячейка Поккельса; 4 – вторая оптическая система с линзами; 5 – фотоприемник; 6 – усилитель; 7 – аналого-цифровой преобразователь; 8 – регистр памяти; 9 – контроллер; 10 – жидкокристаллический индикатор; 11 – печатующее устройство.

Луч света проходит по следующей цепочке, имеющей две оптические системы, к первой относятся такие элементы системы как 1, 2, 3, а ко второй системе 4, 5, 6, 7, 8, 9, выходы которого связаны с элементом 10 и 11. Точность измерения заключается от длин волн поступающих на измерительное плечо.

3. Уменьшение полуволнового напряжения. Данная цель достигается в патенте №2029977 (рисунок 4) [8].

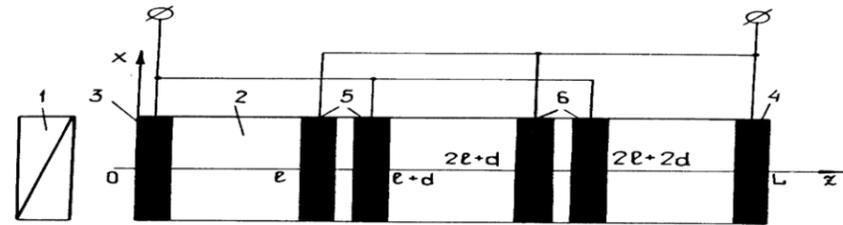


Рис. 4. Схема электрооптического модулятора света: 1- поляризатор; 2- электрооптический кристалл; 3 и 4- основные электроды; 5, 6- дополнительные электроды.

В данном устройстве все элементы расположены последовательно 1, 2, 3, 4. Элементы 3 и 4 устанавливаются на входном и выходном концах элемента 2, также имеются дополнительные элементы 5 и 6, которые устанавливаются на боковые поверхности элемента 2. В элементе 2 возникает наведенное двулучепреломление, что приводит к уменьшению полуволнового напряжения.

4. Повышение и стабильности характеристик. Данная цель достигается в патенте № 111679 (рисунок 5) [9].

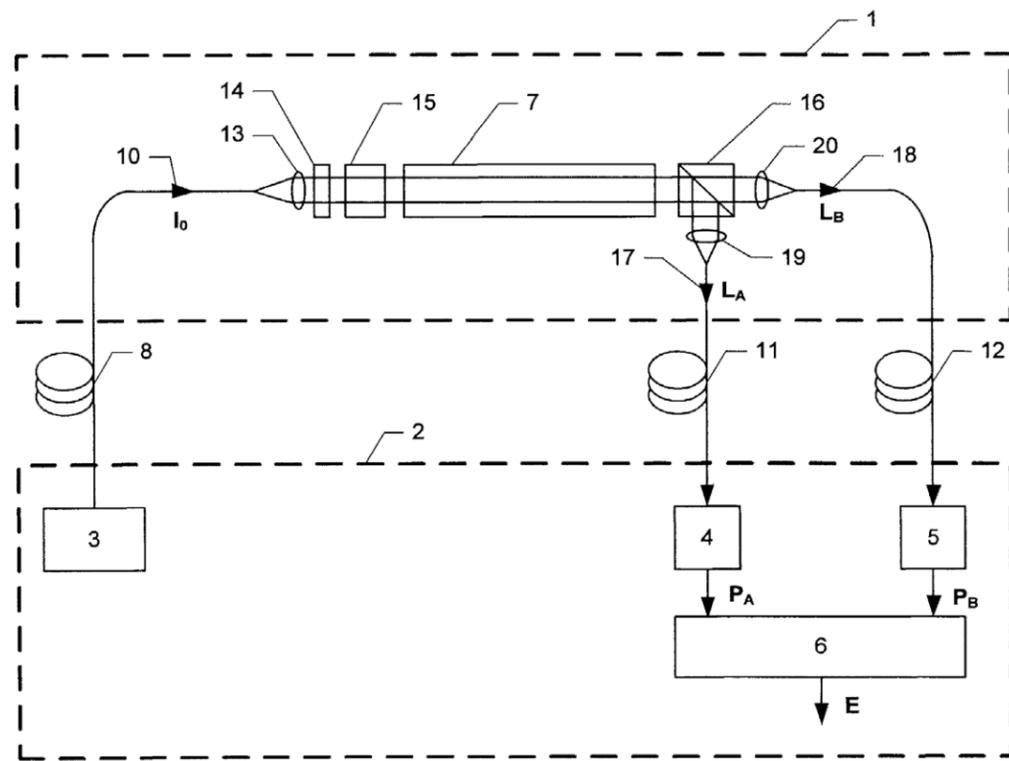


Рис. 5. Схема блока обработки сигналов: 1 – измерительный датчик; 2 – оптико-электронный блок; 3- источник излучения; 4, 5 – фотодетекторы; 6 – блок обработки сигналов; 7 – измерительный элемент; 8 – оптическое волокно; 9, 10 – поляризация световой волны; 11,12 – оптические волокна; 13 – коллиматорная линза; 14 – поляризатор; 15 – четвертьволновая пластинка; 16 – оптический разветвитель; 17, 18 – комплементарные компоненты световой волны; 19, 20 – коллиматорные линзы.

В данном датчике находится входная схема, которая состоит из звеньев 8, 3, 7. И также имеет выходную схему состоящую из звеньев 9 и 10, 11, 12, 4 и 5. Звено 16 создает компоненты звеньев 17 и 18 соответствующие  $L_A$  и  $L_B$ , которые следуют на звенья 19, 20.

5. Повышение точности измерения. Данная цель достигается в патенте № 62713 (рисунок 6) [10].

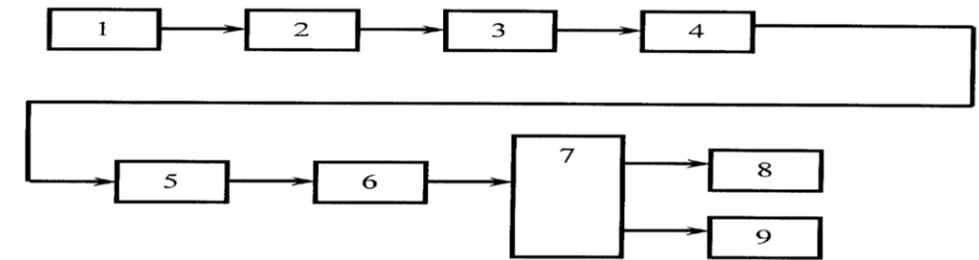


Рис. 6. Структурная схема информационно-измерительного устройства контроля магнитного поля и электрического тока: 1 – лазерный диод; 2 – поляризатор; 3 – поляризатор; 4 – магнитооптическая ячейка Фарадея; 5 – анализатор; 6 – фотоприемное устройство (фотодиод); 7 – PIC-микроконтроллер; 8 – устройство отображения информации; 9 – записывающее устройство.

Сигнал с выхода элемента 1 поступает на элементы 6, 7, 8, 9. В результате прохождения сигнала через все элементы прибора, на выходе получаем увеличение точности измерения.

6. Повышение чувствительности. Данная цель достигается в патенте №2032181 (рисунок 7) [11].

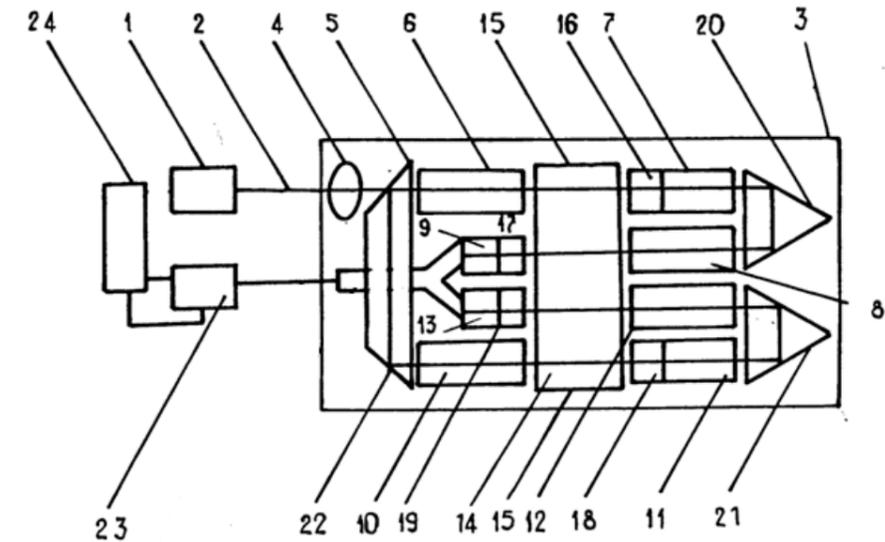


Рис. 7. Схема волоконно-оптического измерителя напряженности электрического поля и напряжения: 1- двухволновый источник; 2 – световод; 3 – датчик; 4 – микрообъектив; 5 – интерференционный светофильтр; 6- 9 – стержневые линзы; 14 -модулирующий элемент; 15 – электроды; 20 – модулирующий элемент; 22 – зеркало; 23 – фотоприемник.

Двухволновое излучение проходит по оптической цепочке, образованной элементами 1, 23, 2, 3, 14, 15, 4, на оптической оси которого под углом 45° расположены элементы 5, а на другой грани, под углом 135° размещены элементы 4 и 22. Элементы 6-9, и 20, 21 связаны с элементов 23.

7. Повышение мощности сигнала. Данная цель достигается в патенте №2405179 (рисунок 8) [12].

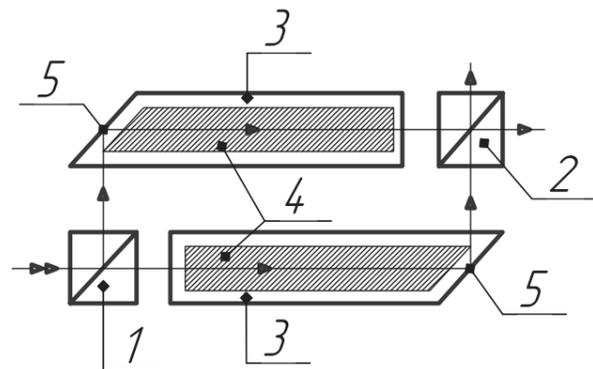


Рис. 8. Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха-Цендера:

1 – делитель светового потока на два пучка света, 2 – соединитель разделенных пучков света, 3 – электрооптические элементы, 4 – электроды, 5 – отражающие элементы, 6 – поглощающий элемент.

Два пучка света проходят через оптическую цепочку состоящая из следующих элементов 1, 2, 3, 4, 5. На выходе двух световых пучков, которые имеют разные перемещения, получают разность фаз.

8. Повышение глубины модуляции. Данная цель достигается в патенте №2267802 (рисунок 9) [13].

Луч света проходит по оптической цепочке, образованной элементами 1, 2, 3, 4, 5, элементы 4 и 5 расположены под углом 45 градусов. Звено 7 связано с элементов 2. Луч проходя через элемент 6 на выходе получает лучи различных длин волн.

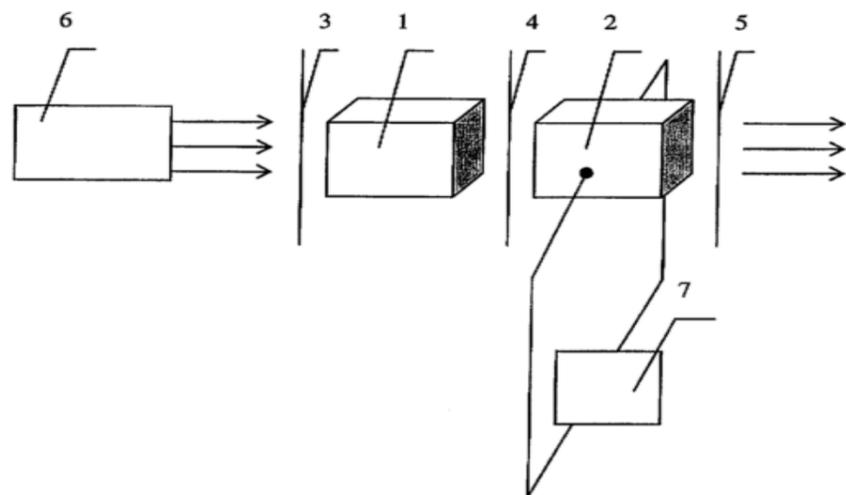


Рис. 9. Схема электрооптического модулятора: 1,2 – электрооптические кристаллы; 3 – поляризатор; 4,5 – анализаторы; 6 – источник немонахроматического излучения; 7 – генератор управляющего электрического поля.

