

Подписной индекс: 91824 в каталоге «Пресса России»

Группы научных специальностей, по которым ведется прием статей в научный журнал «Электротехнические и информационные комплексы и системы»:

05.09.00 Электротехника

05.11.00 Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

05.12.00 Радиотехника и связь

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление

05.27.00 Электроника



# Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 2, т. 14, 2018

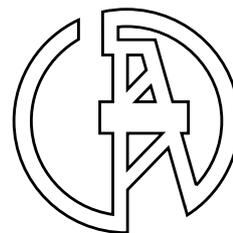


## Electrical and data processing facilities and systems

№ 2, т. 14, 2018



# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УГНТУ

№ 2, т. 14, 2018

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

## Учредитель

Федеральное бюджетное государственное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ)

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 серийный номер ISSN 1999-5458.

## Редакционная коллегия:

### Главный редактор:

С.В. Шапиро — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)

### Зам. главного редактора:

Ш.З. Валиев — канд. техн. наук, д-р экон. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)

### Члены редакционной коллегии:

В.М. Аргюшенко — д-р техн. наук, проф. ГБОУ ВО МО «Технологический университет» (г. Москва, Российская Федерация) 

Б.М. Горшков — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет сервиса» (г. Тольятти, Российская Федерация) 

М.Ю. Долوماتов — д-р хим. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация) 

В.Г. Крымский — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация) 

В.Г. Кушнир — д-р техн. наук, проф. Костанайского государственного университета им. Ахмета Байтурсынова (г. Костанай, Казахстан) 

С.В. Павлов — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация) 

Р.Р. Сафин — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация) 

Б. Брудник — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Тель-Авивского университета (г. Тель-Авив, Израиль) 

А.Ф. Романченко — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация) 

П.С. Серенков — д-р техн. наук, проф. Белорусского национального технического университета (г. Минск, Белоруссия) 

М.А. Ураксеев — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация) 

Н.А. Феоктистов — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Московский государственный университет дизайна и технологии» (г. Москва, Российская Федерация) 

Ф.Ф. Хизбуллин — д-р хим. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация) 

В.А. Шабанов — канд. техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация) 

Р.Б. Яруллин — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (г. Уфа, Российская Федерация) 

И. Зицмане — д-р техн. наук, профессор Рижского технического университета, эксперт научного совета Латвийской академии наук (г. Рига, Латвия) 

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

И.В. Пентегов — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины (г. Киев, Украина) 

Ответственный секретарь: А. А. Мухамадиев

Технический редактор: С. В. Халитова

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-67387 от 05.10.2016 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

© Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2018.

Адрес редакции и издательства: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

Тел.: (347) 243-16-19, [ies.rusoil.net](mailto:ies.rusoil.net)

Цена свободная. 12+

Подписано в печать 27.06.2018 г. Формат 60×84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 14.18.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 178.

Адрес типографии: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

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

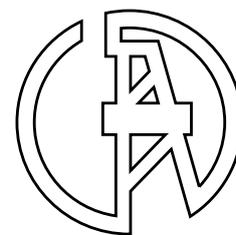
Материалы приводятся в авторской редакции.

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

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

# ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE PETROLEUM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY



USPTU

№ 2, v. 14, 2018

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

## Founder

Federal State-Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University» (USPTU)

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 Petroleum Technological University»  
(Ufa, Russian Federation)

### Members of an editorial board:

V.M. Artyushenko — Dr. Sci.Tech., Prof. of SBEI HE MR «University of Technology»  
(Moscow, Russian Federation)



B.M. Gorshkov — Dr. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Volga Region State University of Service»  
(Tolyatti, Russian Federation)



M.Yu. Dolomatov — Dr. Sci.Chem., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University»  
(Ufa, Russian Federation)



V.G. Krymsky — Dr. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University»  
(Ufa, Russian Federation)



V.G. Kushnir — Dr. Sci.Tech., Prof. of Kostanaysky State University of Ahmet Baytursynov  
(Kostanay, Kazakhstan)



S.V. Pavlov — Dr. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Aviation Technical University»  
(Ufa, Russian Federation)



R.R. Safin — D. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University»  
(Ufa, Russian Federation)



B. Brudnik — Dr. Sci.Tech., Leading Researcher of Tel Aviv University (Tel Aviv, Israel)



A.F. Romanchenko — Dr. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University»  
(Ufa, Russian Federation)



### Deputy editor-in-chief:

Sh.Z. Valiev — Cand. Sci.Tech., Dr. Sci. Econ., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)

P.S. Serenkov — Dr. Sci.Tech., Prof. of Byelorussian National Technical University»  
(Minsk, Byelorussia)



M.A. Urakseev — Dr. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Aviation Technical University»  
(Ufa, Russian Federation)



N.A. Feoktistov — Dr. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Moscow State University of Design and Technology»  
(Moscow, Russian Federation)



F.F. Hizbullin — Dr. Sci.Chem., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University»  
(Ufa, Russian Federation)



V.A. Shabanov — Cand. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University»  
(Ufa, Russian Federation)



R.B. Yarullin — Dr. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Bashkir State Agrarian University»  
(Ufa, Russian Federation)



I. Zicmane — Dr. Sci.Tech., Prof. of Riga Technical University, Expert the Latvian Council of Science  
(Riga, Latvia)



G.D. Georgiev — Dr. Sci.Tech., Lecturer Technical University (Varna, Bulgaria)



I.V. Pentegov — Dr. Sci.Tech., Prof., Leading Researcher the E.O.Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kiev, Ukraine)



Assistant editor: A. A. Mukhamadiev

Technical editor: S. V. Khalitova

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

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

Mass media registration certificate III № ФС 77-67387 dd. 05.10.2016 given by Federal service of supervision in the scope of communication, information technologies and mass media.

© Ufa State Petroleum Technological University, 2018.

Address of Editors office and Founder: 450062, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.

Tel. (347) 243-16-19, [ies.rusoil.net](mailto:ies.rusoil.net)

Price is free. 12+

Publishing authorized on 27.06.2018. Paper format 60×84/8. Offset printing. 14.18 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 178.

Address of Publishing Office: 450062, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced without prior written consent of the Editors office of the «Electrical and data processing facilities and systems».

The items of this publication preserve original edition by their authors.

The Editors office do not always share an opinion of authors of the articles published.

# СОДЕРЖАНИЕ

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

- Гизатуллин Ф.А., Хакимьянов М.И.* Разработка требований к интеллектуальным станциям управления для электроприводов скважинных насосов 5
- Конесев С.Г., Хазиева Р.Т.* Оценка стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей 13
- Иванова О.В., Халиков Р.М., Короткова Л.Н.* Результативное управление электротехническим оборудованием технологической схемы производства качественной воды 21
- Федосеева Е.А., Бурдыгина Е.В., Уразаева Д.Ф., Салихов А.Р.* Возможность использования солнечной энергии в нефтегазовой отрасли 28

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

- Мустафаев В.А., Салманова М.Н.* Модель функционирования производственной системы механообработки в виде раскрашенных временных сетей Петри 37
- Бондарев А.В.* Формирование субъективных и объективных критериев оценки и определение функции пригодности при генетическом моделировании сложных систем (на примере системы MicroGrid) 46
- Муфтыев В.Г., Зиятдинов Р.А., Зелев А.П., Набиев Р.И., Марданов А.Р., Ахметшин Р.И., Талыпов М.А.* Программа FairCurveModeler моделирования кривых и поверхностей класса «F» и разработка на ее основе прикладных САПР 53
- Татаринев А.И.* Структурная идентификация системы дистанционного управления мобильными измерительными пунктами 64
- Янтилина Л.З., Виноградова И.Л., Султанов А.Х.* Математическая модель распространения chirпированного оптического сигнала в RoF 71

## МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Артюшенко В.М., Воловач В.И.* Модели плотности распределения вероятности и статистические характеристики сигнала, отраженного от протяженного объекта 79
- Artyushenko V.M., Volovach V.I.* Models of probability density and statistical characteristics of the signal reflected from an extended object 79
- Сироткин С.Л., Коньков А.Н.* Непрерывное преобразование в код произведения двух частот и разности фаз между ними 89

## НАНОЭЛЕКТРОНИКА И КВАНТОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Денисова О.А.* Механизм ориентационной поляризации при флексоэлектрическом эффекте в жидких кристаллах 95
- Шарипов Т.И., Акбутин Г.Д., Долматов М.Ю., Бахтизин Р.З.* Особенности надмолекулярной структуры асфальтенов, выделенных из остатков термкрекинга 106
- Об авторах** 113

# CONTENT

## ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

- Gizatullin F.A., Khakimyanov M.I.* Development of requirements to the smart control stations for electric drives of well pumps 5
- Konesev S.G., Khazieva R.T.* Assessment of inductive-capacitive converters stabilization properties 13
- Ivanova O.V., Khalikov R.M., Korotkova L.N.* The efficient management of electrotechnical equipment for the qualitative water production technological scheme 21
- Fedoseeva E.A., Burdygina E.V., Urazaeva D.F., Salikhov A.R.* Possibility of use of solar energy in the oil and gas industry 28

## DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

- Mustafaev V.A., Salmanova M.N.* Model of functioning of production system of mechanical processing in the form of colored timed Petri nets 37
- Bondarev A.V.* Formation of subjective and objective criteria of evaluation and determination of suitability function in genetic modeling of complex systems (on the example of MicroGrid system) 46
- Mufteev V.G., Ziatdinov R.A., Zelev A.P., Nabiev R.I., Mardanov A.R., Akhmetshin R.I., Talyпов M.A.* The program FairCurveModeler modeling of curves and surfaces class «F» and the development on its basis of application of CAD 53
- Tatarinov A.I.* Structural identification of remote control systems of mobile measuring points 64
- Yantilina L.Z., Vinogradova I.L., Sultanov A.Kh.* Mathematical model of distribution of the chirped optical signal in RoF systems 71

## METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES

- Artyushenko V.M., Volovach V.I.* Models of probability density and statistical characteristics of the signal reflected from an extended object 79
- Sirotkin S.L., Konkov A.N.* Continuous transformation in the works of the two frequencies and the phase difference between them 89

## NANOELECTRONICS AND QUANTUM DATA SYSTEMS

- Denisova O.A.* The orientation polarization mechanism for flexoelectric effects in liquid crystals 95
- Sharipov T.I., Akbutin G.D., Dolomatov M.Yu., Bakhtizin R.Z.* Features of the supramolecular structures of asphaltenes isolated from thermal cracking residues 106
- About the authors** 113



**Гизатуллин Ф. А.**  
**Gizatullin F. A.**

*доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры  
«Электромеханика»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный авиационный  
технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*



**Хакимьянов М. И.**  
**Khakimyanov M. I.**

*кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Электротехника  
и электрооборудование предприятий»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический  
университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 622.276.53:621.316.7

## **РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ СТАНЦИЯМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СКВАЖИННЫХ НАСОСОВ<sup>1</sup>**

Использование установок погружных электроцентробежных насосов является основным способом механизированной добычи нефти в нашей стране. Погружные насосные агрегаты работают в чрезвычайно тяжелых условиях, таких как воздействие высоких давлений, температур и агрессивных сред. Поэтому к элементам установок погружных электроцентробежных насосов предъявляются повышенные требования по надежности, способности выдерживать перегрузки, длительности межремонтного периода. К настоящему времени повышение надежности показателей погружных насосных установок возможно главным образом за счет оптимизации режимов работы оборудования, которые позволят снизить износ элементов и предотвратить эксплуатацию при перегрузках. Обеспечить такие режимы возможно с помощью внедрения интеллектуальных станций управления, обеспечивающих частотное регулирование электроприводов насосов на основе анализа данных измерений технологических параметров. Отечественной и зарубежной промышленностью выпускается целый ряд станций управления с частотно-регулируемым приводом. При этом их схемное исполнение практически одинаково, различия заключаются во встроенных алгоритмах обработки информации и управления. В статье авторы приводят перечень технологических и электрических защит, которые должны быть реализованы в станции управления, а также анализируют их функциональные возможности. Станции управления должны обеспечивать выполнение следующих групп функций: управления электроприводом, записи в память значений технологических параметров, телекоммуникационного обмена. Скважинный контроллер должен обеспечивать просмотр информации в текстовом и графическом видах непосредственно в полевых условиях. Все наиболее распространенные станции управления выполнены низковольтными, что предполагает двухступенчатую трансформацию напряжения. В связи с этим одним из возможных путей повышения энергоэффективности электроприводов погружных электроцентробежных насосов является разработка и применение станций управления на основе высоковольтных преобразователей частоты, что сократит число трансформаторов и повысит общий КПД установки.

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках проекта 8.1277.2017/ПЧ «Исследования, разработка и внедрение перспективных электромеханических преобразователей для автономных объектов с гибридной силовой установкой».

**Ключевые слова:** нефтяная скважина, погружной электроцентробежный насос, электропривод, погружной электродвигатель, станция управления, преобразователь частоты, энергетическая эффективность, технологические защиты, электрические защиты, скважинный контроллер.