9. Повышение мощности сигнала. Данная цель достигается в патенте № 144464 (рисунок 10) [14].

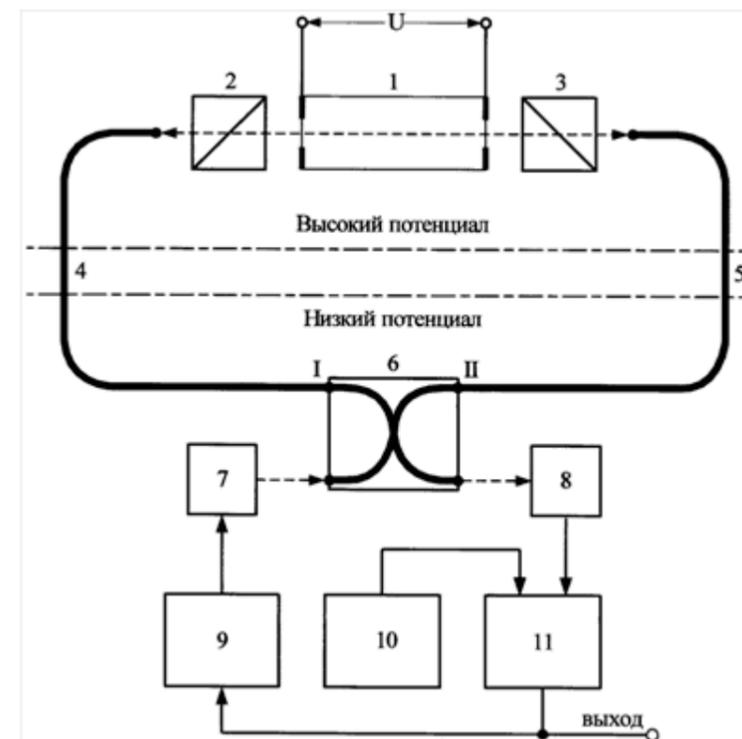


Рис. 10-Схема электрогирационного измерительного преобразователя высокого переменного напряжения; 1 – монокристалл; 2 – поляризатор; 3 – второй поляризатор; 4 – первый световод; 5 – второй световод; 6 – второй порт светоделителя; 7 – источник света; 8 – фотоприемник; 9 – интегратор; 10 – источник опорного напряжения; 11 – дифференциальный усилитель.

Луч света проходит по оптической цепочке, образованной элементами 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11. Электрическое напряжения подводится к электродам световые потоки поворачиваются в одну сторону.

В результате анализа вышерассмотренных патентов, можно представить в виде таблицы 1 принципы построения электрооптических датчиков для улучшения их характеристик. Ниже приведена эта таблица.

Таблица 1

Выявленные принципы построения электрооптических датчиков для улучшения их технических характеристик

№ п/п	Цель	Принципы построения для достижения цели	Рисунок	Источник
1	Расширение функциональных возможностей.	Введение на выходе анализатора последовательной цепочки преобразования, обработки и отображения сигнала.	Рис. 2 Схема для измерения напряженности электрического поля и напряжения	[ 6 ]
2	Повышение точности измерения	Введение двух оптических систем с линзами	Рис. 3 Структурная схема волоконно-оптического информационно-измерительного устройства	[ 7 ]
3	Уменьшение полувонового напряжения	Введение между основными электродами дополнительных, установленных параллельно основным	Рис. 4 Схема электрооптического модулятора света	[ 8 ]

Окончание таблицы 1

№ п/п	Цель	Принципы построения для достижения цели	Рисунок	Источник
4	Повышение стабильности характеристик	Введение двух фотодиодов, подключенных своими выходами к блоку обработки сигналов.	Рис. 5 Схема блока обработки сигналов	[ 9 ]
5	Повышение точности измерений	Введение на выходе PIC-микроконтроллера устройства, выход которого соединен с устройствами отображения информации и записи.	Рис. 6 Структурная схема информационно-измерительного устройства контроля магнитного поля и электрического тока	[ 10 ]
6	Повышение чувствительности	Введение дополнительных плоских электродов между четырьмя диафрагмами	Рис. 7 Схема волоконно-оптического измерителя напряженности электрического поля и напряжения	[ 11 ]
7	Повышение мощности сигнала	Выполнение электрооптических элементов в виде призм, в основании которых расположены электроды	Рис. 8 Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха-Цендера	[ 12 ]
8	Повышение глубины модуляции	Введение анализатора между кристаллами чувствительного элемента и параллельная ориентация оптических осей кристаллов	Рис. 9 Схема электрооптического модулятора	[ 13 ]
9	Повышение мощности сигнала	выход дифференциального усилителя через интегратор соединен с источником света	Рис. 10 Схема электрогирационного измерительного преобразователя высокого переменного напряжения;	[ 14 ]

## Список литературы

1. Волоконно-оптические датчики [Текст] / под ред. Эрика Удда. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2008.
2. Окоси, Т. Волоконно-оптические датчики [Текст] / Окоси Т. и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
3. Гонда С. Оптоэлектроника в вопросах и ответах [Текст] / С. Гонда, Д. Сэко. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 184 с.
4. Вострокнутов Н. Г. Основы информационно-измерительной техники: учебное пособие [Текст] / Н. Г. Вострокнутов, Н. Н. Евтихийев. – М.: Ин-т радиотехники, электроники и автоматики, 1972. – 237 с.
5. Презентация фирмы Пролан «Измерительные оптически трансформаторы тока и напряжения».
6. Патент №71441 Российская Федерация, МПК G01R13/40 Устройства для измерения напряженности электрического поля и напряжения [Текст] / М.А. Ураксеев, О.А. Михина, Д.Г. Хамета; патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уфимский государственный авиационный технический университет. – заявл. 16.10.2007. – опублик. 10.03.2008.
7. Патент №67723 Российская Федерация, МПК G01R13/40 Волоконно-оптическое информационно-

измерительное устройство [Текст] / М.А. Ураксеев, О.А. Михина, Д.Г. Хамета; патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уфимский государственный авиационный технический университет. – заявл. 13.06.2007. – опублик. 27.10.2007.

8. Патент 2029977 Российская Федерация МПК G02F1/03 Электрооптический модулятор света на продольном эффекте Поккельса [Текст] / М.А. Новиков, А.Ю. Лукьянов, В.Н. Ромашов; патентообладатель: Институт прикладной физики РАН. – заявл.13.06.1991. – 27.02.1995.

9. Патент 111679 Российская Федерация, МПК G01R13/40 Устройство измерения напряженности электрического поля [Текст] / М.В. Воронков, М.А. Власов, Б.Б. Малков, А.А. Сердцев; патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Профессиональная линия». – Заявл.20.05.2011. – опублик.20.12.2011.

10. Патент 62713 Российская Федерация, МПК G01R29 Информационно-измерительное устройство контроля магнитного поля и электрического тока [Текст] / М.А. Ураксеев, К.В. Соловей; патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уфимский государственный авиационный технический университет. – заявл. 14.12.2006. – опублик.27.04.2007.

11. Патент 2032181 Российская Федерация, МПК G01R13/40 Волоконно-оптический измеритель напряженности электрического поля и напряжения [Текст] / В.В. Киселев, В.В. Сыромятников, А.В. Ярошенко. – Заявл. 05.02.1991. – опублик.27.03.1995.

12. Патент РФ на изобретение №2405179 МПК7 G02F1/00. Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха – Цендера [Текст] / Д.Р. Древко, Ю.А. Зюрюкин; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет» (СГТУ) (RU). – №2009137927/28. – заявл. 13.10.2009. – опублик. 27.11.2010. – Бюл. № 33.

13. Патент РФ на изобретение №2267802 МПК7 G02F1/00. Электрооптический модулятор [Текст] / В.И. Строганов, Е.В. Толстов, В.В. Криштоп, И.В. Рапорт, М.Н. Литвинова, А.В. Суй; патентообладатель ГОУ ВПО Дальневосточный государственный университет путей сообщения МПС России (ДВГУПС) (RU). – №2004116031/28. – Заявл. 25.05.2004. – Опублик. 10.01.2006. – Бюл. № 1.

14. Патент 144464 Российская Федерация, МПК G01R13/40 Электрогирационный измери-

тельный преобразователь высокого переменного напряжения [Текст] / И.А. Гиниятуллин, В.Б. Архангельский; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие Марс-Энерго». – Заявл. 23.05.2014. – опублик.20.08.2014.

## References

1. Volokonno-opticheskie datchiki [Tekst]/ pod red. Jerika Udda. – M.: TEHNOSFERA, 2008.
2. Okosi T. Volokonno-opticheskie datchiki [Tekst] / Okosi T. i dr. – L.: Jenergoatomizdat, 1990. – 256 p.
3. Gonda S. Optoelektronika v voprosah i otvetah [Tekst] / S. Gonda, D. Sjeko. – L.: Jenergoatomizdat, 1989. – 184 p.
4. Vostroknutov N.G. Osnovy informacionno-izmeritel'noj tehniki: uchebnoe posobie [Tekst]/ N. G. Vostroknutov, N. N. Evtihiev. – M.: In-t radiotekhniki, jelektroniki i avtomatiki, 1972. – 237 p.
5. Prezentacija firmy Prolajn «Izmeritel'nye opticheski transformatory toka i naprjazhenija».
6. Patent №71441 Rossijskaja Federacija, MPK G01R13/40 Ustrojstva dlja izmerenija naprjazhennosti jelektricheskogo polja i naprjazhenija [Tekst]/ M.A. Urakseev, O.A. Mihina, D.G. Hameta; patentoobladatel': Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija Ufimskij gosudarstvennyj aviacionnyj tehničeskij universitet. – zajavl. 16.10.2007. – opubl. 10.03.2008.
7. Patent №67723 Rossijskaja Federacija, MPK G01R13/40 Volokonno-opticheskoe informacionno-izmeritel'noe ustrojstvo [Tekst] / M.A. Urakseev, O.A. Mihina, D.G. Hameta; patentoobladatel': Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija Ufimskij gosudarstvennyj aviacionnyj tehničeskij universitet. – zajavl. 13.06.2007. – opubl. 27.10.2007.
8. Patent 2029977 Rossijskaja Federacija MPK G02F1/03 Jeletrooptičeskij moduljator sveta na prodol'nom jeffekte Pokkel'sa [Tekst] / M.A. Novikov, A.Ju. Luk'janov, V.N. Romashov; patentoobladatel': Institut prikladnoj fiziki RAN. – zajavl.13.06.1991. – 27.02.1995.
9. Patent 111679 Rossijskaja Federacija, MPK G01R13/40 Ustrojstvo izmerenija naprjazhennosti jelektricheskogo polja [Tekst] / M.V. Voronkov, M.A. Vlasov, B.B. Malkov, A.A. Serdcev; patentoobladatel': Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju «Professional'naja linija». – Zajavl.20.05.2011. – opubl.20.12.2011.
10. Patent 62713 Rossijskaja Federacija, MPK G01R29 Informacionno-izmeritel'noe ustrojstvo kontrolja magnitnogo polja i jelektricheskogo toka

[Tekst] / M.A. Urakseev, K.V. Solovej; patentoobladatel': Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija Ufimskij gosudarstvennyj aviacionnyj tehnikeskij universitet. – Zjavl. 14.12.2006. – opubl. 27.04.2007.

11. Patent 2032181 Rossijskaja Federacija, MPK G01R13/40 Volokonno-opticheskiy izmeritel' naprjazhennosti jelektricheskogo polja i naprjazhenija [Tekst] / V.V. Kiselev, V.V. Syromjatnikov, A.V. Jaroshenko. – Zjavl. 05.02.1991. – opubl. 27.03.1995.

12. Patent RF na izobretenie №2405179 MPK7 G02F1/00. Jelektroopticheskiy moduljator po sheme interferometra Maha – Cendera [Tekst] / D.R. Drevko, Ju.A. Zjurjukin; patentoobladatel' Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija «Saratovskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet» (SGTU) (RU). – №2009137927/28. – Zjavl. 13.10.2009. – opubl.

27.11.2010. – Bjul. №33.

13. Patent RF na izobretenie №2267802 MPK7 G02F1/00. Jelektroopticheskiy moduljator [Tekst] / V.I. Stroganov, E.V. Tolstov, V.V. Krishtop, I.V. Rapoport, M.N. Litvinova, A.V. Sjuj; patentoobladatel' GOU VPO Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija MPS Rossii (DVGUPS) (RU). – №2004116031/28. – Zjavl. 25.05.2004. – Opubl. 10.01.2006. – Bjul. №1.

14. Patent 144464 Rossijskaja Federacija, MPK G01R13/40 Jelektrogiracionnyj izmeritel'nyj preobrazovatel' vysokogo peremennogo naprjazhenija [Tekst] / I.A. Ginijatullin, V.B. Arhangel'skij; patentoobladatel' Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju «Nauchno-proizvodstvennoe predpriyatje Mars-Jenergo». – Zjavl. 23.05.2014. – opubl. 20.08.2014.

## НАНОЭЛЕКТРОНИКА И КВАНТОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ NANOELECTRONICS AND QUANTUM DATA SYSTEMS



*Доломатов М.Ю.*

*Dolomatov M.Yu.*

*кандидат технических наук, доктор химических наук  
профессор кафедры «Технологические машины и приклад-  
ная физика», заведующий научно-исследователь-  
ской лабораторией «Физика электронных процессов  
и наноматериалов» ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный университет экономики и сервиса»  
Россия, г. Уфа*

УДК 530.1:536.7:539:3

### ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СУПЕРФУНКЦИОНАЛА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКЕ И ТЕРМОДИНАМИКЕ

Предложена феноменологическая модель суперфункционала описывающего энергию квантовой системы физических тел. Этот суперфункционал включает множество энергетических функций, соответствующих минимуму энергии системы и зависящих от дуальных наборов метрических и топологических параметров. Установлено, что такими параметрами могут быть простые физические свойства, например, интегральные силы осцилляторов в УФ и видимом диапазонах электромагнитного спектра и заряды атомов. Физический смысл суперфункционала определен энергией совокупности электронных основных и возбужденных состояний частиц близких по типу внешних электронных оболочек. Для первого и второго порядки возмущения суперфункционала энергии квантовой системы предложена двухпараметрическая полуэмпирическая феноменологическая модель.

Модель подтверждается зависимостью первых потенциалов ионизации молекул от интегральной силы осцилляторов и топологических характеристик молекулярного графа, зависимостью потенциалов ионизации атомов металлов от интегрального коэффициента отражения и зарядов атомов. Кроме того, модель подтверждена зависимостью физико-химических свойств углеводородов от энергетических и топологических параметров. Адекватность моделей подтверждается статистической обработкой экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* полуэмпирическая модель, суперфункционал энергии интегральный коэффициент отражения, заряды атомов, оптические спектры, электрон-электронное, электрон-фононное взаимодействие.

### PHENOMENOLOGICAL MODEL OF ENERGY STATE SUPERFUNCTIONAL AND ITS APPLICATION FOR ELECTRONICS AND THERMODYNAMICS

The twoparametrical, semiempirical, phenomenological model was proposed for the first and the second orders of the perturbation of the quantum system energy superfunctional, which contain the ensemble of energy

functions corresponding to minimum an energy of system. This functional physical meaning is the set energy of molecules, solids electronic ground and excited states. Moreover functional have depending on similar type of external electron clouds.

The above functional is defined by electrostatic energy interaction between the electrons, exchange energy and all electronics energy and ionic lattice interaction.

The above it dependents from double-natured of sets metric and topological parameters. While doing a research it was supposed, that these parameters can be represent by a simple empirical physical quantity such as integral coefficients of absorption ore reflection electromagnetic spectrum, a charge of atoms, a molecular graph eigenvalue. Furthermore they correspondingly are expressed via the thermodynamics free energy.

The model is confirmed by the dependency of the molecules and solids potentials ionization on the integral reflection coefficient, charges of atoms. Furthermore for physic-chemical properties are existed the correlation with, a molecular graph eigenvalue of hydrocarbons. The multiple regression analysis method is used of the performed calculations of. The obtained results are confirmed by the statistic data processing for varies systems as such hydrocarbons and metales. The determined practical application while estimating energy ionizing and another physic-chemical properties of moleculas.

*Key words:* perturbation of energy superfunctional of quantum system ionization energy, charge of atoms, physic-chemical properties of moleculas, force of oscillation.

Известно, что важное для электроники свойство твердых тел и полимеров – энергия ионизации, работа выхода, электрическая проводимость и другие свойства определяются их зонной структурой [1,2]. Известна значительная группа методов [1-5] расчета зонной структуры, металлов и полупроводников, например, метод ортогонализованных плоских волн, метод присоединенных плоских волн (ППВ), методы Хартри-Фока, метод ККР, (Корринга, Кона и Рострокера) и др. В настоящее время для расчета электронной структуры молекул и твердых тел широко используются методы теории функционала плотности метод (DFT) Кона-Шема в сочетании с многочастичной теорией возмущения [4,5]. Методы DFT позволяют в расчетах заменить многоэлектронную волновую функцию электронной плотностью. Недостатки методов DFT: недооценка ширины запрещенной зоны в неидеальных решетках кристаллов молекулах и кластерах, ошибки в расчетах энергии ионизации и сродства к электрону и неприменимость к системам с открытыми оболочками, например, к парамагнитным наночастицам. Поэтому наряду с теоретическими необходимо развивать полуэмпирические подходы к оценке электронных состояний реальных твердых тел и молекул, которые опираются на эксперимент и прежде всего на данные спектроскопии. Цель данного исследования- разработка полуэмпирической феноменологической модели суперфункционала электронных состояний, которая позволяет без сложных расчетов получать информацию

о электронной структуре и физико-химических свойств молекул и твердых тел.

Основная идея работы состоит в предположении, что наблюдаемый в эксперименте спектр суммы собственных значений энергий совокупности  $m$  неидеальных квантовых систем – энергетическое множество  $E$  описывается определенным суперфункционалом  $F$  от энергии всех взаимодействующих основных и возбужденных электронных состояний. Эти энергетические суперфункционалы могут быть построены из квантовых систем с однотипным строением внешних электронной оболочек, например, молекул, твердых тел или атомов элементов определенной группы в системе Д.И. Менделеева.

Математические аспекты суперфункционала энергетических состояний

Определим структуру пространства суперфункционала  $F$ , как нелинейное пространство. Пусть это нелинейное пространство состояний  $S_n$  ( $F$ ) является суперпозицией метрического и топологического пространства  $R_n(E, \rho) + G(E, \mathcal{V})$ .

В свою очередь  $N$  мерное метрическое пространство  $R_n$  определяется подмножеством энергетических состояний  $E$  и метриками  $\rho(x, y)$  – функцией расстояния между точками  $x$  и  $y$ . Топологическое пространство  $G$  определяется подмножеством состояний  $E$  и подмножеством топологий  $\mathcal{V}$ . Из изложенного следует пересечение пространств  $R_n(E, \rho) \cap G(E, \mathcal{V})$  по общему подмножеству энергетических состояний  $E$ . Нелинейность функционала означает, что:

$$F(\alpha x + \beta y) \neq \alpha F(x) + \beta F(y) \quad \forall \alpha, \beta \in S^n, \forall x, y \in E \quad (1)$$

Кроме того, суперфункционал является положительно однородным, так как

$$F(\alpha x) = \alpha F(x) \quad \forall \alpha > 0, \forall x \in E \quad (2)$$

и однородно выпуклым, так как

$$F(x+y) \leq F(x) + F(y) \quad \forall x, y \in E \quad (3)$$

**Физические аспекты суперфункционала энергетических состояний**

В общем случае функционал  $F$  построен на классе не сепарабельных, гладких, ограниченных функций. Для твердых тел и полимеров они, явля-

ются суперпозицией дискретных, спектральных Блоховских функций и могут быть представлены, например, функциями  $\Psi$  от рядов Фурье для  $m$  решеток

$$\theta(\epsilon, \lambda) = \Psi \left( \sum_m \sum_n A_{mn} \cdot e^{inkt} \right), \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4)$$

где  $A_{mn}$  – константа,  $t$  – время,  $s$ ,  $n$  – число членов ряда Фурье,  $i$  – комплексная единица.

В общем случае предполагается, что множество состояний  $E$  может быть представлена суммой бесконечно большого числа бесконечно близких по частоте колебаний с бесконечно малыми амплитудами и образует множество функций  $e^{inkt}$ ,  $-\infty < n < \infty$  в (9) образует бесконечномерный базис линейного пространства  $L^2[a; b]$  ортогональных синус-косинусных функций. Выразим суперфункционалы через дуальные наборы различных сохра-

няющихся физических величин, построенных в пространстве  $S^n$ , учитывающих энергию обменное взаимодействие электронов  $\theta$  и топологию систем  $I$ . Учитывая вариационные принципы, т.е. стремление системы к минимуму энергии, разложим функционал в ряд по степеням дуальных энергетических и топологических величин вблизи состояния минимума энергии  $F(\theta_0, I_0)$ . Разложение проведем, считая функционал  $F$  непрерывным от двух переменных,  $(\theta - \theta_0)$  и  $(I - I_0)$  и некоторого остаточного члена

$$F(\theta, I) = F(\theta_0, I_0) + \frac{\theta - \theta_0}{1!} \cdot \frac{\partial F(\theta_0, I_0)}{\partial \theta} + \frac{(\theta - \theta_0)^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 F(\theta_0, I_0)}{\partial \theta^2} + \frac{(\theta - \theta_0)^3}{3!} \cdot \frac{\partial^3 F(\xi_2, I_0)}{\partial \theta^3} + \frac{I - I_0}{1!} \left[ \frac{\partial F(\theta_0, I_0)}{\partial I} + \frac{\theta - \theta_0}{1!} \cdot \frac{\partial^2 F(\theta_0, I_0)}{\partial (I\theta)} + \frac{(\theta - \theta_0)^2}{2!} \cdot \frac{\partial^3 F(\xi_2, I_0)}{\partial (I\theta^2)} \right] + \frac{(I - I_0)^2}{2!} \left[ \frac{\partial^2 F(\theta_0, I_0)}{\partial (I^2)} + \frac{\theta - \theta_0}{1!} \cdot \frac{\partial^3 F(\xi_3, I_0)}{\partial (I^2\theta)} \right] + \frac{(I - I_0)^3}{3!} \cdot \frac{\partial^3 F(\theta, \eta_1)}{\partial (I^3)},$$

$$\text{где } \eta_1 = I_0 + \mu_1(I - I_0), \quad 0 < \mu_1 < 1 \quad \xi_1 = \theta + \mu_2(\theta - \theta_0), \quad 0 < \mu_2 < 1 \\ \xi_2 = \theta + \mu_3(\theta - \theta_0), \quad 0 < \mu_3 < 1 \quad \xi_3 = \theta + \mu_4(\theta - \theta_0), \quad 0 < \mu_4 < 1. (5)$$

При  $n=2$  формула (5) примет вид

$$F(\theta, I) = A_0 + A_1(\theta - \theta_0) + A_2(I - I_0) + [A_3(\theta - \theta_0)^2 + A_4(\theta - \theta_0)(I - I_0) + A_5(I - I_0)^2] + R, \quad (5)$$

где коэффициенты  $A_{0-5}$ , не зависят от  $\theta$  и  $I$ , а  $R$  – остаточный член, структура которого аналогична структуре остаточного члена в формуле Тейлора для сходящегося ряда двух переменных. Полагая  $\theta_0 = 0$  и  $I_0 = 0$ ,  $R_2 \rightarrow 0$  перепишем формулу (5) для любой энергии системы, как квадратичной формы от  $\theta$  и  $I$ .