## DEVELOPMENT OF REQUIREMENTS TO THE SMART CONTROL STATIONS FOR ELECTRIC DRIVES OF WELL PUMPS

The use of electric submersible pumps is the main method of mechanized oil production in our country. Submersible pump units operate under extremely difficult conditions, such as high pressures, temperatures and corrosive environments. Therefore, the elements of submersible electric centrifugal pump units are subject to increased requirements for reliability, ability to withstand overload, and the duration of the overhaul period. To date, the increase in reliability of submersible pumping units is possible mainly by optimizing the operating modes of the equipment, which will reduce wear of the elements and prevent operation during overloads. To provide such modes is possible by means of introduction of smart control stations providing frequency regulation of electric drives of pumps on the basis of analysis of measurement data of technological parameters. The domestic and foreign industry produces a number of control stations with a frequency-controlled drive. In this case, their circuit design is almost identical, the differences are in the built-in algorithms for information processing and control. In the article the authors give a list of technological and electrical protections that should be implemented in the control station, and also analyze their functional capabilities. The control stations must provide the following groups of functions: control of the electric drive, writing in the memory of the values of technological parameters, telecommunication exchange. The well controller must ensure that information is viewed in text and graphics directly in the field. All the most common control stations are made low-voltage, which implies a two-step voltage transformation. In this regard, one of the possible ways to improve the energy efficiency of electric submersible pumps is the development and use of control stations based on high-voltage frequency converters, which will reduce the number of transformers and increase the overall efficiency of the pump unit.

**Key words:** oil well, electric submersible pump, electric drive, submersible motor, control station, variable frequency drive, energy efficiency, technological protection, electrical protection, well controller.

### *Введение*

Погружные насосные агрегаты для механизированной скважинной добычи нефти являются ответственными устройствами, работающими в чрезвычайно тяжелых условиях, таких как воздействие высоких давлений, температур и агрессивных сред [1]. Поэтому к элементам установок погружных электроцентробежных насосов (ПЭЦН) предъявляются повышенные требования по надежности, способности выдерживать перегрузки, длительности межремонтного периода [2].

К настоящему времени установки ПЭЦН фактически достигли максимальных надежных показателей, обусловленных конструктивными решениями и используемыми материалами [3]. Их дальнейшее повышение возможно только за счет оптимизации режимов работы оборудования, которые позволят снизить износ элементов ПЭЦН,

предотвратить эксплуатацию при перегрузках. Для обеспечения таких режимов эксплуатации необходима разработка и внедрение интеллектуальных станций управления (СУ), обеспечивающих частотное регулирование электроприводов ПЭЦН на основе анализа данных измерений технологических параметров [4].

### *1 Современные станции управления электроприводами ПЭЦН*

Разработкой и производством СУ для ПЭЦН занимается целый ряд отечественных и зарубежных предприятий, таких как ЗАО «Электон» (г. Радужный), АО «ИРЗ» (г. Ижевск), ООО «Геофизмаш» (г. Саратов), ГК «Триол» (г. Москва), ЗАО «НЭК» (п. Полазна), ГК «Новомет» (г. Пермь), НПО «Мир» (г. Омск), компания Schlumberger (США), фирма REDA (США) и многие другие [5, 6].

Технические параметры наиболее распространенных СУ с частотно-регулируемым приводом приведены в таблице 1.

Из анализа таблицы 1 видно, что СУ допускают подключение погружных электродвигателей (ПЭД) мощностью от 5 до 360 кВт, обеспечивают регулирование выходной частоты до 80–200 Гц. В некоторых СУ разработчики используют готовые преобразователи частоты (ПЧ) таких фирм, как Toshiba, Danfoss, в других устанавливают ПЧ собственного производства. В последнем случае появляется возможность управлять непо-

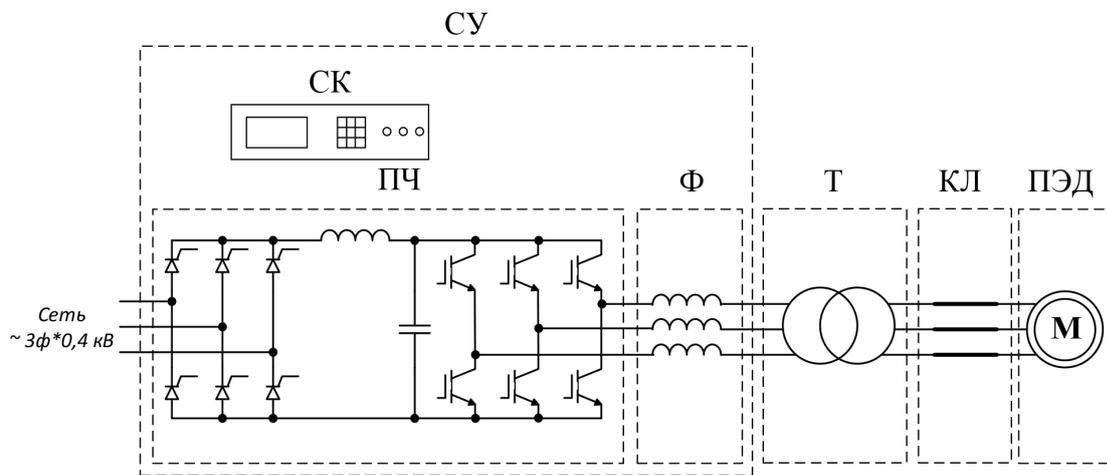
средственно коммутацией полупроводниковых ключей, задавать необходимый закон регулирования U/F, а также контролировать состояние всех элементов силовой цепи.

Частота ШИМ коммутации полупроводниковых ключей в ПЧ составляет от 1,5 до 5,0 кГц, при этом обеспечивается коэффициент искажений по току и напряжению не более 5%. Большинство СУ имеют КПД на уровне 95%, отдельные (например Новомет-03) — 98%.

Типовая схема регулируемого электропривода ПЭЦН приведена на рисунке 1.

Таблица 1. Технические параметры СУ ПЭЦН

Характеристики	НЭК-03М	ЭЛЕКТОН-05	ИР3-500	Новомет-03	SpeedStar Titan II	АЛСУ-АЧ
Тип контроллера	Мини-БЭУС 3	Электон-10.1	Сириус-3	Новомет	Instruct	КСУ-ГИ
Диапазон регулирования выходной частоты, Гц	1,0...80,0 (±0,01%)	3,5...80,0 (±0,1%)	3,5...70,0	0...200,0	20,0...75,0 (±0,01)	0...200,0
Частота ШИМ в ПЧ, кГц	1,5...4,0	2,0...5,0	2,0...5,0	3,5	3,0	2,4...4,5
КПД не менее, %	95	95	95	98	98	95
Коэффициент искажений по току и напряжению, %	5	5	5	3...5	5	5
Номинальное напряжение, В	380	380	380	380	380	380
	(-30...+30%)	(-15...+15%)	(-50...+37%)	(-25...+25%)	(-25...+25%)	(-30...+25%)
Номинальный ток нагрузки силовой цепи, А	630, 800, 1000, 1200	32, 75, 100, 160, 250, 400, 630, 800, 1000, 1200, 1600	63, 250, 400, 630, 800, 1000, 1200	160, 250, 400, 630, 800	250, 400, 630, 800	63, 250, 400, 630
Мощность подключаемого ПЭД, кВт	160, 250, 290, 360	10...630	5...320	64...320	100, 160, 250, 320	25...250
Степень защиты от воздействия окружающей среды	IP43	IP43	IP43 (IP54)	IP43	IP54	IP43
Диапазон рабочих температур, °С	-60...+50	-60...+40	-60...+50	-60...+50	-60...+50	-60...+50
Масса, кг	700...1050	170...1725	420...880	540...750	510...570	450...650



ПЧ — преобразователь частоты; Ф — фильтр; СК — скважинный контроллер; СУ — станция управления; Т — повышающий трансформатор; КЛ — кабельная линия; ПЭД — погружной электродвигатель

Рисунок 1. Типовая схема регулируемого электропривода ПЭЦН

В шкафу СУ размещаются преобразователь частоты ПЧ и фильтр Ф. После ставится повышающий трансформатор Т, который повышает напряжение 0,4 кВ до номинального напряжения электродвигателя ПЭД с учетом падения напряжения в кабельной линии КЛ, длина которой может достигать 3 км и более. Управление электроприводом осуществляет скважинный контроллер СК [7].

Оценить степень распространенности конкретных типов СУ на нефтепромыслах России, СНГ и в мире достаточно проблематично, так как нефтяные компании считают такую информацию конфиденциальной.

### 2 Защиты, реализуемые в современных СУ

Современная интеллектуальная СУ электроприводом ПЭЦН должна гарантировать долгосрочную безаварийную работу элементов насосной установки, для чего необходимо обеспечивать целый ряд технологических и электрических защит [8, 9].

Все перечисленные защиты могут быть разделены на технологические и электрические (рисунок 2). К технологическим можно отнести защиты от турбинного вращения, снижения давления на приеме насоса, повышения температуры и вибрации ПЭД, к электрическим — защиты от перегрузки и недогрузки по току и активной мощности,

дисбаланса токов, максимальную токовую защиту, повышенного и пониженного напряжений, дисбаланса напряжений и другие. Следует отметить, что электрические защиты реализуются значительно проще технологических, так как все необходимые датчики размещаются внутри СУ. Для технологических защит требуется установка дополнительных датчиков как на устье, так и на забое скважины.

### 3 Функциональные возможности СУ

Функциональные возможности СУ по управлению электроприводом ПЭЦН главным образом определяются программно-математическим обеспечением и алгоритмами, заложенными в скважинный контроллер. Станция управления должна обеспечивать длительную безаварийную работу нефтедобывающего оборудования, эксплуатация должна производиться в «щадящем» режиме с минимальным износом ПЭД и насоса [10]. Также в настоящее время большое внимание уделяется энергоэффективности работы электроприводов [11, 12].

Можно выделить следующие основные функции СУ [13]:

— регулирование скорости вращения ПЭД;



Рисунок 2. Схема защит ПЭЦН

- самозапуск после устранения причины останова;
- плавный разгон ПЭД с заданным темпом;
- реверсирование направления вращения электродвигателя;
- обеспечение автоматического вывода скважины на режим;
- плавное торможение ПЭД по предельному значению напряжения в звене постоянного тока;
- автоматическое поддержание значения заданного технологического параметра (давления, температуры, уровня и других);
- компенсация колебаний скольжения при работе ПЭД на механизм с большими моментами инерции;
- подключение к системам телемеханики для дистанционного и оперативного управления;
- работа с ослаблением поля при скоростях вращения выше номинальной;
- возможность регулирования характеристики  $U/F$ ;
- запись в энергонезависимую память контроллера параметров работы станции (напряжения, ток, выходная частота и других) и возможность их оперативного просмотра непосредственно на дисплее контроллера;
- регистрация времени отключения и подачи питающего напряжения;
- регистрация изменения уставок с отображением в журнале событий;
- отображение в журнале событий причины, запрещающей включение станции;
- запись в память с регулируемым периодом значений питающего напряжения, если оно не позволяет производить включение станции;
- отображение на дисплее контроллера наименования защиты, по которой произошло отключение;

- автоматическое изменение частоты питающего напряжения ПЭД до заданного значения за заданный период времени;
- обеспечение режимов расклинивания установок ПЭЦН (с толчками в одном и двух направлениях);
- задание пароля для исключения несанкционированного доступа к программированию СУ.

Функции СУ могут быть разделены на следующие:

- функции управления электроприводом ПЭЦН;
- запись в память значений технологических параметров, ведение журналов и архивация данных;
- телекоммуникационные (передача любых запрашиваемых данных по радиоканалу либо сотовой сети, получение дистанционных команд с диспетчерского пункта).

Функциональные возможности СУ проиллюстрированы схемой, показанной на рисунке 3.

Кроме перечисленных, в настоящее время становятся востребованными функции эксплуатации скважины с минимальными удельными затратами электроэнергии на подъем жидкости [14].

С точки зрения автоматизации современная СУ должна быть способна обеспечивать полностью автономную эксплуатацию скважины в течение длительного времени. При наличии телеметрических каналов связи должны быть реализованы функции дистанционного управления электроприводом с диспетчерского пункта и передача на сервер любой запрашиваемой информации.

Нужно отметить, что возможности и привлекательность для потребителей современных СУ определяются не столько аппаратной частью, сколько алгоритмами и программно-математическим обеспечением.



Рисунок 3. Функциональные возможности СУ

#### 4 Измерение трендов технологических параметров

Скважинный контроллер СУ должен непрерывно измерять и сохранять в памяти целый ряд параметров: токи и напряжения по фазам; активную, реактивную и полную мощности; коэффициент мощности; давле-

ние и температуру в различных местах скважины; температуру и вибрацию в ПЭД и другие [15, 16].

На рисунке 4 приведен пример измерений трендов тока, активной и реактивной мощностей, потребляемых ПЭД.