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} \quad (6)$$

Суммирование в (6) проводится по внутренним состояниям  $j$  –го элемента системы и по всем  $m$  компонентам системы. Из (6) следует, что энергия

$$\varepsilon_i = A_0 + A_1 \cdot \theta + A_2 \cdot I + A_3 \cdot \theta^2 + A_4 \Theta I + A_5 \cdot I^2 \quad (7)$$

Варианты таких зависимостей (7) для потенциалов ионизации могут быть построены как функции от интегральных сил осцилляторов электронных спектров (ИСО) и собственных значений гамильтонианов. Различные варианты (7) проанализированы в работах [6]. Частными случаями, подтверждающие зависимость (7) являются многочисленные зависимости потенциалов ионизации и сродства к электрону атомов и молекул от ИСО [6–8], а также зависимости ПИ от ИСО и топологических индексов молекулярных графов, подробно описанные в [6]. Эти работы свидетельствуют, что при условии близости топологий систем можно ограничиться линей-

$$P = A_0 + A_1 \cdot \theta_R + A_2 \cdot C + A_3 \cdot \theta_R^2 + A_4 \Theta_R C + A_5 \cdot C^2 \quad (8)$$

Физический смысл коэффициентов (8) заключается в характеристике возмущения суперфункционала энергетического спектра квантовой системы под влиянием структурных, кулоновских и обменных факторов электронного взаимодействия.

Коэффициенты  $a_{1-5}$  очевидно имеют физический смысл как характеристики возмущения внешней электронной оболочки. Так,  $a_0$  характеризует тип квантовой системы;  $a_1, a_4$  – возмущение оболочек под влиянием кулоновских и обменных факторов электронного взаимодействия;  $a_2, a_5$  – возмущение оболочек под влиянием кулоновских факторов взаимодействия электронов с ионами решетки и распределение ее электростатического потенциала с учетом экранирования,  $a_4$  характеризует возмущения в результате совместного электростатического и спин-решеточного взаимодействия. Очевидно, что члены пропорциональные  $Z$  и  $Z^2$  можно интерпретировать через энергию куло-

Функционал  $F$  по определению может быть любой функцией от минимальной энергии системы, в частности в замкнутой квантовой системе его можно выразить набором суммы собственных значений гамильтонианов определяющих возможные состояния квантовой системы  $\varepsilon_j$ .

каждого квантового состояния может быть представлена, как функция дуальной пары топологических индексов (7)

ными вариантами (7). Дуальные пары топологических индексов определяющие зависимости (7) являются неединственными. В твердых телах в качестве пар могут быть выбраны интегральные коэффициенты отражения (ИКО) электромагнитного излучения и заряды атомов (С). Разложение (7) позволяет искать зависимость функции потенциала ионизации (Р) от дуального набора переменных- интегрального коэффициента отражения ИКО и зарядов атомов кристаллической решетки, Эти дуальные величины отражают законы сохранения числа частиц и сохранения заряда квантовой системы соответственно и имеют вид:

новского взаимодействия точечных зарядов или систем зарядов, но в нашем подходе это не имеет значение, так как функция (8) учитывает скорее топологию, и лишь косвенно геометрию системы

Для экспериментальной проверки (8) нами исследованы электронные спектры отражения металлов 2 группы периодической системы: Ве, Mg, Са, Zn, Sr, Cd, Ва. Соответствующие спектры выбирались из базы данных [9]. Интегрирование спектров проводили методом трапеции с шагом 5 нм. Потенциалы ионизации атомов металлов выбирались по известным данным атомной эмиссионной спектроскопии. Статистическую обработку спектров отражения проводили методом многофакторного регрессионного анализа по стандартным программам [10, 11] с оценкой множественного коэффициента корреляции  $R$ , коэффициента детерминации  $R^2$ , стандартную ошибку  $S$ , соответствующие данные приводятся в таблице.1.

Таблица 1

Статистические характеристики двупараметрической феноменологической модели потенциалов ионизации

Металлы и тип внешней оболочки	R	R2	S	$\varepsilon$ эВ
Металлы второй группы ns2	0,984	0.968	0,020	0,2141

Значения этих коэффициентов модели приведены в таблице 3. Расчеты свидетельствуют о значимости всех коэффициентов в (13)

Таблица 2

Коэффициенты разложения функционала электронных энергий

Коэффициенты	a0 эВ	a1 эВ	a2 эВ	a3 эВ	a4 эВ	a5 эВ
Численные значения	13.3239	-0,0128	-0,2942	0,0002	1,098 10 -5	0,0027

Таким образом, на основе экспериментальных погрешностей расчетной оценки. В таблицах 4-5 спектроскопических данных установлены корреляционные зависимости первого ПИ от ИКО. Достоверность полученных данных подтверждена оценкой

Таблица 3

Расчетные и экспериментальные ПИ для металлов второй группы системы Менделеева

Металлы	Состояние	ИКО отн.ед.	Заряд ядра	ПИ эВ эксп	ПИ эВ расч	Разность ПИ эВ
Ве	напыленное	393,57	4	9,320	9,119	0,201
Mg	напыленное	573,37	12	7,650	7,651	-0,001
Са	напыленное	331,72	20	6,110	6,641	-0,531
Zn	монокристалл	929,66	30	9,390	9,418	-0,028
Sr	напыленное	293,95	38	5,690	5,181	0,509
Cd	напыленное	799,35	48	8,990	8,950	0,040
Ва	напыленное	304,15	56	5,220	5,409	-0,189

Так, для металлов 2 групп таблицы Менделеева, среднеквадратичная ошибка составляет: 0,2 эВ, а средняя абсолютная 0,20 эВ. Очевидно точность измерений можно повысить, уменьшая ошибку эксперимента определения спектров отражения путем подготовки однородных поверхностей образцов однородных по микроструктуре и степени шероховатости. Двумерную зависимость (6) можно использовать для предсказания ПИ, минуя квантовые расчеты.

Термодинамические аспекты

Очевидно, что в изотермических условиях суперфункционал соответствует сумме свободных энергий системы и изменение функционала  $dF = 0$  в условиях термодинамического равновесия равно нулю. Тогда из первого и второго законов термодинамики [12] следует линейная система уравнений, связывающая работу (А) и энтропию системы (S):

$$dF = dG = \pm A - TdS \tag{9}$$

$$A = \pm \sum X_i dq_i \tag{10}$$

где  $X_i$  – обобщенная сила,  $dq_i$  – соответствующая обобщенная координата; Учитывая, что измерение любого физико-химические свойства системы требует затраты энергии. Если  $Z$  измеряются, путем совершения работы внешних сил над системой с, преодолением внутренних сил, имеем:

$$Z = X = \frac{\partial A_S}{\partial q} \tag{11}$$

тогда из (9) – (10) следует, что

$$\mp X_i dq_i = \pm \sum_{j \neq i}^n X_j dq_j + TdS \tag{12}$$

При постоянстве всех свойств кроме измеряемых имеем:

$$\mp X_i dq_i = \pm X_j dq_j + TdS$$

$$A_j = \pm X_j dq_j$$

$$Z_i = \frac{\partial A_j}{\partial q_j} + T \frac{\partial S}{\partial q_i} \tag{13}$$

Уравнение (13) показывает, что каждое свойство системы проявляется через работу внешних или внутренних сил (энергию молекулярных взаимодействий) и связано с изменением энтропии.

Для системы молекул близких по структуре, представим свойства как суперфункционал от дуальных величин, зависящих от внутренних потенциалов энергии взаимодействия атомов  $\epsilon$  и структуры молекул  $I$ . Подобные зависимости известны, как молекулярные дескрипторы в модели QSPR (Quantitative Structure-Property Relationships), устанавливающие связь физико-химических свойств молекул и топологических индексов. [13,14] Считая  $Z$  непрерывной функцией двух переменных, разложим ее в ряд Тейлора по степеням  $(\epsilon - \epsilon_0)$  и  $(I - I_0)$  и некоторого остаточного члена  $R$

$$Z(\epsilon, I) = Z(\epsilon_0, I_0) + \left[ \frac{\partial Z(\epsilon_0, I_0)(\epsilon - \epsilon_0)}{\partial \epsilon} + \frac{\partial Z(\epsilon_0, I_0)(I - I_0)}{\partial I} \right] + \frac{1}{2!} \left[ \frac{\partial^2 Z(\epsilon_0, I_0)}{\partial I^2} (I - I_0)^2 + \frac{\partial^2 Z(\epsilon_0, I_0)(\epsilon - \epsilon_0)}{\partial \epsilon^2} + \frac{\partial^2 Z(\epsilon_0, I_0)(\epsilon - \epsilon_0)(I - I_0)}{\partial I \partial \epsilon} \right] + R(\epsilon_0, I_0) \tag{14}$$

Полагая, что  $\theta_0 = 0$  и  $I_0 = 0$ ,  $R_2 \rightarrow 0$  перепишем формулу (14) в виде

$$Z(\epsilon, I) = a_0 + a_1 \epsilon + a_2 I + a_3 \epsilon^2 + a_4 \epsilon I + a_5 I^2 \tag{15}$$

Физический смысл коэффициентов  $a_1 - a_5$  в (15) заключается в характеристике возмущения свойств под влиянием структурных топологических факторов и энергии взаимодействия. Известно, что в простых моделях взаимодействия атомов типа Изинга или Хюккеля энергия молекул коррелирует с суммой собственных значений МГ. Ограничиваясь первыми двумя членами разложения в (13). Получаем линейную двухпараметрическую модель вида:

$$Z = a_0 + a_1 \cdot W + a_2 \cdot \Lambda \tag{16}$$

где  $Z$  – рассчитываемое физико-химическое свойство углеводорода;  $a_0, a_1, a_2$  – коэффициенты модели;  $W$  – индекс Винера;  $\Lambda$  – полусумма собственных значений топологической матрицы молекулы. В качестве функций использовались приведенные или относительные свойства углеводородов изоалканов – температуру кипения  $T_{кип}$ , плотность  $\rho$  и моля, рассмотренные в [15]

$$y_1 = T_{кип} / T_{кип(CH_4)}, y_2 = \rho / \rho_{(CH_4)}, y_3 = M / M_{(CH_4)} \tag{17}$$

Линейной модели вида (16) описаны в [16]. Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4

Параметры модели (16) для расчета свойств изоалканов

Параметры модели (1)	M	$\rho$	T <sub>кип</sub> , K
a0	16.06	0.4316	154.5
a1	2.69·10 <sup>-4</sup>	-0.0011	-0.3716
a2	7.01	0.0256	18.99
Отклонение $\epsilon$	0.00025	0.017	0.034
Дисперсия $\delta$	1.596	0.006	0.059

Абсолютные отклонения расчетных и справочных параметров приведены в таблице 5.

Таблица 5

Сравнение расчетных и справочных значений параметров

Название углеводорода	y1_спр	y1_расч	$\Delta$	y2_спр	y2_расч	$\Delta$	y3_спр	y3_расч	$\Delta$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2-Метилпропан	1.625	1.689	0.064	1.273	0.990	0,284	3.623	3.624	0.001
2-Метилбутан	1.871	1.869	0.002	1.385	0.988	0.397	4.498	4.498	0.0
2-Метилпентан	2.073	2.046	0.027	1.459	0.986	0.473	5.373	5.372	0.001
2,3-Диметилбутан	2.059	2.048	0.010	1.479	0.986	0.493	5.373	5.372	0.001
2-Метилгексан	2.258	2.219	0.039	1.517	0.984	0.532	6.247	6.247	0.0
2,4-Диметилпентан	2.198	2.222	0.023	1.503	0.984	0.519	6.247	6.247	0.0
4-Метилгептан	2.430	2.389	0.040	1.575	0.986	0.592	7.1209	7.1214	0.0005
3,3-Диметилгексан	2.394	2.395	0.001	1.586	0.982	0.603	7.1209	7.1213	0.0003
2,3,4-Триметилпентан	2.403	2.396	0.007	1.606	0.982	0.624	7.1209	7.1212	0.0003
4-Этилгептан	2.576	2.557	0.019	1.631	0.981	0.650	7.9963	7.9960	0.0002
3,3-Диметилгептан	2.550	2.560	0.010	1.619	0.981	0.639	7.9960	7.9959	0.0003
4-Этилоктан	2.715	2.717	0.002	1.653	0.979	0.674	8.871	8.871	0.0
3,4-Диметилоктан	2.714	2.720	0.006	1.666	0.979	0.687	8.8709	8.8708	0.0001
4-Пропилгептан	2.677	2.719	0.042	1.644	0.979	0.665	8.8709	8.8708	0.0001

Из анализа таблиц 4 и 5 следует, что точность расчета рассматриваемых физико-химических свойств углеводородов удовлетворительна и погрешность не превышает 1%.

**Выводы**

Предложен обобщенный суперфункционал описывающий энергию квантовой системы физических тел. Этот суперфункционал включает множество энергетических функций соответствующих минимуму энергии системы и зависящих от дуальных наборов метрических и топологических параметров. Установлено, что такими параметрами могут быть различные физические свойства, например, топологические индексы, интегральные силы осцилляторов в УФ и видимом диапазонах

электромагнитного спектра, заряды атомов, физико-химические свойства. Физический смысл суперфункционала определен энергией совокупности электронных основных и возбужденных состояний частиц близких по типу внешних электронных оболочек. Для первого и второго порядки возмущения суперфункционала энергии квантовой системы предложена двухпараметрическая полуэмпирическая феноменологическая модель.

Модель подтверждается зависимостью первых потенциалов ионизации молекул от интегральной силы осцилляторов и топологических характеристик молекулярного графа, зависимостью потенциалов ионизации атомов металлов от интегрального коэффициента отражения и зарядов атомов. Кроме того модель подтверждена зависимостью физико-химических свойств углеводородов от энергетических и топологических параметров. Адекватность моделей подтверждаются статистической обработкой экспериментальных данных.

#### Список литературы

1. Ашкрофт Н. Физика твердого тела [Текст] / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М.: Мир, 1979. – 399 с.
2. Зиненко В.И. Основы физики твердого тела [Текст] / В.И. Зиненко, Б.П. Сорокин, П.П. Турчин. – М.: Изд. Физ.-мат. лит., 2001. – 336 с.
3. Kresse G. The guide of VASP [Text] / G. Kresse, D. Joubert // Phys. Rev. – 59. – 1758 (1999). – URL: <https://cms.mpi.univie.ac.at/marsweb/index.php>.
4. Кон В. Электронное строение вещества – волновые функции и функционалы плотности [Текст] / В. Кон // УФН. – 2002. – т.172. – №3. – с. 336-338.
5. Андриевский Б.В. Расчет зонной структуры и оптических свойств кристаллов ГАСГ [Текст] / Б.В. Андриевский, Н.Н. Романюк, О.Я. Мишишин и др. // Физика твердого тела. – 2012. – том 54. – №10. – с.1940-1945.
6. Доломатов М.Ю. Способ определения потенциалов ионизации и сродства к электрону атомов и молекул методом электронной спектроскопии [Текст] / М.Ю. Доломатов, Г.Р. Мукаева // Журнал прикладной спектроскопии. – 1992. – Т. 56. – №4. – С. 570.
7. Dolomatov M.Yu. Simple characteristics estimation methods of material and molecule electronic structure [Text] / M.Yu. Dolomatov, D.O. Shulyakovskaya, G.R. Mukaeva, G.U. Jarmuhametova, K.F. Latypov // Journal of Materials Science and Engineering. – 2012. – В 2(4). – pp. 261-268.

8. Ковалева Э.А. Взаимосвязь интегральных характеристик электронных спектров поглощения с потенциалами ионизации в ряду производных 1,4-нафтохинона [Текст] / Э.А. Ковалева, М.Ю. Доломатов // Башкирский химический журнал. – 2014. – Т. 21. – №2. – С. 44-50

9. Золотарев В.М. Оптические постоянные природных и технических сред. Справочник [Текст] / В.М. Золотарев, В.Н. Морозов, Е.В. Смирнова. – Л., Химия, 1984. – с.69-98.

10. Бахвалов Н.С. Численные методы [Текст] / Н.С. Бахвалов. – М.:Наука, 2000. – 630 с

11. Тюрин Ю.Н. Статистический анализ данных на компьютере [Текст] / Ю.Н. Тюрин, А.А. Макаров. – М.: Изд. Физ.-мат. лит., 1998. – 528 с

12. Базаров И.П. Термодинамика. Учебник для вузов [Текст] / И.П. Базаров – М.: Высш. шк., 1991. – 376 с.

13. Урядов В.Г. Взаимосвязь чисел термодинамического подобия и топологических характеристик структуры органических молекул [Текст] / В.Г. Урядов, Н.В. Аристова, Е.Н. Офицеров // Журн. физ. химии. – 2007. – Т. 81. №5. – С. 801–805.

14. Станкевич М.И. Топологические индексы в органической химии [Текст] / М.И. Станкевич, И.В.Станкевич, Н.С. Зефиоров // Успехи химии. – 1988. – Т. 57. – №3. – С. 337–366

15. Ахметов С.А. Моделирование и инженерные расчеты физико-химических свойств углеводородных систем: Учебное пособие [Текст] / С.А. Ахметов, А.Р. Гайсина. – СПб.: Недра, 2010. – 128 с.

16. Доломатов М.Ю. О связи топологических характеристик молекул и свойств алканов [Текст] / М.Ю. Доломатов, Н.А. Шамова, Е.Ф.Трапезникова, Т.М. Аубекеров, А.В. Стенькин // Башкирский химический журнал. – 2014. – Т.21. – №3. – С. 50-53.

#### References

1. Ashcroft N. Fizika tverdogo tela [Text] / N. Ashcroft, N. Mermin. – M.: Mir, 1979. – 399 s.
2. Zinenko V.I. Osnovy fiziki tverdogo tela [Text] / V.I. Zinenko, B.P. Sorokin, P.P. Turchin. – M.: Izd. Fiz.-mat. lit., 2001. – 336 s.
3. Kresse G. The guide of VASP [Text] / G. Kresse, D. Joubert // Phys. Rev. – 59. – 1758 (1999). – URL: <https://cms.mpi.univie.ac.at/marsweb/index.php>.
4. Kon V. Jelektronnoe stroenie veshhestva – volnovye funkcii i funkcionaly plotnosti [Text] / V. Kon // UFN. – 2002. – t.172. – №3. – s. 336-338.
5. Andrievskij B.V. Raschet zonnnoj struktury i opticheskij svoystv kristallov GASG [Text] / B.V. Andrievskij, N.N. Romanjuk, O.Ja. Mishhishin i dr.

// Fizika tverdogo tela. – 2012. – том 54. – №10. – с.1940-1945.

6. Dolomatov M.J. Sposob opredelenija potencialov ionizacii i srodstva k jelektronu atomov i molekul metodom jelektronnoj spektroskopii [Text] / M. Ju. Dolomatov, G.R. Mukaeva // Zhurnal prikladnoj spektroskopii. – 1992. – Т. 56. – №4. – С. 570.

7. Dolomatov M.Yu. Simple characteristics estimation methods of material and molecule electronic structure [Text] / M.Yu. Dolomatov, D.O. Shulyakovskaya, G.R. Mukaeva, G.U. Jarmuhametova, K.F. Latypov // Journal of Materials Science and Engineering. – 2012. – В 2(4). – pp. 261-268.

8. Kovaleva Je.A. Vzaimosvjaz' integral'nyh harakteristik jelektronnyh spektrov pogloshhenija s potencialami ionizacii v rjadu proizvodnyh 1,4-naftohinona [Text] / Je.A. Kovaleva, M.Ju. Dolomatov // Bashkirskij himicheskij zhurnal. – 2014. – Т. 21. – №2. – С. 44-50

9. Zolotarev V.M. Opticheskie postojannye prirodnyh i tehniceskij sred. Spravochnik [Text] / V.M. Zolotarev, V.N. Morozov, E.V. Smirnova. – L., Himija, 1984. – с.69-98.

10. Bahvalov N.S. Chislennye metody [Text] / N.S. Bahvalov. – М.:Наука, 2000. – 630 с

11. Tjurin Ju.N. Statisticheskij analiz dannyh na komp'jutere [Text] / Ju.N. Tjurin, A.A. Makarov. – М.: Изд. Физ.-мат. лит., 1998. – 528 с

12. Bazarov I.P. Termodinamika. Uchebnik dlja vuzov [Text] / I.P. Bazarov – М.: Vyssh. shk., 1991. – 376 с.

13. Urdjadov V.G. Vzaimosvjaz' chisel termodinamicheskogo podobija i topologicheskij harakteristik struktury organicheskij molekul [Text] / V.G. Urdjadov, N.V. Aristova, E.N. Oficerov // Zhurn. fiz. himii. – 2007. – Т. 81. №5. – С. 801–805.

14. Stankevich M.I. Topologicheskie indeksy v organicheskij himii [Text] / M.I. Stankevich, I.V.Stankevich, N.S. Zefirov // Usphehi himii. – 1988. – Т. 57. – №3. – С. 337–366

15. Ahmetov S.A. Modelirovanie i inzhenernye raschety fiziko-himicheskij svoystv uglevodorodnyh sistem: Uchebnoe posobie [Text] / S.A. Ahmetov, A.R. Gajsina. – SPb.: Nedra, 2010. – 128 с.

16. Dolomatov M.J. O svjazi topologicheskij harakteristik molekul i svoystv alkanov [Text] / M.Ju. Dolomatov, N.A. Shamova, E.F.Trapeznikova, T.M. Aubekеров, A.V. Sten'kin // Bashkirskij himicheskij zhurnal. – 2014. – Т.21. – №3. – С. 50-53.

## ОБ АВТОРАХ

*Абызбаев Ибрагим Измаилович*, доктор техн. наук, профессор кафедры «Разработка и эксплуатация нефтегазовых месторождений», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: iktugaes@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Андреева Елена Григорьевна*, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая техника» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет», e-mail: semina\_ia@mail.ru, Россия, г. Омск.

*Антипов Дмитрий Вячеславович*, доктор техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Торговое дело и управление производством», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет», e-mail: DmitryA@tltsu.ru, Россия, Тольятти.

*Антонов Дмитрий*, доктор техн. наук, научный сотрудник, Энергетический институт, Рижский технический университет, e-mail: dantonov@eef.rtu.lv, Латвия, г. Рига.

*Аухадеев Авер Эрикович*, канд. техн. наук, доцент кафедры, доцент кафедры «электротехнические комплексы и системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», e-mail: litrus@km.ru, Россия, г. Казань.

*Биела-Далидовича Эдите*, магистр, аспирант, Энергетический институт, Рижский технический университет, e-mail: eef@rtu.lv, Латвия, г. Рига.

*Бородин Олег Александрович*, аспирант кафедры «Электроснабжение и Электротехника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тольяттинский государственный университет», e-mail: ale.bochkaryov@gmail.com, Тольятти, Россия.

*Бочкарев Алексей Валериевич*, магистрант кафедры «Электроснабжение и электротехника» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тольяттинский государственный университет», e-mail: ale.bochkaryov@gmail.com, Россия, г. Тольятти.

*Вахитова Роза Ильгизовна*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Альметьевский государственный нефтяной институт», e-mail: goza-w@mail.ru, Россия, г. Альметьевск.

*Грахов Павел Анатольевич*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: walther@inbox.ru, Россия, г. Уфа.

*Губайдуллин Ирек Марсович*, доктор физ.-мат. наук, доцент, старш. научн. сотрудник лаборатории математической химии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт нефтехимии и катализа» Российской академии наук, e-mail: irekmars@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Демин Александр Владимирович*, аспирант кафедры «Электрическая техника» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет», e-mail: deminksander@gmail.com, Россия, г. Омск.

*Долгицер Александр*, доктор техн. наук, профессор, Энергетический институт, Рижский технический университет, e-mail: eef@rtu.lv, Латвия, г. Рига.