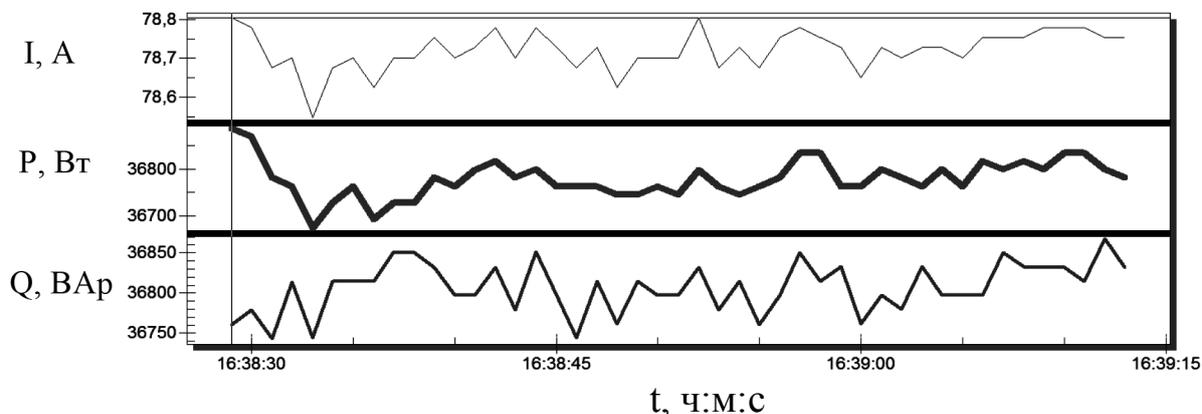


Рисунок 4. Тренды тока, активной и реактивной мощностей ПЭД

Данная информация должна сохраняться в энергонезависимой памяти и по запросу передаваться на диспетчерский пункт. Также должна быть предусмотрена возможность просмотра этой информации непосредственно на дисплее скважинного контроллера. Для этого скважинный контроллер СУ должен быть оснащен графическим дисплеем, способным работать в зимних условиях.

#### Выводы

Таким образом, на основании проведенного анализа могут быть сделаны следующие выводы.

1. Все наиболее распространенные СУ ПЭЦН выполнены с номинальным напряжением 380 В, то есть являются низковольтными, что предполагает наличие понижающего трансформатора 6(10)/0,4 кВ на подстанции. В связи с этим одним из возможных путей повышения энергоэффективности электроприводов ПЭЦН является разработка и применение высоковольтных ПЧ в составе систем управления, что сократит число трансформаторов и повысит общий КПД установки.

2. В СУ ПЭЦН реализуется ряд технологических и электрических защит. Электрические защиты реализуются значительно

проще, так как все необходимые для них датчики размещаются внутри СУ (датчики токов, напряжений, мощностей). Для работы технологических защит требуется целый ряд дополнительных датчиков, устанавливаемых на устье и забое скважины. В случае применения в высоковольтных ПЧ необходимо оценить возможности использования существующих датчиков и осуществить расчет и выбор их параметров в соответствии с требуемыми энергетическими характеристиками СУ.

3. Функциональные возможности современной СУ должны обеспечивать интеллектуальное управление электроприводом, сохранение параметров в энергонезависимой памяти, передачу данных и прием команд с диспетчерского пункта.

4. Скважинный контроллер СУ должен непрерывно измерять и сохранять в памяти целый ряд параметров: токи и напряжения по фазам; активную, реактивную и полную мощности; коэффициент мощности; давление и температуру в различных местах скважины; температуру и вибрацию в ПЭД и другие. Дисплей скважинного контроллера должен позволять просматривать результаты замеров технологических параметров в графическом и текстовом форматах непосредственно в полевых условиях.

## Список литературы

1. Конесев С.Г., Хакимьянов М.И., Хлюпин П.А., Кондратьев Э.Ю. Современные технологии добычи высоковязких нефтей // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 301–307.
2. Sawaryn S.J. e.a. The Analysis and Prediction of Electric-Submersible-Pump Failures in the Milne Point Field, Alaska // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers. 1999.
3. Del Pino J.J. e.a. Implementation of Torque and Drag Analysis to Simulate Forces While Running in Hole Electric Submersible Pump-ESP Assemblies, to Reduce Power Cable Mechanical Damages // SPE Electric Submersible Pump Symposium, Society of Petroleum Engineers. 2017.
4. Гизатуллин Ф.А., Хакимьянов М.И. Анализ режимов работы электроприводов штанговых скважинных насосных установок // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. Т. 13. № 1. С. 11–18.
5. Худяков Д.Л., Маркелов Д.В. Интеллектуальные станции управления УЭЦН // Нефтегазовая вертикаль. 2011. № 11. С. 64–68.
6. Nieto A. e.a. Electrical Cost Optimization for Electric Submersible Pumps: Systematic Integration of Current Conditions and Future Expectations // SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, Society of Petroleum Engineers. 2017.
7. Федотов А.В., Хомченко В.Г., Жильцов В.В., Компанейц А.Н., Скабкин Н.Г. Моделирование привода погружного насоса интеллектуальной скважины. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. 175 с.
8. Rabbi S.F., Rahman M.A. Equivalent Circuit Modeling of a Hysteresis Interior Permanent Magnet Motor for Electric Submersible Pumps // IEEE Transactions on Magnetics. 2016. Vol. 52. № 7. P. 1–4.
9. Тяпов О.А., Гарифуллин А.Р., Басов С.Г., Ханжин В.Г. Современные системы управления погружными электронасосами при периодических режимах эксплуатации скважин // Нефтяное хозяйство. 2007. Т. 25. № 3. С. 12–14.
10. Хакимьянов М.И., Хусаинов Ф.Ф., Шафиков И.Н. Проблемы повышения энер-

гетических характеристик электроприводов скважинных штанговых насосов // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 2 (35). С. 35–40.

11. Гизатуллин Ф.А., Хакимьянов М.И. Анализ энергоэффективности электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия // Вестник УГАТУ. 2017. Т. 21. № 3 (77). С. 54–59.

12. Кабалык Ю.С. Повышение энергоэффективности 3-фазного автономного инвертора напряжения // Электро. Электротехника, электро-энергетика, электротехническая промышленность. 2015. № 1. С. 32–35.

13. Schmehl C. e.a. Adjustable Speed Drive Selection for Electric Submersible pumps // Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC). 2014. P. 201–216.

14. Хакимьянов М.И. Повышение энергетической эффективности скважинных насосов механизированной добычи нефти // Энергетик. 2016. № 5. С. 36–38.

15. Коровин Я.С. Система поддержки принятия решений по контролю состояния установок электроцентробежных насосов на основе нейронной сети // Нефтяное хозяйство. 2007. № 1. С. 80–83.

16. Binder B.J.T. e.a. Embedded Model Predictive Control for an Electric Submersible Pump on a Programmable Logic Controller // Conference on Control Applications (CCA). 2014. P. 579–585.

## References

1. Konesev S.G., Khakim'yanov M.I., Khlyupin P.A., Kondrat'ev E.Yu. Modern Technologies of Extraction of High-Viscosity Oils. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2013, No. 21, pp. 301–307. [in Russian].
2. Sawaryn S.J. e.a. The Analysis and Prediction of Electric-Submersible-Pump Failures in the Milne Point Field, Alaska. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers. 1999.
3. Del Pino J.J. e.a. Implementation of Torque and Drag Analysis to Simulate Forces While Running in Hole Electric Submersible Pump-ESP Assemblies, to Reduce Power Cable Mechanical Damages. *SPE Electric Submersible Pump Symposium*, Society of Petroleum Engineers. 2017.

4. Gizatullin F.A., Khakim'yanov M.I. Operating Mode Analysis of the Oilwells Sucker Rod Pump Units Drives. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2017, Vol. 13, No. 1, pp. 11–18. [in Russian].
5. Khudyakov D.L., Markelov D.V. Intellectual Control Stations for ESP. *Oil and Gas Vertical*, 2011, No. 11, pp. 64–68. [in Russian].
6. Nieto A. e.a. Electrical Cost Optimization for Electric Submersible Pumps: Systematic Integration of Current Conditions and Future Expectations. *SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, Society of Petroleum Engineers*. 2017.
7. Fedotov A.V., Khomchenko V.G., Zhil'tsov V.V., Kompaneits A.N., Skabkin N.G. *Modeling the Drive of the Submersible Pump of an Intelligent Well*. Omsk, Izd-vo OmGTU, 2012. 175 p. [in Russian].
8. Rabbi S.F., Rahman M.A. Equivalent Circuit Modeling of a Hysteresis Interior Permanent Magnet Motor for Electric Submersible Pumps. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, Vol. 52, No. 7, pp. 1–4.
9. Tyapov O.A., Garifullin A.R., Basov S.G., Khanzhin V.G. Modern Control Systems for Electric Submersible Pumps in Periodic Exploitation. *Oil Industry*, 2007, Vol. 25, No. 3, pp. 12–14. [in Russian].
10. Khakim'yanov M.I., Khusainov F.F., Shafikov I.N. Problems of Improving the Energy Characteristics of Downhole Sucker Rod Pump Electric Drives. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2017, No. 2 (35), pp. 35–40. [in Russian].
11. Gizatullin F.A., Khakim'yanov M.I. Analysis of Energy Efficiency of The Electrical Complex of the Oil and Gas Producing Enterprise. *Vestnik USATU*, 2017, Vol. 21, No. 3 (77), pp. 54–59. [in Russian].
12. Kabalyk Yu.S. Increase of Energy Efficiency of a 3-Phase Autonomous Voltage Inverter. *Elektro. Electrical Engineering, Electric Power Industry, Electrotechnical Industry*, 2015, No. 1, pp. 32–35. [in Russian].
13. Schmehl C. e.a. Adjustable Speed Drive Selection for Electric Submersible Pumps. *Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)*. 2014, pp. 201–216.
14. Khakim'yanov M.I. Increase of Energy Efficiency of Downhole Pumps of Mechanized Oil Recovery. *Energetik*, 2016, No. 5, pp. 36–38. [in Russian].
15. Korovin Ya.S. Decision Support System for Monitoring the State of Installations of Electric Centrifugal Pumps Based on the Neural Network. *Oil Industry*, 2007, No. 1, pp. 80–83. [in Russian].
16. Binder B.J.T. e.a. Embedded Model Predictive Control for an Electric Submersible Pump on a Programmable Logic Controller. *Conference on Control Applications (CCA)*. 2014, pp. 579–585.



**Конесев С. Г.**  
**Konesev S. G.**

*кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Электротехника  
и электрооборудование предприятий»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*



**Хазиева Р. Т.**  
**Khazieva R. T.**

*аспирант кафедры «Электротехника  
и электрооборудование предприятий»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 621.3, 621.365

## ОЦЕНКА СТАБИЛИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Для систем стабилизации тока важным является обеспечение требуемого значения коэффициента стабилизации тока нагрузки при изменении значения сопротивления и характера нагрузки. Наиболее оптимальным с этой точки зрения являются схемотехнические решения, содержащие индуктивно-емкостные преобразователи (ИЕП). Стабильность тока нагрузки ИЕП при отклонении частоты питающей сети зависит не только от схемы подключения источника питания, но и от вариантов соединения реактивных элементов, образующих структуру ИЕП, следовательно, актуальной задачей является исследование стабилизационных свойств ИЕП при отклонениях частоты от резонансной.

Основными недостатками ИЕП являются большая масса и крупные габариты, которые устраняются за счет повышения частоты преобразования и гибридного исполнения электромагнитных элементов, выполняющих функцию ИЕП. Эффективным способом улучшения массогабаритных показателей ИЕП является использование многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов (МИЭК).

В данной статье авторами проведено исследование частотных и энергетических характеристик ИЕП на основе двухсекционной структуры МИЭК, которое показывает, что для рассматриваемого схемотехнического решения МИЭК требуемое условие работы в качестве ИЕП соблюдается в диапазоне изменения частоты от  $0,50 \cdot f_{рез.}$  до  $1,15 \cdot f_{рез.}$

Разработана математическая модель ИЕП на основе МИЭК для определения диапазона изменения сопротивления нагрузки и частоты, при котором осуществляется стабилизация тока нагрузки с заданной точностью. Показано, что в диапазоне изменения сопротивления нагрузки от  $0,1 \cdot \rho$  до  $100 \cdot \rho$  коэффициент отклонения действующего значения тока нагрузки  $k$  равен 0,403. По результатам моделирования установлено, что для рассматриваемой схемы ИЕП на основе двухсекционного МИЭК коэффициент стабилизации тока нагрузки находится в пределах от 0,20 до 0,25 в диапазоне изменения частоты от  $0,7 \cdot f_{рез.}$  до  $1,1 \cdot f_{рез.}$

Проведено экспериментальное подтверждение адекватности разработанных моделей. Для стабилизации тока нагрузки в пределах  $\pm 15\%$  изменения частоты расхождение результатов эксперимента и моделирования не превышает 15%.

**Ключевые слова:** стабилизация тока, индуктивно-емкостный преобразователь, гибридный электромагнитный элемент, многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент, источник тока, параметрический стабилизатор тока, резонансный контур, частотная характеристика, коэффициент стабилизации, двухсекционная структура.

## ASSESSMENT OF INDUCTIVE-CAPACITIVE CONVERTERS STABILIZATION PROPERTIES

The device and functionality of a control system and monitoring of energy consumption of pIt is important to provide the required value of the load current stabilization factor when changing the resistance value and the nature of the load for current stabilization systems. From this point of view, the most optimal are circuit solutions containing inductive-capacitive converters (ICC). ICC load current stability in the deviation of the supply network frequency depends not only on the connection scheme of the power source, but also on the options for connecting the reactive elements forming the ICC structure. Therefore, the actual task is to study the stabilization properties of ICC for frequency deviations from resonance.

The main disadvantages of ICC are large mass and large dimensions, which are eliminated by increasing the conversion frequency and hybrid execution of electromagnetic elements that perform the function of ICC. An effective way to improve the ICC mass-dimensional parameters is the use of multifunctional integrated electromagnetic components (MIEC).

In this article, the authors conducted a study of the frequency and energy characteristics of the ICC based on the two-section MIEC. For considered MIEC circuitry solution the required condition for operation as an ICC is observed in the frequency range from  $0.50 \cdot f_{res.}$  до  $1.15 \cdot f_{res.}$ .

A mathematical model of ICC based on MIEC is developed to determine the range of variation in load resistance and frequency at which the load current is stabilized with a specified accuracy. It is shown that in the range of resistance variation of the load from  $0.1 \cdot \rho$  to  $100 \cdot \rho$  the deviation factor of the effective load current value  $k$  is equal to 0.403. Based on the results of the simulation, it is established that for the considered ICC scheme based on the two-section MIEC the load current stabilization factor is in the range from 0.20 to 0.25 in the frequency range from  $0.7 \cdot f_{res.}$  up to  $1.1 \cdot f_{res.}$ .

Experimental confirmation of the adequacy of the developed models has been carried out. The discrepancy between the results of the experiment and the simulation does not exceed 15 % for stabilizing the load current within  $\pm 15$  % of the frequency variation.

**Key words:** current stabilization, inductive-capacitive transducer, hybrid electromagnetic element, multifunctional integrated electromagnetic component, current source, parametric current stabilization system, resonant circuit, frequency response, stabilization factor, two-section structure.

Для систем стабилизации тока важным является обеспечение требуемого значения коэффициента стабилизации тока нагрузки при изменении значения сопротивления и характера нагрузки [1–3]. Наиболее оптимальным с этой точки зрения являются схемотехнические решения, содержащие индуктивно-емкостные преобразователи (ИЕП) [4]. Стабильность тока нагрузки ИЕП при отклонении частоты питающей сети зависит не только от схемы подключения источника питания, но и от вариантов соединения реактивных элементов, образующих структуру ИЕП [5–8]. В связи с тем, что структуру ИЕП образуют элементы с частотно-зависимыми параметрами, целесообразно исследовать стабилизационные свойства ИЕП при отклонениях частоты от резонансной [9–12]. Наглядно оценить стабилизирующие свойства можно с помощью частотных характеристик ИЕП.

Основными недостатками ИЕП являются большая масса и крупные габариты составляющих его электромагнитных элементов (ЭМЭ). Устранить перечисленные недостатки можно за счет повышения частоты преобразования и гибридного исполнения электромагнитных элементов, выполняющих функцию ИЕП [13, 14]. Гибридное исполнение ЭМЭ ИЕП является эффективным способом уменьшения их массы и габаритов, поэтому авторами предлагается использование многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов (МИЭК) для создания ИЕП на их основе [15, 16].

Основными задачами исследования являются построение и анализ частотных характеристик двухсекционной структуры МИЭК, расчет параметров стабилизации ИЕП на базе МИЭК, экспериментальное подтверждение адекватности разработанной математической модели.

В данной статье рассматривается ИЕП на основе двухсекционной структуры МИЭК, позволяющей реализовать на ее основе более тридцати комбинаций схмотехнических решений ИЕП, отличающихся вариантами соединения секций МИЭК и схемой подключения источника питания и нагрузки к секциям МИЭК [17].

Выполнено исследование режимов работы двухсекционной структуры МИЭК выбранного схмотехнического исполнения. На рисунке 1 представлена исследуемая схема двухсекционного МИЭК.

Оценка различных методов анализа работы МИЭК в электрических схемах с точки зрения простоты и точности показывает, что применение способа расчета, использующего интегральные параметры МИЭК, позволяет применять линейные, а не дифференциальные уравнения для расчета сложных структур МИЭК.

Разработана математическая модель ИЕП на основе МИЭК для определения диапазона изменения сопротивления нагрузки и частоты, при котором осуществляется стабилизация тока нагрузки с заданной точностью.

Система уравнений, описывающая эту схему:

$$\begin{aligned} U_{in} &= U_{e11} + U_2, \\ \underline{U}_1 &= (\underline{I}_{in} - \underline{I}_1)/(j \cdot \omega \cdot C_1), \\ \underline{U}_2 &= (\underline{I}_1 - \underline{I}_L)/(j \cdot \omega \cdot C_2), \\ \underline{U}_{e11} &= j \cdot \omega \cdot L_1 \cdot (\underline{I}_{in} + \underline{I}_L)/2, \\ \underline{U}_{e12} &= j \cdot \omega \cdot L_2 \cdot \underline{I}_1/2, \\ \underline{U}_1 &= \underline{U}_{e11} + \underline{U}_{e12} + \underline{U}_L, \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_L, \\ \underline{I}_L &= \omega \cdot C \cdot \underline{U}_{in}/(2 \cdot j), \\ \underline{I}_L &= \underline{U}_{in}/(2 \cdot j \cdot \omega \cdot L). \end{aligned}$$

Новизна разработанной математической модели заключается в использовании уточненной схемы замещения МИЭК на дискретных ЭМЭ, учитывающей активное сопротивление обкладок и потери в МИЭК. Разработанная математическая модель зарегистрирована в качестве программы для ЭВМ, которая позволяет с допустимой точностью рассчитать энергетические и частотные характеристики базовых структур МИЭК, учитывая эквивалентность схемы замещения МИЭК на дискретных ЭМЭ в интегрированной структуре с точки зрения происходящих в МИЭК электромагнитных процессов [18].

В данной статье авторами проведено исследование частотных и энергетических характеристик ИЕП на основе двухсекционной структуры МИЭК, которое показывает, что для рассматриваемого схмотехнического решения МИЭК требуемое условие работы в качестве ИЕП соблюдается в диапазоне изменения частоты от  $0,50 \cdot f_{рез.}$  до  $1,15 \cdot f_{рез.}$

Критерием стабилизации тока нагрузки при изменениях сопротивления нагрузки от  $Z_{L.0} = 0$  до  $Z_{L.max}$  является коэффициент стабилизации тока нагрузки:

$$0 < \delta = \frac{(I_L)^2 \cdot Z_L}{(I_n)^2 \cdot Z_{Lmax}} \leq 1.$$

Также к параметрам стабилизации ИЕП относится коэффициент отклонения действующего значения тока нагрузки  $k$ , определяемый по формуле:

$$k = \Delta I_d / I_p \cdot 100 \%,$$

где  $\Delta I_d = I_{dmax} - I_{dmin}$  — диапазон изменения действующего значения тока нагрузки;

$I_p$  — действующее значение тока нагрузки при значении сопротивления нагрузки,

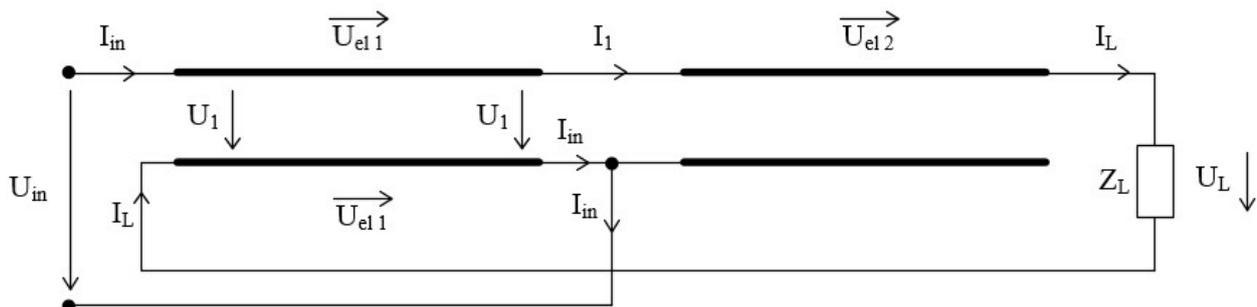


Рисунок 1. Схема двухсекционного МИЭК с интегральными параметрами

равном эквивалентному волновому сопротивлению  $\rho$  схемы.

С помощью разработанной математической модели произведен расчет параметров стабилизации ИЕП на основе двухсекционной структуры МИЭК. Результаты расчета приведены в таблице 1. Исследования производились для трех диапазонов изменения значения сопротивления нагрузки  $R$ : от  $0,1 \cdot \rho$  до  $10 \cdot \rho$ , от  $0,1 \cdot \rho$  до  $50 \cdot \rho$ , от  $0,1 \cdot \rho$  до  $100 \cdot \rho$ , где  $\rho$  — волновое сопротивление.

В таблице 1 приведены действующие значения токов нагрузки в зависимости от значения сопротивления нагрузки для ИЕП, выполненного на основе рассматриваемого схемотехнического решения МИЭК, при значении эквивалентного волнового сопротивления  $\rho = 10 \text{ Ом}$  и изменении величины сопротивления нагрузки от 1 до 1000 Ом с шагом 1 Ом. Аналогичным образом определялся диапазон нестабильности выходного тока нагрузки для других диапазонов изменения значения сопротивления нагрузки и других исследуемых схем [19, 20].

Авторами произведена экспериментальная оценка адекватности разработанной

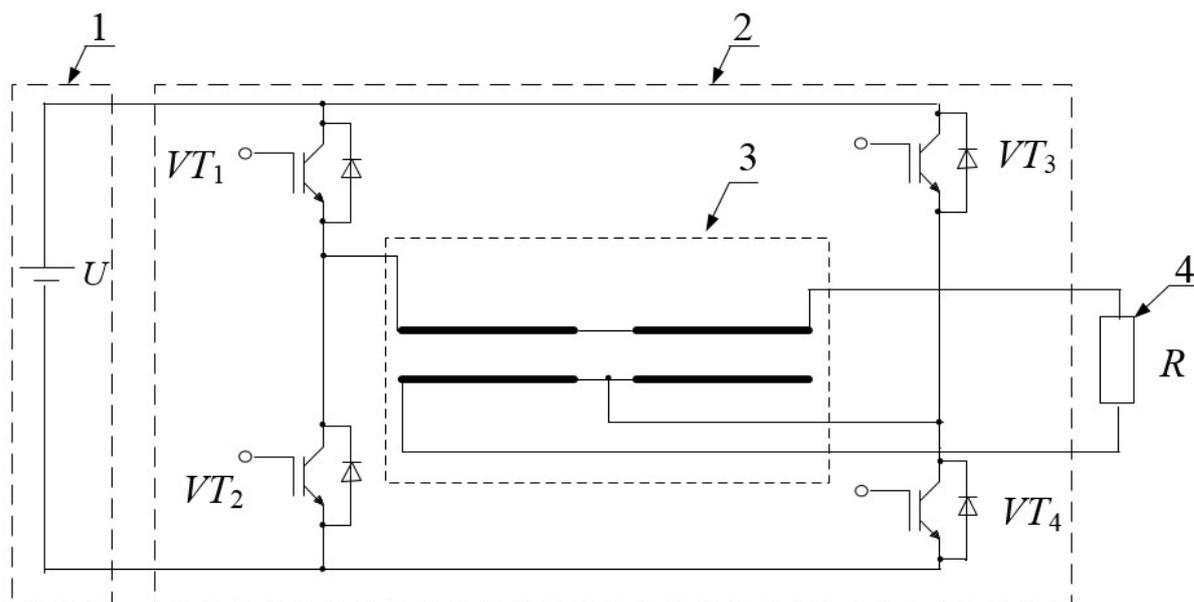
математической модели. Для экспериментальных исследований собрана схема с двухсекционным МИЭК, представленная на рисунке 2. В результате экспериментальных исследований получены зависимости выходного тока нагрузки от значения сопротивления нагрузки и формы входных токов при работе на активную нагрузку, получены осциллограммы входного тока, полученные ранее в программном пакете MathCad с помощью разработанной математической модели.

Электрические параметры макетного образца МИЭК: емкость  $C = 0,289 \text{ мкФ}$ , индуктивность обкладок  $L = 0,029 \text{ мГн}$ , активное сопротивление обкладок 183 Ом. Геометрические параметры макетного образца МИЭК: длина обкладки  $l = 20 \text{ м}$ , количество витков  $w = 34$ , ширина медной ленты  $b = 5 \text{ см}$ , толщина медной ленты  $\delta = 12 \text{ мкм}$ .