*Доломатов Михаил Юрьевич*, канд. техн. наук, доктор химических наук, профессор кафедры «Технологические машины и прикладная физика», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика электронных процессов и наноматериалов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: dolomatov@gmail.com, Россия, г. Уфа.

*Жалбеков Искандер Маратович*, аспирант кафедры «Информационно-управляющие системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: nthsk@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Закурдаева Татьяна Алексеевна*, аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: zak.tanya@bk.ru, Россия, г. Кумертау.

*Идиятуллин Ренат Гаисович*, доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехнические комплексы и системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», e-mail: litrus@km.ru, Россия, г. Казань.

*Карабельская Ирина Владимировна*, аспирант кафедры «Технологические машины и прикладная физика», доцент кафедры «Информатика и ИКТ», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: iktugaes@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Козадаев Евгений*, магистр, научный сотрудник, Энергетический институт, Рижский технический университет, e-mail: eef@rtu.lv, Латвия, г. Рига.

*Козловский Владимир Николаевич*, доктор техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», e-mail: Kozlovskiy-76@mail.ru, Россия, г. Самара.

*Крымский Виктор Григорьевич*, доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Информационно-управляющие системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: viktumsky@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Кучеров Борис Алексеевич*, аспирант кафедры «Информационные технологии и управляющие системы», Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет», e-mail: boris.ku4erov@gmail.com, Россия, г. Королев.

*Литвиненко Руслан Сергеевич*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехнические комплексы и системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», e-mail: litrus@km.ru, Россия, г. Казань.

*Мельничук Ольга Васильевна*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: fet777@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Мухин Илья Андреевич*, канд. техн. наук, главный специалист отдела «Охрана окружающей среды и пожарно-промышленная безопасность», ООО «НИПИ НГ ПЕТОН», e-mail: goza-w@mail.ru, Россия г. Уфа.

*Нурисламова Лиана Фануровна*, ассистент кафедры «Математика и математическое моделирование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: nurislamova\_lf@mail.ru, Россия г. Уфа.

*Павлова Анна Сергеевна*, аспирант кафедры «Системы управления и контроля химических производств», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)», e-mail: annapavlova90@mail.ru, Россия, г. Москва.

*Панюков Дмитрий Иванович*, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Современное естествознание», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет сервиса», e-mail: DIP\_hom@gmail.com, Россия, Тольятти.

*Петунин Юрий Петрович*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение и Электротехника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тольяттинский государственный университет», e-mail: ale.bochkaryov@gmail.com, Тольятти, Россия.

*Саенко Алексей Геннадиевич*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и прикладная физика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: svshap@ufacom.ru, Россия, г. Уфа.

*Сафин Рашид Рафаилович*, доктор техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Математика и математическое моделирование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: safin\_rg@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Семина Ирина Александровна*, старший преподаватель кафедры «Электрическая техника», Федеральное

государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет», e-mail: semina\_ia@mail.ru, Россия, г. Омск.

*Уразаков Камил Рахматуллович*, доктор техн. наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: goza-w@mail.ru, Россия г. Уфа.

*Ураксеев Марат Абдуллоевич*, доктор техн. наук, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: uma1941@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Федин Андрей Владимирович*, аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: walther@inbox.ru, Россия, г. Уфа.

*Фетисов Владимир Станиславович*, доктор техн. наук, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: fet777@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Шатири Семен Вольфович*, доктор техн. наук, профессор кафедры «Технологические машины и прикладная физика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: svshap@ufacom.ru, Россия, г. Уфа.

*Янез Перш*, доктор техн. наук, профессор, «Лаборатория машинного видения», Университет Любляны, Словения, г. Любляна.

*Ясовеев Васих Хаматович*, доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: uma1941@mail.ru, Россия, г. Уфа.

## ABOUT THE AUTHORS

*Abyzbaev Ibrahim I.*, dr. sci. tech., professor chair of «Development and exploitation of oil and gas fields», », Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: iktugaes@mail.ru, Russia, Ufa.

*Andreeva Elena G.*, dr. sci. tech., professor chair of «Electrical Engineering», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Omsk state technical university», e-mail: semina\_ia@mail.ru, Russia, Omsk.

*Antipov Dmitriy V.*, dr. sci. tech., associate professor, head chair of «Commerce and production management», Federal state budgetary educational institution of higher education "Togliatti state university", e-mail: DmitryA@tltsu.ru, Russia, Togliatti.

*Antonovs Dmitrijs*, dr.sc.ing., Researcher, Power Engineering Institute, Riga Technical University, e-mail: dantonov@eef.rtu.lv, Latvia, Riga.

*Asst. prof. Dr. Janez Perš*, «Machine vision laboratory», University of Ljubljana, Slovenia, Ljubljana.

*Auhadeev Aver E.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Electrical facilities and systems», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Kazan state power engineering university», e-mail: litrus@km.ru, Russia, Kazan.

*Biela-Dalidovicha Edite*, Mg.sc.ing., PhD student., Power Engineering Institute, Riga Technical University, e-mail: eef@rtu.lv, Latvia, Riga.

*Bochkarev Alexey V.*, undergraduate chair of «Power supply and electrical», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Togliatti State University», e-mail: ale.bochkaryov@gmail.com, Russia, Togliatti.

*Borodin Oleg A.*, post-graduate student chair of «Power supply and electrical», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Togliatti State University», e-mail: ale.bochkaryov@gmail.com, Russia, Togliatti.

*Demin Aleksandr V.*, post-graduate student chair of «Electrical Engineering», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Omsk state technical university», e-mail: deminksander@gmail.com, Russia, Omsk.

*Dolgicers Aleksandrs*, dr. sc. ing., professor, Power Engineering Institute, Riga Technical University, e-mail:eef@rtu.lv, Latvia, Riga.

*Dolomatov Michail Yu.*, cand. sci. tech., dr. sci. chem, professor chair of «Technological machines and applied physics», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», head of the laboratory «Electronics and Nanotechnology», e-mail: dolomatov@gmail.com, Russia, Ufa.

*Fedin Andrey V.*, postgraduate student, Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: walther@inbox.ru, Russia, Ufa.

*Fetisov Vladimir S.*, dr. sci. tech., professor chair of «Information and measuring technics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: fet777@mail.ru, Russia, Ufa.

*Grakhov Pavel A.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Theoretical foundations of electrical engineering», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: walther@inbox.ru, Russia, Ufa.

*Gubaydullin Irek M.*, dr. tech. phys.-math., associate professor, senior researcher laboratory «Mathematical chemistry», Federal state budgetary institution of science «Institute of Petrochemistry and Catalysis» Russian academy of sciences, e-mail: irekmars@mail.ru, Russia, Ufa.

*Idiatullin Renat G.*, dr. sci. tech., professor chair of «Electrical facilities and systems», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Kazan state power engineering university», e-mail: litrus@km.ru, Russia, Kazan.

*Karabelskaya Irina V.*, post-graduate student, associate professor chair of «Informatics and ICT», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: iktugaes@mail.ru, Russia, Ufa.

*Kozadajevs Je.*, mg. sc. ing., Researcher, Power Engineering Institute, Riga Technical University, e-mail: eef@rtu.lv, Latvia, Riga.

*Kozlovskiy Vladimir N.*, dr. sci. tech., associate professor, head chair of «Theoretical and general electrical engineering», Federal state budgetary educational institution of higher education «Samara State Technical University», e-mail: Kozlovskiy-76@mail.ru, Russia, Samara.

*Krymsky Viktor G.*, dr. sci. tech., head chair of «Information and Control Systems», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: vikrymsky@mail.ru, Russia, Ufa.

*Kuchеров Boris A.*, post-graduate student chair of «Information technology and control systems», State budgetary educational institution of higher education Moscow region «Technological academy», e-mail: boris.ku4erov@gmail.com, Russia, Korolev.

*Litvinenko Ruslan S.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Electrical facilities and systems», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Kazan state power engineering university», e-mail: litrus@km.ru, Russia, Kazan.

*Melnichuk Olga V.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Theoretical foundations of electrical engineering», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: fet777@mail.ru, Russia, Ufa.

*Muhin Ilya A.*, cand. sci. tech., chief specialist of the «Protection of the environment and fire and industry safety» LLC SRDI OG «PETON», e-mail: roza-w@mail.ru, Russia, Ufa.

*Nurislamova Liana F.*, assistant chair of «Mathematics and mathematical modeling», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: nurislamova\_lf@mail.ru, Russia, Ufa.

*Panyukov Dmitry I.*, cand. sci. tech., head chair of «Modern science», Federal state budgetary educational institution of higher education "Volga region state university of service", e-mail: DIP\_hom@gmail.com, Russia, Togliatti.

*Pavlova Anna S.*, postgraduate student chair of «Management and control systems of chemical production», «Moscow state university of mechanical engineering (MAMI)», Moscow, e-mail: annapavlova90@mail.ru, Russia, Moscow.

*Petunin Yuri P.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Power supply and electrical», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Togliatti State University», e-mail: ale.bochkaryov@gmail.com, Russia, Togliatti

*Saenko Alexey G.*, cand. sci. tech., associate professor chair of « Technological machines and applied physics », Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: svshap@ufacom.ru, Russia, Ufa.

*Safin Rashit R.*, dr. sci. tech., associate professor, head chair of «Mathematics and mathematical modeling», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: safin\_rr@mail.ru, Russia, Ufa.

*Semina Irina A.*, senior lecturer chair of «Electrical Engineering», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Omsk state technical university», e-mail: semina\_ia@mail.ru, Russia, Omsk.

*Shapiro Semen V.*, dr. sci. tech., professor chair of « Technological machines and applied physics », Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: svshap@ufacom.ru, Russia, Ufa.

*Urakseev Marat A.*, dr. sci. tech., professor chair of «Information and measuring technics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: uma1941@mail.ru, Russia, Ufa.

*Urazakov Kamil R.*, dr. sci. tech., professor chair of «Technological machines and equipment», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state petroleum technological university», -mail: roza-w@mail.ru, Russia, Ufa.

*Vahitova Roza I.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Industrial power», state budgetary educational institution of higher education «Almetyevsk state oil institute», e-mail: roza-w@mail.ru, Russia, Almetyevsk.

*Yasoveev Vasikh Kh.*, dr. sci. tech., professor, head chair of «Information and measuring technics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state aviation technical university», e-mail: yasov@mail.ru, Russia, Ufa.

*Zakyrdaeva Tatyana A.*, post-graduate student, Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: k.tanya@bk.ru, Russia, Kumertau.

*Zhalbekov I.M.*, post-graduate student, chair of «Information and Control Systems», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: hths@mail.ru, Russia, Ufa.