Результаты расчетов и экспериментов представлены на рисунке 3, где приведена зависимость коэффициента стабилизации по току от относительной частоты.

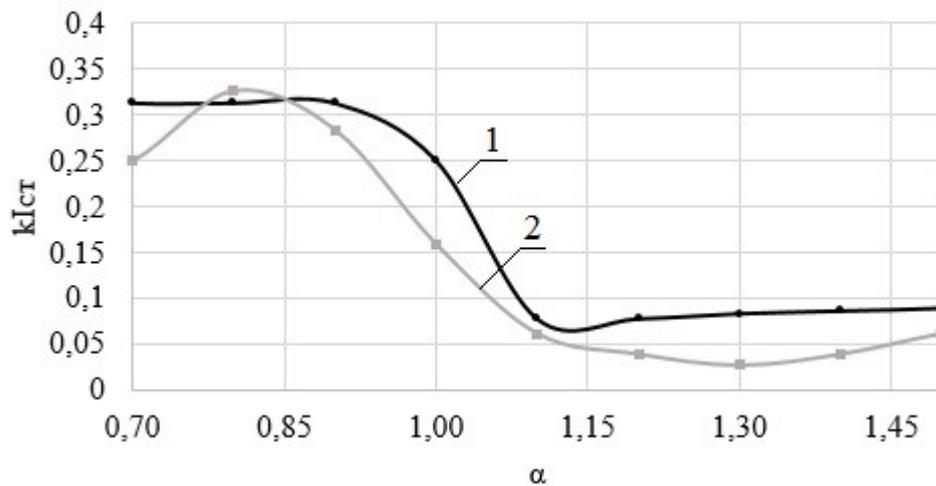
Таблица 1. Результаты расчета параметров стабилизации ИЕП

Параметр стабилизации ИЕП	Сопротивление нагрузки, Ом		
	1–100	1–500	1–1000
Коэффициент отклонения действующего значения тока нагрузки $k$	0,008662	0,17	0,403
Изменение действующего значения тока нагрузки $\Delta I_d$	0,009	0,177	0,419



1 — источник напряжения; 2 — мостовой инвертор; 3 — двухсекционный МИЭК; 4 — нагрузка

Рисунок 2. Схема эксперимента с двухсекционным МИЭК



1 — расчетные данные; 2 — экспериментальные данные

Рисунок 3. Зависимость коэффициента стабилизации тока от относительной частоты

Из анализа рисунка 3 можно сделать вывод о том, что результаты, полученные экспериментальным путем и с помощью численного моделирования, незначительно отличаются друг от друга. Аналогичные зависимости получены и для других исследуемых схем [19, 20].

В режиме резонанса МИЭК достигается коэффициент стабилизации тока нагрузки, равный  $\delta = 0,25$ . Допустимое отклонение коэффициента стабилизации тока для ИЕП в составе систем стабилизации тока составляет не более 15% [21, 22]. Для рассматриваемой схемы ИЕП на основе двухсекционного МИЭК данный параметр находится в пределах от 0,20 до 0,25 в диапазоне изменения частоты от  $0,7 \cdot f_{рез.}$  до  $1,1 \cdot f_{рез.}$ . При этом сравнение результатов экспериментов с расчетными данными показывает, что отличие экспериментальных данных от расчетных составляет не более 15%.

#### Вывод

Разработана математическая модель ИЕП на основе МИЭК. Особенность разработан-

ной модели заключается в использовании уточненной схемы замещения МИЭК на дискретных ЭМЭ, учитывающей активное сопротивление обкладок и потери в МИЭК. Разработанная математическая модель позволяет определить диапазон изменения сопротивления нагрузки и частоты, при котором осуществляется стабилизация тока нагрузки с заданной точностью. Показано, что в диапазоне изменения сопротивления нагрузки от  $0,1 \cdot \rho$  до  $100 \cdot \rho$  коэффициент отклонения действующего значения тока нагрузки  $k$  равен 0,403. Для рассматриваемой схемы ИЕП на основе двухсекционного МИЭК коэффициент стабилизации тока нагрузки находится в пределах от 0,20 до 0,25 в диапазоне изменения частоты от  $0,7 \cdot f_{рез.}$  до  $1,1 \cdot f_{рез.}$ . Проведено экспериментальное подтверждение адекватности разработанных моделей. Для стабилизации тока нагрузки в пределах  $\pm 15\%$  изменения частоты расхождение результатов эксперимента и моделирования не превышает 15%.

#### Список литературы

1. Брылина О.Г., Гельман М.В. Исследование двухзвенных преобразователей частоты // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 270–278.
2. Храмышин Т.Р., Корнилов Г.П., Крубцов Д.С. Формирование фазных напряжений четырехуровневого высоковольтного преоб-

разователя частоты // Электротехнические системы и комплексы. 2011. № 1. С. 174–181.

3. Shaoan A.C., Tero J., Jovanovic M.M., Ridley R.B., Lee F.C. A New IC Controller for Resonant-Mode Power Supplies // IEEE Applied Power Electronics Conference Proceedings. Los Angeles, California, March 1990, pp. 459–466.

4. Кабан В.П., Матвеев В.Ю., Губаревич В.Н., Спиринов В.М. Расчет схем

Г-образных индуктивно-емкостных преобразователей CL-вида с учетом характера нагрузки // Сб. ст. Института электродинамики НАН Украины. Киев, 2012. № 33. С. 83–87.

5. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Анализ динамики патентования индуктивно-емкостных преобразователей для систем стабилизации тока // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12. № 4. С. 55–61.

6. Konesev S.G., Khazieva R.T., Konev A.A., Kondratyev E.Y. The Research of Heating Efficiency of Different Induction Heating Systems // MATEC Web of Conferences: 12th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings — 2017». St. Petersburg, April 18–22, 2017. Vol. 113, 2017. Article Number 01002. Number of page(s) 4. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711301002>.

7. Конесев С.Г., Кириллов Р.В., Хазиева Р.Т. Анализ энергетических и частотных характеристик многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. С. 65–75.

8. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Анализ стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей при различных способах подключения гибридного электромагнитного элемента // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 1. С. 49–55. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55.

9. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Gainutdinov I.Z., Kondratyev E.Y. Electromagnetic Compatibility of Devices on Hybrid Electro-Magnetic Components // Journal of Physics: Conference Series, 2017. Volume 944, Conference 1. Number 012058. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012058>.

10. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Konev A.A. Research on Stabilization Properties of Inductive-Capacitive Transducers Based on Hybrid Electromagnetic Elements // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2017. Vol. 803. No 1. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012076.

11. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V. The Research of Stabilization Properties

of Inductive-Capacitive Converters Based on the Two-Sections Hybrid Electromagnetic Elements // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines: X International IEEE Scientific and Technical Conference, 15–17 November, 2016. Omsk, 2017. P. 1–7. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819030.

12. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Тенденции развития индуктивно-емкостных преобразователей, их основные параметры и характеристики // Актуальные вопросы энергетики: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. С. 252–255.

13. Пат. 2632412 Российская Федерация, МПК Н 02 М 5/06. Индуктивно-емкостный преобразователь / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, Т.А. Бочкарева. 2016143651; заявл. 07.11.2016, опубл. 04.10.2017. Бюл. 28.

14. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V. Multifunctional Integrated Electromagnetic Components Work Modes in Push-Pull Converters // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. Saint-Petersburg, 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076321.

15. Пат. 2585248 Российская Федерация, МПК Н 03 Н 7/00. Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент / С.Г. Конесев. 2012114845/08; заявл. 13.04.2012, опубл. 27.05.2016. Бюл. 15.

16. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Функциональная интеграция как техническое средство развития электромагнитных элементов // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. науч. тр. 2014. С. 135–138.

17. Милях А.Н., Волков И.В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. Киев: Наукова Думка, 1974. 216 с.

18. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В. Исследование частотных характеристик двухсекционных многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19, № 4 (70). С. 66–71.

19. Konesev S.G., Khazieva R.T., Bockkareva T.A. Mathematical Modeling of Inverter with a Hybrid Resonant Circuit Operation

Modes // IVrd International Conference on Industrial Engineering 2018 (ICIE-2018). Saint-Petersburg, 2018. P. 1–5.

20. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V. Research of the Frequency Characteristics of Hybrid Inductive-Capacitive Converters // IOP: Earth and Environmental Science (EES). Saint Petersburg, 2018. P. 1–5.

21. Кабан В.П. Сравнительный анализ Т-образных индуктивно-емкостных преобразователей CLL-структуры по установленной мощности реактивных элементов // Сб. Института электродинамики НАН Украины. Киев, 2012. № 33. С. 87–91.

22. Губаревич В.Н., Подольный С.В., Спиринов В.М., Кабан В.П., Матвеев В.Ю. Регулирование выходного напряжения в инверторе в однофазной системе инвертор — индуктивно-емкостный преобразователь // Сб. Института электродинамики НАН Украины. Киев, 2010. № 25. С. 114–118.

### References

1. Brylina O.G., Gel'man M.V. Research of Variable Adjustable Frequency Converters. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2013, No. 21, pp. 270–278. [in Russian].

2. Khramshin T.R., Kornilov G.P., Krubtsov D.S. Formation of Phase Voltages of a Four-Level High-Voltage Frequency Converter. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2011, No. 1, pp. 174–181. [in Russian].

3. Shaoan A.C., Tero J., Jovanovic M.M., Ridley R.B., Lee F.C. A New IC Controller for Resonant-Mode Power Supplies. *IEEE Applied Power Electronics Conference Proceedings*. Los Angeles, California, March 1990, pp. 459–466.

4. Kaban V.P., Matveev V.Yu., Gubarevich V.N., Spirin V.M. Calculation of Circuits of L-Shaped Inductive-Capacitive Converters CL-Type Taking into Account the Nature of the Load. *Coll. of Art. of Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. Kiev, 2012, No. 33, pp. 83–87. [in Russian].

5. Konesev S.G., Khazieva R.T. Analysis of Patenting of Inductive-Capacitive Transducers for Current Stabilization Systems. *Electrical and Data Processing Facilities and Complexes*, 2016. T. 12. № 4. S. 55–61. [in Russian].

6. Konesev S.G., Khazieva R.T., Konev A.A., Kondratyev E.Y. The Research of Heating Efficiency of Different Induction

Heating Systems. *MATEC Web of Conferences: 12th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings — 2017»*. St. Petersburg, April 18-22, 2017. Vol. 113, 2017. Article Number 01002. Number of page(s) 4. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711301002>.

7. Konesev S.G., Kirillov R.V., Khazieva R.T. Analysis of the Energy and Frequency Characteristics of Multifunctional Integrated Electromagnetic Components. *International Collection of Scientific Works «Energetic and Electrotechnical Systems»*. Magnitogorsk, Magnitogorsk. gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova, 2014, pp. 65–75. [in Russian].

8. Konesev S.G., Khazieva R.T. Stabilization Properties of Inductive-Capacitive Converters with Different Connection Methods of Hybrid Electromagnetic Elements. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2017, No. 1, pp. 49-55. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55. [in Russian].

9. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Gainutdinov I.Z., Kondratyev E.Y. Electromagnetic Compatibility of Devices on Hybrid Electromagnetic Components. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017. Vol. 944, Conference 1. No. 012058. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012058>.

10. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Konev A.A. Research on Stabilization Properties of Inductive-Capacitive Transducers Based on Hybrid Electromagnetic Elements. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. 2017, Vol. 803, No. 1. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012076.

11. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V. The Research of Stabilization Properties of Inductive-Capacitive Converters Based on the Two-Sections Hybrid Electromagnetic Elements. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines: X International IEEE Scientific and Technical Conference*, 15–17 November, 2016. Omsk, 2017. P. 1–7. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819030.

12. Konesev S.G., Khazieva R.T. Trends in the Development of Inductive Capacitive Converters, Their Main Parameters and Characteristics. *Collection of Scientific Works of International Scientific and Practical Conference «Actual Issues of Power Engineering»*.

Omsk, OmGTU, 2017, pp. 252–255. [in Russian].

13. Konesev S.G., Khazieva R.T., Bochkareva T.A. *Inductive Capacitive Converter*. Patent RF, No. 2632412, 2017. [in Russian].

14. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V. Multifunctional Integrated Electromagnetic Components Work Modes in Push-Pull Converters. *Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*, Saint-Petersburg, 2017, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076321.

15. Konesev S.G. *Multifunctional Integrated Electromagnetic Component*. Patent RF, No. 2585248, 2016. [in Russian].

16. Konesev S.G., Khazieva R.T. Functional Integration as a Technical Tool for the Development of Electromagnetic Elements. *Increasing the Reliability and Energy Efficiency of Electrical Systems and Complexes: Interuniversity Collection of Scientific Works*, 2014, pp. 135–138. [in Russian].

17. Milyakh A.N., Volkov I.V. *Uninterruptible Current Systems Based on Inductive Capacitive Converters*. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1974. 216 p. [in Russian].

18. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V. Investigation of the Frequency Charac-

teristics of Two-Section Multifunctional Integrated Electromagnetic Components. *Vestnik USATU*, 2015, Vol. 19, No. 4 (70), pp. 66–71. [in Russian].

19. Konesev S.G., Khazieva R.T., Bochkareva T.A. Mathematical Modeling of Inverter with a Hybrid Resonant Circuit Operation Modes. *IV International Conference on Industrial Engineering 2018 (ICIE-2018)*. Saint-Petersburg, 2018, pp. 1–5.

20. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V. Research of the Frequency Characteristics of Hybrid Inductive-Capacitive Converters. *IOP: Earth and Environmental Science (EES)*. Saint-Petersburg, 2018, pp. 1–5.

21. Kaban V.P. Comparative Analysis of T-Shaped Inductive Capacitive Converters of CLL-Structure Based on Installed Power of Reactive Elements. *Collection of Scientific Works of Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. Kiev, 2012, No. 33, pp. 87–91. [in Russian].

22. Gubarevich V.N., Podol'nyi S.V., Spirin V.M., Kaban V.P., Matveev V.Yu. Regulation of Output Voltage in Inverter in Single-Phase System of Inverter-Inductive-Capacitive Converter. *Collection of Scientific Works of Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. Kiev, 2010, No. 25, pp. 114–118. [in Russian].



**Иванова О. В.**  
**Ivanova O. V.**

кандидат технических наук,  
доцент, доцент кафедры  
«Управление и сервис  
в технических системах»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Халиков Р. М.**  
**Khalikov R. M.**

кандидат химических наук,  
доцент, доцент кафедры  
«Управление и сервис  
в технических системах»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Короткова Л. Н.**  
**Korotkova L. N.**

кандидат химических наук,  
доцент, доцент кафедры  
«Охрана окружающей среды  
и рациональное использование  
природных ресурсов»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет»;  
г. Уфа,  
Российская Федерация

УДК 621.31: 628.16

## РЕЗУЛЬТАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА КАЧЕСТВЕННОЙ ВОДЫ

Технологическая схема подготовки питьевой воды охватывает водозабор, предварительную очистку, очистку угольными и другими фильтрами — умягчение, дезинфекцию и т.д. В качестве необходимой аппаратуры технология водоподготовки предусматривает использование водяных насосов. Проанализированы эффективные подходы к управлению функционированием электродвигателей центробежных насосов, перекачивающих объем воды. В работе рассмотрены алгоритмы и методы управления электродвигателем, позволяющие снизить расходы при его использовании, а также сохранить необходимый уровень эксплуатационных характеристик электроприводов и водяных насосов.

Использование регулируемого электропривода в системах водоснабжения позволяет модифицировать производительность насосов в соответствии с графиком водозабора, что, в свою очередь, позволяет получить значительную экономию электроэнергии и воды, уменьшить количество аварий из-за разрывов трубопровода. Использование регулируемого электропривода в водяных насосах позволяет сэкономить электроэнергию от 38 % до 45 %. Результаты анализа нарушений при использовании асинхронных электродвигателей, выявленных в ходе эксплуатации частотно-регулируемого привода (ЧРП) на насосных станциях водоснабжения, позволяют сделать вывод о необходимости ограничения частотных диапазонов регулирования. У ЧРП имеются следующие преимущества: возможность регулирования в широких пределах скорости оборотов двигателя и снижения пускового тока практически до номинального. Основная функция, выполняемая автоматизированной системой управления фильтрами, — управление работой электротехнического оборудования в фильтрующем блоке в соответствии с технологией водоподготовки.

**Ключевые слова:** питьевая вода, водяные насосы, электротехническое оборудование, электродвигатели, частотно-регулируемый привод, управление водоочисткой, энергосбережение.

## THE EFFICIENT MANAGEMENT OF ELECTROTECHNICAL EQUIPMENT FOR THE QUALITATIVE WATER PRODUCTION TECHNOLOGICAL SCHEME

The technological scheme for the preparation of drinking water covers water intake, pre-treatment, cleaning with carbon and other filters — softening, disinfection, etc. As a necessary equipment, water treatment technology involves the use of water pumps. Effective approaches to controlling the functioning of electric motors of centrifugal pumps pumping the volume of water are analyzed. In work algorithms and methods of electric motor control are considered, which allow to reduce costs when using it, and also to maintain the required level of performance characteristics of electric drives and water pumps.

Using a regulated electric drive in water supply systems allows you to modify the performance of pumps in accordance with the schedule of water intake, which in turn allows you to obtain significant savings in electricity and water, reduce the number of accidents due to pipeline ruptures. The use of an adjustable electric drive in water pumps saves energy from 38 % to 45 %. The results of the analysis of violations with the use of asynchronous electric motors detected during the operation of a frequency-controlled drive (FCD) at pumping stations of water supply allow us to conclude that it is necessary to limit the frequency ranges of regulation. The FCD has the following advantages: the ability to regulate the engine speed in a wide range and reduce the inrush current to almost nominal. The main function performed by the automated filter management system is the operation of the electrotechnical equipment in the filter unit in accordance with the water treatment technology.

**Key words:** drinking water, water pumps, electrotechnical equipment, electric motors, frequency-controlled drive, water treatment, energy saving.

Пресная вода — невозобновляемый и уязвимый ресурс, который имеет важнейшее значение для определения уровня качества жизни человека [1]. Обеспечение населения высококачественной питьевой водой, отвечающей санитарно-гигиеническим и эпидемиологическим требованиям, остается актуальной задачей.

Технологическая линия водоподготовки оборудована водяными насосами, которые перемещают потоки жидкости. В центробежных насосах гидравлическое давление создается за счет вращения лопастных колес, которые приводятся в движение электродвигателем. Непосредственный контроль функционирования электротехнического оборудования (электродвигателей, датчиков и т.п.) в процессе перекачки объема жидкости насосами по трубопроводу позволяет существенно повысить энергоэффективность технологии подготовки питьевой воды.

Данная статья нацелена на анализ инновационных подходов управления электродвигателями насосов в технологической линии подготовки очищенной воды.

В технологической линии водоснабжения объем жидкой воды в трубопроводах и аспа-

ратах всасывается и нагнетается центробежными насосами. В центробежных насосах давление перекачиваемой воды создается при вращении лопастных колес электродвигателем. В технологической линии подготовки воды наиболее часто используются трехфазные асинхронные электродвигатели центробежных водяных насосов (рисунок 1).

В зависимости от расположения в системе водоснабжения и назначения различают насосные станции первого (НС I) и второго подъема (НС II) и циркуляционные, подкачивающие насосы и т.д. [2]. Подачу воды на первичную очистку из источника водоснабжения выполняют насосные станции первого подъема. С их же помощью вода подается непосредственно в водонапорные башни, распределительные сети и другие сооружения в том случае, если процесс водоочистки необязателен. Следует отметить, что подкачивающие водяные насосы позволяют увеличить напор в водопроводных сетях.

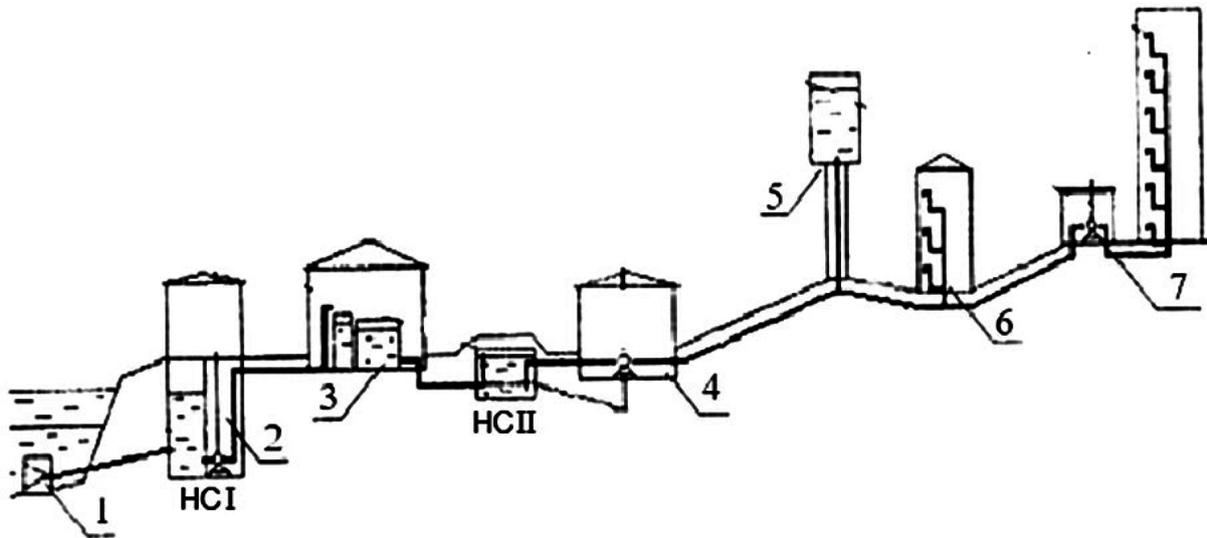
Насосные станции систем водоснабжения и водоотведения представляют собой многофункциональный комплекс сооружений и оборудования, обеспечивающий водоснабжение или водоотведение в соответствии с нуж-

дами потребителя. Количество воды, которое потребляется объектами водоснабжения, учитывая режим водопотребления и размеры регулирующих накопительных емкостей (резервуаров), определяет величину производительности насосных станций. При выборе типа насоса и количества рабочих агрегатов учитываются условия согласованной работы насосов и водопроводной сети — это насосы и двигатели различных типов, контрольно-измерительные приборы, трубопроводы, регулирующая и запорная арматура, электрооборудование и т.д. [3].

К приводным электродвигателям водяных насосных агрегатов помимо их высокой мощности предъявляется ряд специфических требований, одним из которых является

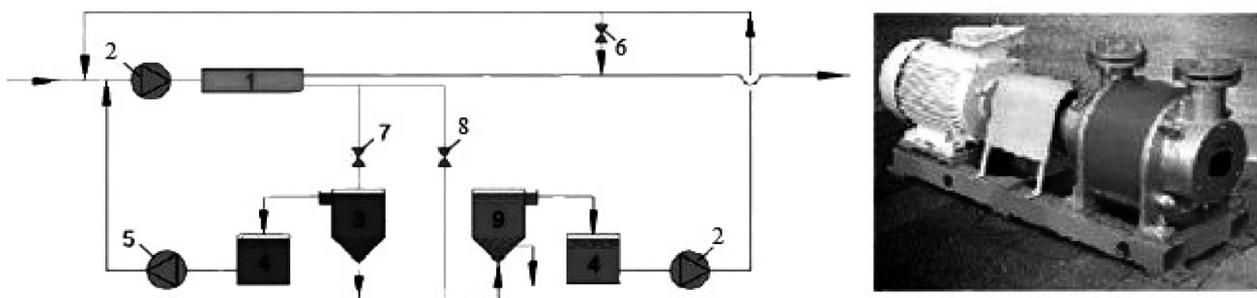
необходимость пуска двигателей под нагрузкой. Конструкция электродвигателя должна также допускать довольно продолжительное вращение ротора в обратную сторону, вызываемое сливом воды из напорных трубопроводов после отключения привода от сети при плановой или аварийной остановке электрооборудования.

Компактность конструкций, простота соединений с центробежным водяным насосом, легкая автоматизация управления и относительно низкие эксплуатационные затраты предопределили массовое применение электродвигателей переменного тока в качестве привода для насосов систем водоснабжения при умягчении питьевых вод (рисунок 2).



1 — водозабор; 2 — насосная станция подкачки; 3 — резервуары; 4 — накопительные емкости; 5 — водонапорная башня; 6 — водопроводная распределительная сеть; 7 — подкачивающие насосы

Рисунок 1. Насосы для перекачки и подъема воды в системе водоснабжения



1 — мембранный аппарат; 2 — насос высокого давления; 3 — отстойник для сбора промывной воды; 4 — резервуар; 5 — водяной насос; 6 — вентиль; 7 — магнитный клапан; 8 — вентиль регулировки давления; 9 — реактор умягчения

Рисунок 2. Центробежные насосы с электродвигателем в технологической линии умягчения воды

Асинхронные электродвигатели являются наиболее подходящим электроприводом для водяных насосов с различной мощностью [4]. Они значительно дешевле электродвигателей всех других типов, и, что немаловажно, гораздо удобнее их сервисное обслуживание. Пуск этих электродвигателей — прямой асинхронный, при этом не требуется каких-либо дополнительных устройств, что дает возможность значительно упростить схему автоматического управления.

Для водяных насосов с горизонтальным валом отечественной промышленностью в настоящее время выпускаются асинхронные электродвигатели с ротором единой серии 4А мощностью 0,06–400 кВт. Имеются различные модификации асинхронных электродвигателей, в частности:

- с фазным ротором, облегчающим условия пуска;
- с увеличенным пусковым моментом;
- с повышенными энергетическими характеристиками для насосных агрегатов с круглосуточной работой и т. п.