## СПИСОК СТАТЕЙ, ИЗДАНЫХ В 2015 ГОДУ

### А

*Аинов Р.С., Акчуринов С.В., Пугачев В.В.* Математическая модель вибропривода с линейным асинхронным двигателем. №1, с. 58

*Андреева Е.Г., Семина И.А., Демин А.В.* Моделирование концентратора магнитного поля в комплексе программ ANSYS Maxwell. с. 12, №4

*Андреанова А.В., Мешков И.К., Султанов А.Х.* Генерация многоканального сверхширокополосного сигнала для RoF систем. №1, с. 84

*Ахметов И.В., Губайдуллин И.М., Коледина К.Ф., Сафин Р.Р.* Математическое моделирование и оптимизация реакций синтеза ароматических соединений. с. 53, №1

### Б

*Бакалов В.Г., Чередниченко П.И., Скрипник С.П., Бакалов О.В.* Математическое моделирование процесса формирования плоской пленки на приемно –охлаждающем валке. с. 43, №2

*Бочкарев А.В., Бородин О.А., Петунин Ю.П.* Линейный электродвигатель мехатронного токарного модуля. с. 51, №4

### Г

*Гвоздев В.Е., Ахуньянова К.Б.* Влияние расположения элемента в структурной схеме надежности на статистические оценки характеристик надежности аппаратно-программных комплексов. №3, с. 50

*Грахов П.А., Федин А.В., Ясовеев В.Х.* Характеристики устройств угловых перемещений на основе магнито-стрикционных пластин при действии предварительных упругих напряжений. с. 107, №4

### Д

*Дегтярев А.Р., Киселев С.К.* Смешанная реконфигурация в многопроцессорных комплексах интегрированной модульной авионики. №3, с. 5

*Денисова О.А.* Особенности распространения ультразвука в холестерических жидких кристаллах. №1, с. 109

*Долгицер А., Антонов А., Козадаев Е., Биела-Даулидовича Э.* Учебные пособия в лаборатории релейной защиты. с. 5, №4

*Доломатов М.Ю.* Феноменологическая модель суперфункционала энергетических состояний и его приложение в электронике и термодинамике. с. 125, №4

*Доломатов М.Ю., Ковалева Э.А.* Новый молекулярный дескриптор для прогноза электронных состояний молекулярных систем. с98, №2

*Доломатов М.Ю., Петров А.М., Рыжиков О.Л., Бахтизин Р.З.* Особенности фазовых переходов «диэлектрик-полупроводник» в многокомпонентных органических спиновых стеклах. №1, с. 117

*Доломатов М.Ю., Шуляковская Д.О., Карабельская И.В.* Интегральные характеристики спектров сложных молекулярных систем и их информационные свойства. №3, с. 113

### Ж

*Жалбеков И.М.* Комплексование информации для поддержки принятия решений по результатам контроля состава газовых смесей. №3, с. 66

*Жалбеков И.М., Перш Я., Крымский В.Г.* Принципы определения ориентации автономных мобильных объектов с использованием визуальной информации. с. 65, №4

### З

*Зикий А.Н., Зламан П.Н., Пленкин А.П., Фадеева А.С.* Стационарный передатчик помех современным средствам связи . №2, с. 48

*Зотов К.Н., Кузнецов И.В., Салов А.С., Симбирцева Д.С., Стрельникова Л.В.* Разработка алгоритмов кластерного анализа концентрации абонентских устройств в системах мобильной связи . №1, с. 90

### И

*Исмагилов Ф.Р., Саттаров Р.Р., Гайсин Б.М., Гумерова М.Б., Андроников Д.А.* Исследование характеристик автономных источников электроэнергии на основе фотоэлектрических модулей в условиях средних широт России . №1, с. 52

## К

*Канарейкин В.И., Вайсдаев К.В.* Устройства фазового сдвига для информационно-измерительных систем и машин. №2, с. 68

*Карабельская И.В.* Исследования электрических полей постоянного тока в системах со сложными геометрическими параметрами. №1, с. 45

*Карабельская И.В.* Примеры расчета электрических полей при электрохимической защите трубопроводов от коррозии. №2, с. 23

*Карабельская И.В., Абызбаев И.И.* Методы расчета электрических полей при электрохимической защите трубопроводов от коррозии в неоднородных и клиновидных средах. с. 25, №4

*Козлов В.А., Большанин Г.А., Козлова О.А.* Учет стрел провеса линейных проводов трехфазной линии электропередачи при ее согласовании с электрической нагрузкой. №3, с. 12

*Козловский В.Н., Антипов Д.В., Панюков Д.И.* Информационный комплекс и система определения ключевых проблем качества автомобилей. с. 93, №4

*Козловский В.Н., Дебелов В.В., Пьянов М.А.* Электротехнический и программный комплекс управления двигателем внутреннего сгорания легкового автомобиля. №1, с. 73

*Кондратьев А.А.* Скрытые проблемы распределенных вычислений. №3, с. 61

*Крымский В.Г., Ахмеджанов Ф.М., Имильбаев Р.Р., Юнусов А.Р.* Прогнозирование состояния газораспределительной сети на основе данных телеметрии для предупреждения аварийных ситуаций. №2, с. 37

*Кузнецов И.В., Смирнова Е.А., Филатов П.Е.* Об оценке точности группового кода с дифференциальной импульсно-кодовой модуляцией. №3, с. 74

*Кузьмин С.А.* Алгоритмы обработки видеоинформации в системе мониторинга транспортных потоков. №3, с. 90

*Кучеров Б.А.* Анализ проектных решений для автоматизированной системы распределения средств управления космическими аппаратами. с. 73, №4

*Кучеров Б.А.* Решение задач прогнозирования загрузки наземных средств управления космическими аппаратами. №2, с. 30

*Кушнир В.Г., Кошкин И.В., Гайфуллин Г.З.* Определение сечения линий электропередачи в электрических сетях напряжением до 1000 В методом аппроксимации данных. №1, с. 20

*Кушнир В.Г., Кошкин И.В., Нелетин В.С.* Выбор солнечных фотоэлементов для рационального электроснабжения циркуляционного насоса гелиосистемы горячего водоснабжения. №2, с. 9

## Л

*Леонов В.В., Денисова О.А.* Электродинамика сдвигового действия и реализация режима турбулентности в конденсированных средах. №2, с. 90

*Леонов В.В., Денисова О.А., Рагулин В.В.* Электродинамика коррозионного массопереноса в конденсированных средах. №3, с. 105

*Линенко А.В., Туктаров М.Ф., Камалов Т.И.* Принципы построения и расчет линейных асинхронных электроприводов сложного колебательного движения для технологических машин АПК. №3, с. 44

*Литвиненко Р.С., Идиятуллин Р.Г., Аухадеев А.Э.* Моделирование отказов электротехнического комплекса и его элементов на этапе разработки. с. 17, №4

*Лопатин В.П., Ишмухамедов И.К.* Современное элегазовое электрооборудование подстанций систем электроснабжения и особенности его эксплуатации. №1, с. 63

*Лысенко О.А.* Исследование динамических характеристик электропривода центробежного насоса с учетом зубцовых гармоник асинхронного двигателя. №3, с. 38

## М

*Михеев Г.М., Каландаров Х.У., Иванова Т.Г.* Диагностирование контактной системы регулятора напряжения под нагрузкой. №3, с. 18

*Морозов И.С.* Система определения возможности парковки автомобиля в заданном пространстве. №2, с. 79

*Мухаммадиев А.А.* Функциональная модель акустооптического преобразователя температуры. №2, с. 85

## Н

*Нурисламова Л.Ф., Губайдуллин И.М., Сафин Р.Р.* Применение метода анализа чувствительности для построения кинетической модели химической реакции. с. 87, №4

## О

*Огорелков Б.И., Татевосян А.С., Пимонова У.В., Поляков Д.А.* Экспериментальное исследование и математическое моделирование динамики электромагнита постоянного тока. №1, с. 5

## П

*Павлова А.С.* Состояние и перспективы развития САПР в России для технологических объектов, имеющих многосвязную структуру. с. 80, №4

## Р

*Рогинская Л.Э., Рахманова Ю.В., Воронин К.А.* Источник питания емкостного накопителя энергии. №3, с. 24

*Рогинская Л.Э., Шуляк А.А., Белкин А.К., Мухортова Е.И.* Выбор структуры тиристорно-индукторного комплекса с согласованными напряжениями инвертора и нагрузки. №2, с. 16

## С

*Серенков П.С.* Обеспечение эффективности внутрилабораторных исследований неопределенности результатов измерений. №2, с. 59

*Серенков П.С.* Процессный подход к совершенствованию системы измерений в испытательной лаборатории. №3, с. 82

*Сироткин С.Л., Коньков А.Н., Клименко В.В.* Нониусные преобразователи кода во временной интервал. №3, с. 97

*Славутский А.Л.* Моделирование переходных режимов узла нагрузки с синхронным двигателем в фазных координатах. №1, с. 38

## Т

*Тулупов В.Д., Ле Суан Хонг.* Сравнительная технико-экономическая эффективность вагонов метрополитена с альтернативными системами тягового электропривода. №3, с. 30

## У

*Уразаков К.Р., Мухин И.А., Вахитова Р.И.* Моделирование характеристик струйного насоса. с. 41, №4

*Ураксеев М.А., Закурдаева Т.А.* Принципы построения и конструирования электрооптических измерительных систем. с. 115, №4

*Ураксеев М.А., Левина Т.М., Шамаев Ф.Ф., Кулябин А.С.* Разработка волоконно-оптических систем для учета, мониторинга и прогнозирования работы высоковольтного оборудования в субд с web-интерфейсом. №1, с. 97

## Ф

*Федосов А.В., Гайнуллина Л.А.* Методы неразрушающего контроля. №2, с. 73

*Федосов В.А., Августиневич А.В.* Виброакустическая техника для измерения уровня вибрации на производстве. №1, с. 103

*Фетисов В.С., Мельничук О.В.* Моделирование электрических цепей интеллектуальной контактной матрицы. с. 34, №4

## Х

*Хакимьянов М.И., Сираев Р.М., Крылов А.О.* Исследование влияния на энергопотребление скважинных насосов технологических и эксплуатационных параметров. №1, с. 15

## Ш

*Шатино С.В., Саенко А.Г.* Анализ электрического поля озонатора с бегущим барьерным разрядом в цилиндрической системе координат. с. 58, №4

*Шатино С.В., Саенко А.Г.* Аналитический метод расчета высокочастотного озонатора с бегущим барьерным разрядом. №2, с. 5

**Я**

Яруллин Р.Б. О регулируемом электроприводе техники сервиса. №1, с. 24

**LIST OF ARTICLES PUBLISHED IN 2014****А**

Adiev T.I., Tlyavlin A.Z., Lyubopytov V.S. Mathematical model of pre-equalizer for ofdm signal. №2, p. 62

Araslanov T.R., Dolomatov M.Yu., Kalashchenko N.V. The features of phenomenological quantum parameters of human blood plasma in benign and malignant brain tumors. №1, p. 101

Artuschenko V.M., Korchagin V.A. The calculation and modeling the probability of occurrence of co-channel and intermodulation interference wireless devices with small radius actions. №1, p. 57

Artuschenko V.M., Kucherov B.A. Adaptation algorithms of satellite communication links by transmitter power on ground Aipov R.S., Akchurin S.V., Pugachev V.V. Mathematical model of vibratory drive with linear induction motor. №1, p. 58

Akhmetov I.V., Gubaydullin I.M., Koledina K.Ph., Safin R.R. Mathematical modeling and optimization fusion reactions aromatic compounds. №2, p. 53

Andreeva E.G., Semina I.A., Demin A.V. Modeling of the magnetic field concentrator in the program complex ANSYS Maxwell. №4, p. 12

Andrianova A.V., Meshkov I.K., Sultanov A.Kh. Multichannel ultra-wideband signal generation for RoF systems. №1, p. 84

**Б**

Bakalov V.G., Cherednichenko P.I., Skrypyk S.P., Bakalov O.V. Mathematical modeling of process of formation of a flat film on the reception cooling roll. №2, p. 43

Bochkarev A.V., Borodin O.A., Petunin Yu.P. Linear motor of mechatronic lathe module. №4, p. 5

**С**

Degtyarev A.R., Kiselev S.K. Mixed reconfiguration of integrated modular avionics multiprocessor coplexes. №3, p. 5

Denisova O.A. Features of ultrasound propagation in cholesteric liquid crystals. №1, p. 109

Dolgicers A., Antonovs D., Kozadajevs Je., Biela-Dailidovicha E. Training facilities in the relay protection laboratory. №4, p. 5

Dolomatov M.Yu. Phenomenological model of energy state superfunctional and its application for electronics and thermodynamics. №4, p. 125

Dolomatov M.Yu., Kovaleva E.A. New molecular descriptors for prediction of the energies states molecular systems. №2, p. 98

Dolomatov M.Yu., Petrov A.M., Ryjikov O.L., Bakhtizin R.Z. Features of the phase transition "insulator-semiconductor" in multicomponent organic spin glasses. №1, p. 117

Dolomatov M.Yu., Shulyakovskaya D.O., Karabelskaya I.V. Integral characteristics of the spectra of complex molecular systems and their information properties. №3, p. 113

**Ф**

Fedosov A.V., Gaynullina L.A. Methods of non-destructive testing. №2, p. 73

Fedosov V.A., Avgustinovich A.V. Vibro-acoustic technique for measuring the vibration level at the enterprises. №1, p. 103

Fetisov V. S., Melnichuk O. V. Electric circuit simulation for smart contact matrix. №4, p. 34

**Г**

Grakhov P.A., Fedin A.V., Yasoveev V.Kh. Characteristics of angular movement devices on the basis of magnetostriction plates in presence of elastic prestresses. №4, p. 107

Gvozdev V.E., Akhnyanova K.B. Element location in the reliability block diagram influence on the statistical

assessment of hardware-software complex reliability characteristics. №3, p. 50

**И**

Ismagilov F.R., Sattarov R.R., Gaisin B.M., Gumerova M.B., Andronikov D.A. Study of characteristics autonomous sources of electricity from photovoltaic modules under midlatitudes Russia. №1, p. 52

**К**

Kanareykin V.I., Vazhdaev K.V. Devices of phase shift for information measuring systems and machines. №2, p. 68

Karabelskaya I.V. Examples of calculation of electric fields at electrochemical protection of pipelines against corrosion. №2, p. 23

Karabelskaya I.V. Research the electric field of direct current systems with complex geometric parameters. №1, p. 45

Karabelskaya I.V., Abyzbaev I.I. Methods for calculating electric fields at electrochemical protection of pipelines against corrosion in inhomogeneous media and wedge. №4, p. 24

Khakimyanov M.I., Siraev R.M., Krylov A.O. Research of influence energy consumption for well pumps technological and operational parameters. №1, p. 15

Kondratev A.A. Hidden problems of distributed computing. №3, p. 61

Kozlov V.A., Bolshanin G.A., Kozlova O.A. The accounting of arrows of pro-weight of linear wires of the three-phase power line at its coordination with electric loading. №3, p. 12

Kozlovskiy V.N., Antipov D.V., Panyukov D.I. Information center and system for determining the quality car key issues. №4, p. 93

Kozlovskiy V.N., Debelov V.V., Pianov M.A. Electrical and software internal combustion engine control car. №1, p. 73

Krymskiy V.G., Akhmedzhanov F.M., Imilbaev R.R., Yunusov A.R. Prognostics of the state of gas distribution network on the basis of telemetry-provided data for preventing accidents. №2, p. 37

Kucherov B.A. Analysis of design solutions for automated system of allocation control facilities for spacecrafts. №4

Kucherov B.A. Solving tasks of load prediction of ground control facilities for spacecrafts. №2, p. 30

Kushnir V.G., Koshkin I.V., Gaifullin G.Z. Definitions cross sections power lines in electric networks with voltage up 1000 V method of approximating the data. №1, p. 20

Kushnir V.G., Koshkin I.V., Nelepin V.S. Choice of solar cells for power management of the circulation pump of the solar hot water supply system. №2, p. 9

Kuzmin S.A. Video processing algorithms in the system of traffic monitoring. №3, p. 90

Kuznetsov I.V., Smirnova E.A., Filatov P.E. About the assessment of accuracy of the group codec with differential pulse code modulation. №3, p. 74

**Л**

Leonov V.V., Denisova O.A. Electrodynamics shearing action mode of turbulence and sales in condensed matter. №2, p. 90

Leonov V.V., Denisova O.A., Ragulin V.V. Electrodynamics corrosion of mass transfer in condensed matter. №3, p. 105

Linenko A.V., Tuktarov M.F., Kamalov T.I. The principles of construction and calculation of the linear asynchronous electric drive of difficult oscillatory motion for technological machines in agro-industrial complex. №3, p. 44

Litvinenko R.S., Idiattullin R.G., Auhadeev A.Je. Modeling of electrical failures of the system and its elements at the design stage. №4, p. 17

Lopatin V.P., Ishmukhamedov J.K. Modern gas-insulated substations electric power systems and its operating features. №1, p. 63

Lysenko O.A. Research of dynamic characteristics of an electric drive of centrifugal pump with taking into account tooth harmonics of induction motor. №3, p. 38

**М**

Mikheev G.M., Qalandarov H.U., Ivanova T.G. Diagnostics of on-load tap changer contact system. №3, p. 18

*Morozov I.S.* System of definition of possibility of the parking of the car in the set space. №2, p. 79  
*Mukhamadiev A.A.* Functional model of the acousto-optical transducer of temperature. №2, p. 85  
*Nurislamova L.F., Gubaydullin I.M., Safin R.R.* Application of sensitivity analysis for construction of chemical reaction kinetic model. №4, p. 87

#### **О**

*Ogorelkov B.I., Tatevosyan A.S., Pimonova U.V., Polyakov D.A.* Experimental research and mathematical modelling of dynamics of the electromagnet of the direct current. №1, p. 5

#### **Р**

*Pavlova A.S.* State and development prospects for russia cad technological object having a multiply structure. №4, p. 80

#### **Р**

*Roginskaya L.E., Rakhmanova Yu.V., Voronin K.F.* Energy charge capacitor power supply. №3, p. 24  
*Roginskaya L.E., Shulyak A.A., Belkin A.K., Muhortova E.I.* Choice of structure thyristor-inductor complex with agreed voltage of inverter and load. №2, p. 16

#### **С**

*Serenkov P.S.* Process approach to improve measurement system in testing laboratories. №3, p. 82  
*Serenkov P.S.* The effectiveness ensuring of single laboratory research of measurement results uncertainty. №2, p. 59  
*Shapiro S.V., Saenko A.G.* Analytical method of calculation of highfrequency ozonator with hurrying barrier discharge. №2, p. 5

*Shapiro S.V., Saenko A.G.* Analysis of the electric field with a running ozonator barrier discharge in cylindrical coordinates. №4

*Sirotkin S.L., Konkov A.N., Klimenko V.V.* The vernier converters code in time interval. №3, p. 97

*Slavutski A.L.* Modeling transients in the load nodes containing the induction motors in phase coordinates. №1, p. 38

#### **Т**

*Tulupov V.D., Le Xuan Hong.* Comparative technical and economic efficiency of metro with alternative electric traction systems. №3, p. 30

#### **У**

*Urakseev M.A., Levina T.M., Shamaev F.F., Kuliabin A.S.* Development of fiber-optic systems for recording, monitoring and forecast of high-voltage equipment operation in DBMS with web-interface. №1, p. 97

*Urakseev M.A., Zakyrdaeva T.A.* Principles of measurement and construction electro systems. №4, p. 115

*Urazakov K.R., Muhin I.A., Vakhitova R.I.* Modeling the characteristics of jet pump. №4, p. 41

#### **У**

*Yarullin R.B.* About the regulated electric drive of technology of service. №1, p. 24  
*Zhalbekov I.M.* Data fusion for supporting decisions based on the results of control of gas mixture composition. №3, p. 66

#### **З**

*Zhalbekov I.M., Perš J., Krymsky V.G.* Principles of attitude estimation for autonomous vehicles based on visual data. №4, p. 65

*Zikiy A.N., Zlaman P.N., Pljonkin A.P., Fadeeva A.S.* Stationary noise jammer against modern communication facilities. №2, p. 48

*Zotov K.N., Kuznetsov I.V., Salov A.S., Simbirtseva D.S., Strelnikova L.V.* Development of algorithms for analyzing the concentration of a cluster of subscriber devices in mobile communication systems. №1, p. 90

## **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 (240 слов, определяющих теоретическую ценность и практическую новизну статьи), ключевые слова (не менее 10), список литературы обязателен (не менее 5 источников) на русском и английском языках.
9. Автор дает согласие на воспроизведение на безвозмездной основе в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВПО «УГУЭС» электронной версии своей статьи, опубликованной в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы».
10. Графический и табличный материал должен быть представлен в **черно-белом** варианте в приложении к WORD. Например, Microsoft Graph, без использования сканирования; для диаграмм применять различную штриховку, размер шрифта 10 или 11 pt, математические формулы оформляются через редактор формул Microsoft Equation, а их нумерация проставляется с правой стороны. Таблицы, диаграммы, рисунки подписываются 12 шрифтом в правом верхнем углу.
11. Сокращение слов, имен и названий, как правило, не допускается. Разрешаются лишь общепринятые сокращения мер физических, химических и математических величин и терминов и т. д.
12. Поступившие в редакцию статьи в обязательном порядке будут проходить рецензирование. Рецензии отклоненных работ высылаются авторам и содержат аргументированный отказ от публикации. В рецензиях работ, отправленных на доработку, указываются замечания к статье.
13. Все статьи, поступившие в редакцию, в обязательном порядке проходят проверку в системе «Антиплагиат».
14. С аспирантов плата за публикацию не взимается. При отправлении статьи на электронный адрес также необходимо отправить отсканированную справку из аспирантуры, заверенную отделом кадров.

#### **Памятка авторам**

В статье настоятельно рекомендуется:

- НЕ использовать табуляцию (клавиша Tab);
- НЕ устанавливать свои стили абзацев (кроме принятых по умолчанию);
- НЕ расставлять автоматические списки (при нумерации строк и абзацев);
- НЕ ставить двойные, тройные и т. д. пробелы между словами.

Рекомендуется применять в статье только один тип кавычек («»).

Помнить о том, что необходимо различать дефис и тире. Тире выставляется сочетанием двух клавиш («Ctrl» + «-»).

**Все цитаты в статье должны быть соотнесены со списком литературы, при прямом цитировании обязательно указывать номера страниц.** Список литературы не следует смешивать с примечаниями, которые должны располагаться перед списком литературы.

**Статьи, не соответствующие требованиям, отклоняются для доработки.**

## **Requirements for the materials, provided for publication in the journal:**

1. Articles provided by the authors in the Journal should match the profile of the magazine, are new, are interested in a wide range of scientific community.
2. Revision accepted for publication only open materials in Russian and English (for foreign authors).
3. Fields – 2.5 cm on each side; font – Times New Roman, font size – 14, line spacing – one and a half; References in square brackets. If there is a list of literature references is required (in order of citation in accordance with GOST 7.1-2003 or GOST R 7.05-2008).
4. In the upper right corner in bold italics: surname, name, patronymic of the author (certainly in full), academic degree, academic rank, position, name of organization (in full), country, city.
5. Centered, bold capital letters: title of the article. UDC – in the upper right corner.
6. At the end of the article, specify the e-mail address with ZIP code, name and initials of the recipient (the address will be sent to the magazine), telephone (mobile), e-mail the contact person. Article File Contents: Surname N.P.doc (or docx). Send to the address: uop-ugaes@mail.ru.
7. Be sure to send a color photo of the authors in a separate file (at least 1 MB and not more than 5 MB).
8. To the article must be accompanied by the Russian and English languages: the article title, abstract (240 words, determine the theoretical value and practical novelty of the article), keywords (at least 10), references required (at least 5 sources).
9. Author agrees to play free of charge on the Internet at the website FSEI HE «USUES» electronic version of his article published in the journal «Electrical and data processing facilities and systems».
10. Graphical and tabular material should be presented in the annex to the WORD. For example, Microsoft Graph, without scanning; diagrams for applying a different shading, font size 10 or 11 pt, mathematical formulas are made through the formula editor Microsoft Equation, and their numbers stamped on the right side. Table signed by the 12th print in the upper right corner, diagrams, drawings – at the bottom center.
11. Reductions of words of names usually are not permitted. Allowed only standard abbreviations measures, physical, chemical and mathematical quantities and terms, etc.
12. Received articles will necessarily be reviewed. Reviews of rejected papers are sent to the authors and contain a reasoned rejection of the publication. In reviews of works sent for revision, specify comments on the article.
13. All articles received by the editorial compulsorily tested in the «Anti-plagiarism».
14. Article volume with the summary and the list of references shouldn't exceed 12 pages.

### **Memo to authors**

The article is highly recommended:

- DO NOT use the tab key (Tab);
- DO NOT place your paragraph styles (other than the defaults);
- DO NOT set automatic lists (with line numbers and paragraphs);
- DO NOT put double, triple and so. D. The spaces between words.

Recommended in the article is only one type of quotes («») or (“”).

Remember that it is necessary to distinguish between hyphens and dashes. Dash exhibited a combination of two keys («Ctrl» + «-»).

All quotations in the article should be correlated with the list of literature, with direct quotations necessarily indicate page numbers. References should not be confused with the notes that must be placed before the bibliography.

**Articles that do not meet the requirements will be rejected for revision.**