В соответствии с режимом водопотребления приводится управление частотой вращения насоса и рабочими параметрами электропривода.

Электротехнической промышленностью выпускаются также мультискоростные асинхронные электродвигатели, позволяющие изменением частоты вращения регулировать напор водяного насоса. Например, интервалами мощности от 500/315 до 1600/1000 кВт обладают двухскоростные электродвигатели серии ДВДА. Переключение многоскоростных электроприводов с одной частоты вращения на другую совершается отключением части обмотки статора с последующим включением другой [5].

В качестве привода мощных водяных насосов, характеризующихся большой продолжительностью работы, используются синхронные электродвигатели переменного тока. Самым существенным преимуществом синхронного электродвигателя при сопоставлении с асинхронными является то, что электродвигатель может функционировать с коэффициентом мощности, равным единице и выше, что экономит электроэнергию; син-

хронный электродвигатель работает более устойчиво при колебаниях напряжения в сети. Основным недостатком синхронных электродвигателей является то, что момент на валу при пуске равен нулю, вследствие этого их необходимо раскручивать до скорости, близкой синхронной. Поэтому в роторе большинства современных синхронных электродвигателей располагается дополнительная пусковая обмотка.

Энергосбережение при использовании электротехнического оборудования входит в список приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации [6]. Сэкономить энергию от 38 % до 45 % и одновременно уменьшить потери воды до 15 % позволяет использование регулируемого электропривода. Сбережение электроэнергии происходит путем устранения непроизводительных затрат в дросселях и других регулирующих устройствах.

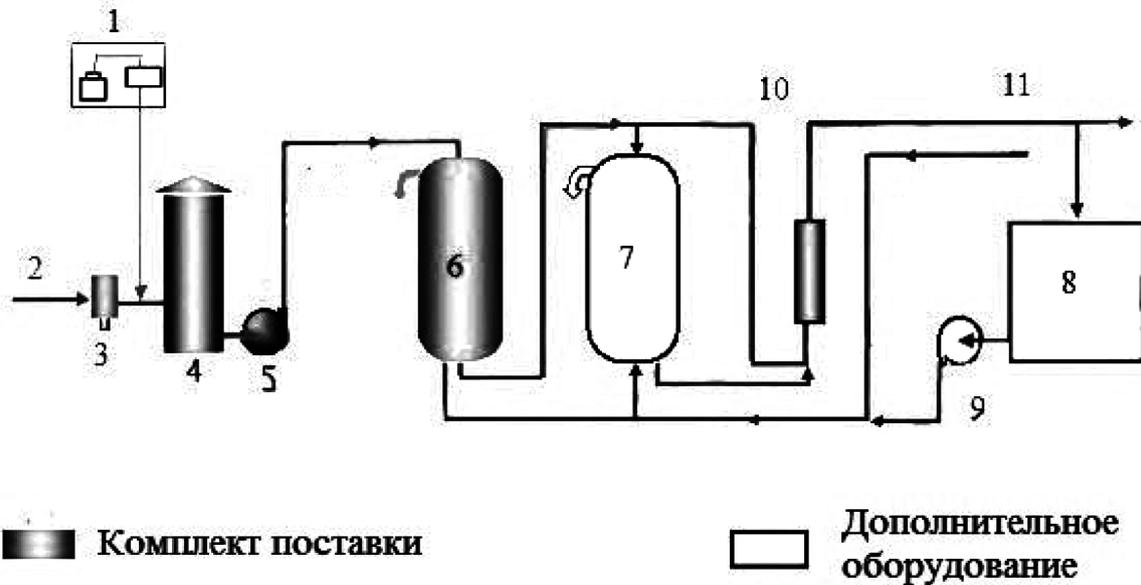
Алгоритмы и методы управления электродвигателем рассматриваются в работе [7]: это позволяет снизить затраты, а также сохранить высокий уровень эксплуатационных характеристик водяного насоса. Результаты анализа дефектов асинхронных двигателей, выявленных в ходе внедрения и эксплуатации частотно-регулируемый привод (ЧРП) на станциях городского водоснабжения, позволяют сделать вывод о необходимости ограничения частотных диапазонов регулирования при использовании серийных электродвигателей. У ЧРП есть две характеристики, которые обуславливают преимущества его использования: потенциал регулирования в широких пределах оборотов электропривода и уменьшение пускового тока до номинального. При замене нерегулируемого привода водяного насоса, функционирующего в режиме циклических включений — остановок, на регулируемый исключаются потери на значительные пусковые токи за счет мягкого пуска электродвигателя.

Для обеспечения поддержания требуемой мощности насосного агрегата обороты электродвигателя водяных насосов могут плавно изменяться. Использование регулируемого электропривода в системах водоснабжения

позволяет изменять производительность насосов в соответствии с графиком водоразбора, что, в свою очередь, позволяет сэкономить значительно электроэнергию и воду, уменьшить количество аварий из-за разрывов трубопровода.

Технологическая схема подготовки высококачественной питьевой воды включает и водяные электронасосы, которые перекачивают воду с предварительной очисткой (обра-

ботка коагулянтами и др.), очисткой угольными фильтрами и т.д.; обеззараживанием (хлорирование, озонирование, ультрафиолетовое (УФ) излучение и т.п.) для улучшения органолептических характеристик [8-12]. Исходная вода в процессе очистки на инновационных фильтрах и дезинфекции (рисунок 3) приобретает необходимые потребительские качества.



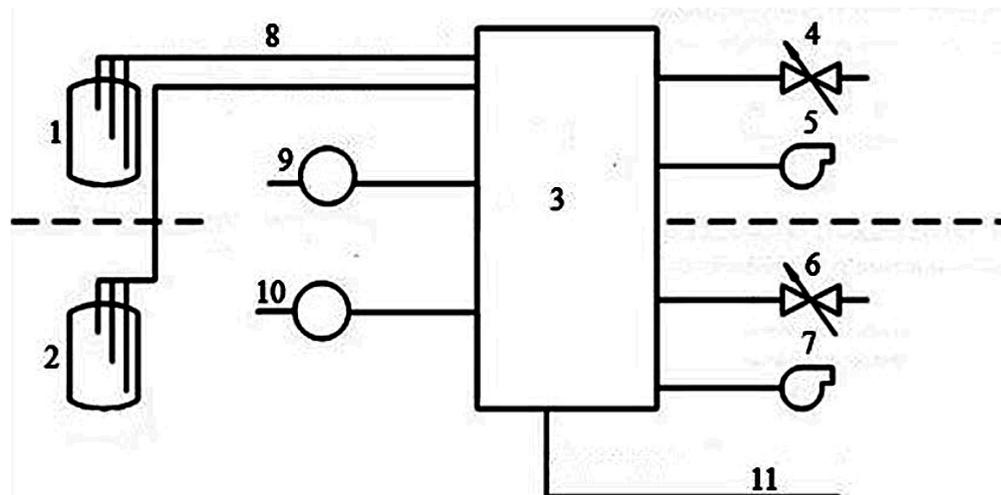
1 — реактный блок; 2 — исходная вода; 3 — фильтр грубой очистки; 4 — аэратор; 5 — водяной насос; 6 — песчаный фильтр; 7 — угольный фильтр; 8 — резервуар; 9 — промывной электронасос; 10 — установка УФ обеззараживания; 11 — очищенная вода

**Рисунок 3.** Водяные насосы в технологической линии осветления и улучшения органолептических характеристик питьевой воды

Критерии оценки насосного оборудования определены в работе [13] при проведении инспекции энергоэффективности системы водоснабжения ГОСТ 33969-2016 (ISO/ASME 14414). Главное назначение шкафа управления электродвигателями и водяными насосами — это включение и отключение компрессора, защита электродвигателей насоса фильтра с использованием микропроцессорного реле защиты типа РЗ-03-07, предохранение от снижения мощности обусловленной «сухим ходом» насоса, защита от включения электропривода водяного насоса при пониженном сопротивлении изоляции (измерение сопротивления изоляции при постоянном напряжении 500 В), сигнализа-

ция срабатывания защиты электродвигателя водяного насоса фильтра. Кроме того, в шкафу управления осуществляются технологический учет расхода электроэнергии и воды, хранение архива параметров и т.п. Основная функция, выполняемая автоматизированной системой управления фильтрами очистки воды, — согласованная работа электронасосов и фильтров в соответствии с технологией водоподготовки (рисунок 4).

В работе [14] для обеспечения безаварийной работы насосной станции при аварийной остановке электронасоса с частотным регулированием рекомендуется систему управления водяного насосом без частотного регулирования перестроить на работу



1 — фильтр 1; 2 — фильтр 2; 3 — шкаф управления фильтрами; 4 — управление клапанами фильтра 1; 5 — насосы фильтра 1; 6 — управление клапанами фильтра 2; 7 — насосы фильтра 2; 8 — изменение уровня воды; 9 — измерение на входе фильтра 1; 10 — измерение на входе фильтра 2; 11 — связь со станцией управления насосом первого подъема

**Рисунок 4.** Схема управления водоочистными фильтрами

автоматического поддержания давления с помощью дросселирования. Целесообразно также рассматривать управление техническими средствами и сервисного обслуживания при водоснабжении в качестве фрактальных взаимодействий [15].

### Список литературы

1. Аликин В.Н., Анцайтис А.В., Горин А.П. и др. Современные технологии обработки воды. М.: Недра, 2014. Т. 1: Получение питьевой воды высокого качества «Чистая вода». 207 с.
2. Карелин В.Я., Минаев А.В. Насосы и насосные станции. М.: Стройиздат, 1986. 320 с.
3. Водоснабжение и водоотведение. Наружные сети и сооружения: справочник / Под ред. Б.Н. Репина. М.: Высшая школа, 1995. 431 с.
4. Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. М.: Машиностроение, 2013. 176 с.
5. Сиволов Г.Е., Кармалов А.И., Ивансон П.Б. и др. Многоуровневая автоматизированная система управления технологическими процессами водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 9–1. С. 47–56.
6. Кольцов А.В., Октябрьский А.М., Хабарова Т.В. Критические технологии и приоритетные направления развития науки и техники в рамках реализации ФЦП развития

### Вывод

Эффективное управление электродвигателями центробежных насосов, которые эксплуатируются в технологической линии водоподготовки питьевой воды, позволяет сэкономить 38–45 % энергии.

научно-технологического комплекса Российской Федерации // Инноватика и экспертиза. 2016. № 3 (18). С. 31–54.

7. Стенякин К.В. «Мегатрон» — современное производство электрощитового оборудования для систем водоочистки, водоподготовки и водоотведения // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2017. № 6 (114). С. 42–46.

8. Иванова О.В. Словарь основных терминов управления качеством. Уфа: РИЦ БашГУ, 2014. 68 с.

9. Алексеев Л.С. Контроль качества воды. М.: ИНФРА-М, 2009. 159 с.

10. Халиков Р.М., Иванова О.В. Эффективные мембранные технологии для подготовки качественной питьевой воды // Сб. ст. XIV Междунар. конф. «European Research» Ч. 1. Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2018. С. 89–92.

11. Иванова О.В., Халиков Р.М. Управление технологической линией подготовки высококачественной питьевой воды // Сб. ст. XVIII Междунар. конф. «World Science:

Problems and Innovations» Ч. 1. Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2018. С. 73–75.

12. Мустафина Д.Ф., Иванова О.В. Роль технических регламентов в безопасности жизнедеятельности человека // Сб. ст. Всероссийск. конф. с международным участием «Качество жизнеобеспечения населения». Уфа: БГМУ, 2016. С. 91–94.

13. Виноградов А.Б., Сибирцев А.Н., Колодин И.Ю. Автоматизация насосной станции с применением частотно-регулируемого электропривода // Силовая электроника. 2006. № 2. С. 20–23.

14. Усачев А.П. Управление параллельной работой центробежных насосов // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 2. С. 55–60.

15. Иванова О.В., Халиков Р.М., Чудинов В.В. Технологичные механизмы формирования общепрофессиональных компетенций у бакалавров направления подготовки «Управление качеством» // Успехи современной науки и образования. 2016. № 9–1. С. 73–76.

### References

1. Alikin V.N., Antskaitis A.V., Gorinov A.P. e.a. *Modern Technologies of Water Treatment*. Moscow, Nedra Publ., 2014. Vol. 1: Reception of Drinking Water of High Quality «Pure Water». 207 p. [in Russian].

2. Karelin V.Ya., Minaev A.V. *Pumps and Pump Stations*. Moscow, Stroiizdat Publ., 1986. 320 p. [in Russian].

3. *Water Supply and Water Disposal. External Networks and Facilities: Reference Book* / Ed. by B.N. Repin. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1995. 431 p. [in Russian].

4. Leznov B.S. *Variable Frequency Electric Drive of Pumping Units*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2013. 176 p. [in Russian].

5. Sivolov G.E., Karmalov A.I., Ivanson P.B. e.a. Multilevel Automated Control System of Technological Processes of Water Supply and Wastewater Disposal. *Water Supply and Sanitary Technique*, 2011, No. 9–1, pp. 47–56. [in Russian].

6. Kol'tsov A.V., Oktyabr'skii A.M., Khabarova T.V. Critical Technologies and Priority Directions for the Development of Science and Technology in the Framework of the Federal Target Program for the Development of the

Scientific and Technological Complex of the Russian Federation. *Innovation and Expertise*, 2016, No. 3 (18), pp. 31–54. [in Russian].

7. Stenyakin K.V. Megatron is a Modern Production of Switchboard Equipment for Water Purification, Water Treatment and Sanitation Systems. *Water Purification. Water Treatment. Water Supply*, 2017, No. 6 (114), pp. 42–46. [in Russian].

8. Ivanova O.V. *Dictionary of Quality Management Basic Terms*. Ufa, RITs BashGU, 2014. 68 p. [in Russian].

9. Alekseev L.S. *Water Quality Control*. Moscow, INFRA-M Publ., 2009. 159 p. [in Russian].

10. Khalikov R.M., Ivanova O.V. Effective Membrane Technologies for Production of Quality Drinking-Water. *Collection of Articles of XIV International conference «European Research»: Ch. 1*. Penza, MTsNS «Nauka i prosveshchenie», 2018, pp. 89–92. [in Russian].

11. Ivanova O.V., Khalikov R.M. Management of High-Quality Drinking Water Treatment Technology Line. *Collection of Articles of XVIII International Conference «World Science: Problems and Innovations»*. Part 1. Penza, MTsNS «Nauka i prosveshchenie» Publ., 2018, pp. 73–75. [in Russian].

12. Mustafina D.F., Ivanova O.V. The Role of Technical Regulations in Human Life Safety. *Collection of Articles of All-Russian Conference with International Participation «Quality of Population Life Support»*. Ufa, BGMU, 2016, pp. 91–94. [in Russian].

13. Vinogradov A.B., Sibirtsev A.N., Kolidin I.Yu. Automation of a Pumping Station Using a Frequency-Controlled Electric Drive. *Power Electronics*, 2006, No. 2, pp. 20–23. [in Russian].

14. Usachev A.P. Control of Centrifugal Pump Parallel Operation. *Water Supply and Sanitary Technique*, 2018, No. 2, pp. 55–60. [in Russian].

15. Ivanova O.V., Khalikov R.M., Chudinov V.V. Technological Mechanisms of General Professional Competencies Formation for Bachelors in the Direction of Training «Quality Management». *Achievements in Modern Science and Education*, 2016, No. 9–1, pp. 73–76. [in Russian].



**Федосеева Е. А.**  
**Fedoseeva E. A.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Промышленная  
теплоэнергетика», ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной технический  
университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация



**Бурдыгина Е. В.**  
**Burdygina E. V.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Промышленная  
теплоэнергетика», ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной технический  
университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация



**Уразаева Д. Ф.**  
**Urazaeva D. F.**

студент кафедры «Промышленная  
теплоэнергетика», ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация



**Салихов А. Р.**  
**Salikhov A. R.**

студент кафедры «Промышленная  
теплоэнергетика», ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация

УДК 620.9

## **ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

Вследствие истощения запасов традиционных источников энергии человечество все больше обращает свое внимание на нетрадиционные возобновляемые источники энергии (НВИЭ). Российская Федерация обладает большим потенциалом использования альтернативной энергии. Применение НВИЭ для покрытия нагрузок на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение, а также выработки электроэнергии приводит к снижению потребления органического топлива, что, в свою очередь, позволит повысить энергетическую и экологическую эффективность эксплуатации объектов нефтегазовой отрасли.

В качестве альтернативного источника энергии был рассмотрен вариант применения солнечной радиации. Поступление солнечного излучения в разных городах может значительно отличаться друг от друга. Это зависит от географического местоположения. В статье представлены результаты анализа внедрения установки солнечного горячего водоснабжения на объектах нефтегазовой отрасли (на примере нефтеперекачивающих станций, расположенных в различных широтах Российской Федерации и СНГ). Для установки были приняты вакуумные солнечные коллекторы (СК), которые имеют ряд преимуществ по сравнению с плоскими коллекторами.

Суммарная площадь СК зависит от многих факторов (КПД, интенсивности солнечного излучения, угла установки коллектора, температуры окружающего воздуха и др.), поэтому при определении срока окупаемости таких установок необходимо проводить трудоемкие расчеты.

В результате проведенного анализа была получена формула для определения площади солнечного коллектора в зависимости только от интенсивности падения солнечной радиации в рассматриваемой местности. Зависимость позволит существенно сократить время для определения экономической целесообразности использования установок солнечного горячего водоснабжения.

**Ключевые слова:** нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, альтернативная энергетика, солнечная энергия, система солнечного теплоснабжения, солнечная радиация, солнечный коллектор, площадь солнечного коллектора, КПД солнечного коллектора.

## POSSIBILITY OF USE OF SOLAR ENERGY IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

Due to the depletion of traditional energy sources, mankind is increasingly turning its attention to non-traditional renewable energy sources (NRES). The Russian Federation has a great potential for using alternative energy. The use of NRES to cover the loads for heating, ventilation and hot water supply, as well as the generation of electricity, leads to a decrease in the consumption of fossil fuels, which in turn will improve the energy and environmental efficiency of operation of oil and gas facilities.

As an alternative source of energy, the solar radiation using was considered. The arrival of solar radiation in different cities can significantly differ from each other. It depends on the geographical location. The article presents the results of the analysis of the introduction of a solar hot water supply installation at oil and gas facilities (for example, oil pumping stations located in various latitudes of the Russian Federation and the CIS). For installation, vacuum solar collectors were adopted, which have a number of advantages over flat collectors.

The total area of solar collectors depends on many factors (efficiency, solar radiation intensity, collector installation angle, ambient temperature, etc.), therefore, in determining the payback period of such installations, labor-intensive calculations must be carried out.

As a result of the analysis, a formula to determine the area of the solar collector, depending only on the intensity of the incidence of solar radiation in the locality was obtained. Dependence will significantly shorten the time to determine the economic feasibility of using solar hot water installations.

**Key words:** non-traditional and renewable energy sources, alternative power engineering, solar energy, solar heat supply system, solar radiation, solar collector, solar collector area, solar collector efficiency.

С каждым годом проблема альтернативы применения углеводородного сырья в топливно-энергетическом комплексе (ТЭК) становится все более актуальной. Это связано с тем, что запасы угля, нефти и газа истощаются, а их добыча становится дороже.

Применение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является одним из наиболее перспективных вариантов замены традиционной энергетики. К альтернативным источникам относятся: солнечная, ветровая, геотермальная, энергия морских волн, приливов и океана, а также энергия биомассы. Мировой экономический потенциал ВИЭ оценивается в 20 млрд т у.т/год, что в два

раза превышает объем годовой добычи всех видов органического топлива. В связи с этим, по оценке специалистов, доля производимой электроэнергии на основе альтернативных источников в мире достигнет к 2020 г. 13 %, а к 2060 г. — 33 % [1].

Отказ от ориентации на один, возможно даже не ограниченный и дорогой традиционный энергоресурс, составляет основную цель энергетических политик как развитых (Германия, США, Дания, Греция, Голландия), так и развивающихся (Китай, Бразилия, Индия) стран. В 2017 году мировым лидером в использовании альтернативной энергетики

стал Китай, обойдя при этом США и страны Евросоюза [2].

В России, несмотря на мировое лидерство по запасам природного газа, до сих пор существуют регионы, в которых выработка электроэнергии осуществляется электростанциями, работающими на привозном дизельном топливе. Стоимость 1 кВт·ч такой электроэнергии составляет около 8 руб. Установка ветроэнергетической электростанции в таких районах позволит снизить цену на электроэнергию до 1,5–2,0 руб./кВт·ч. С этой точки зрения развитие ВИЭ в России имеет весьма широкие и основательные перспективы. Однако законодательная поддержка государства начала проявляться только с начала XXI века. В 2007 г. в Федеральный Закон «Об электроэнергетике» № 35-ФЗ были внесены поправки, направленные на развитие альтернативной энергетики. А в 2009 году принята новая «Энергетическая стратегия России до 2030 года», согласно которой доля возобновляемых источников к 2030 году должна достигнуть 11 % [3].

В 2008 году Министерство промышленности и энергетики РФ провело региональное анкетирование «О состоянии и перспективах развития ВИЭ в Российской Федерации» (Письмо № АД-3315/09 от 15.05.2008). При проведении опроса было выявлено следующее [4]:

— экономический потенциал ВИЭ составляет 1/3 от общего потребления насе-

лением и промышленностью России первичных энергоресурсов, при этом реализуется лишь 3,5 % от экономического потенциала ВИЭ;

— на момент проведения опроса общая площадь солнечных коллекторов России составляла только 7827 м<sup>2</sup>, основная часть которой приходилась на Краснодарский край (рисунок 1);

— на тот момент времени в России было произведено 3433 тыс. м<sup>3</sup> биогаза (более 60 % — в Республике Дагестан);

— из 130 намеченных к реализации проектов по использованию ВИЭ на момент 2008 года фактически было реализовано лишь 13, т.е. 1/10 часть проектов.

Таким образом, основные проблемы, препятствующие развитию возобновляемой энергетики:

— недостаток финансирования и отсутствие инвесторов;

— отсутствие нормативно-правовой базы;

— высокая себестоимость энергии, получаемой от ВИЭ, и высокие удельные капитальные вложения;

— отсутствие государственных программ;

— отсутствие массового выпуска и отечественных производителей оборудования для ВИЭ;

— отсутствие квалифицированных кадров.

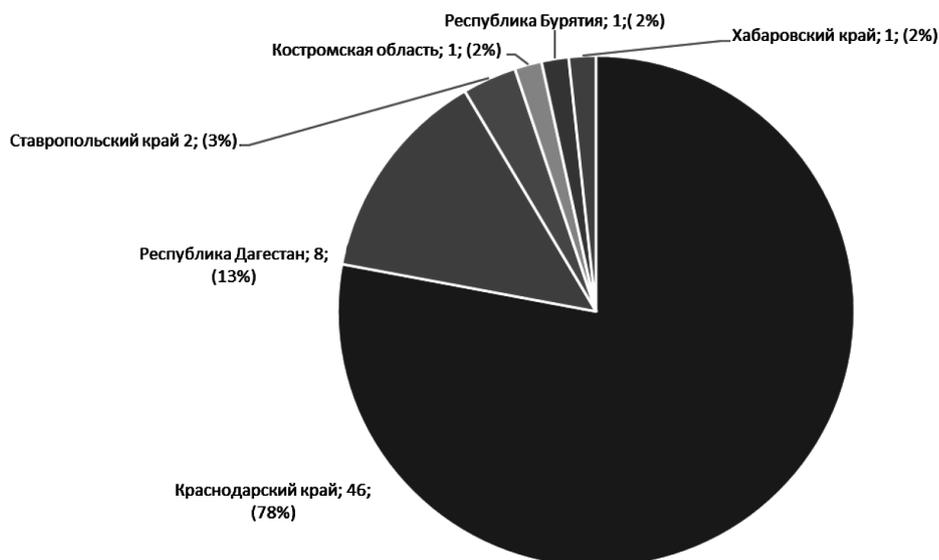


Рисунок 1. Распределение солнечных коллекторов по районам

Основным потребителем электрической и тепловой энергии является нефтегазовая отрасль. Рассмотрим возможность внедрения альтернативной энергетики на предприятиях ТЭК на примере нефтеперекачивающих станций (НПС).

Нефтеперекачивающая станция представляет собой комплекс сооружений и оборудования для обеспечения приема, накопления, перекачки нефти по магистральному нефтепроводу. Основным источником теплоснабжения на НПС является котельная, работающая на органическом топливе: газе, мазуте или нефти.

В качестве альтернативы применения традиционного топлива рассмотрим солнечную энергию. Солнечное излучение, поступающее за неделю на территорию России, превышает энергию всех российских ресурсов нефти, газа, угля. На рисунках 2 и 3 изображено распределение солнечной радиации на территориях России и СНГ соответственно.

Преимуществами применения солнечной энергии по сравнению с традиционными видами являются следующие [5, 6]:

- неограниченный запас;
- бесплатный ресурс;
- бесшумность;
- безвредная выработка электроэнергии;
- автономные системы энергоснабжения безопасны и высоконадежны;

- несложное обслуживание оборудования;
- возможность использования электричества в отдаленных районах;
- увеличение надёжности энергоснабжения страны.

Солнечная энергия может быть использована для нагрева теплоносителя на нужды отопления, вентиляции и горячего водоснабжения (ГВС). Для покрытия нагрузки на отопление и вентиляцию необходимо сооружать сложные и дорогостоящие системы, которые, в свою очередь, требуют больших площадей для размещения солнечных приемников — гелиостатов. Поэтому в статье будет рассмотрен вариант установки солнечного горячего водоснабжения на одно из зданий НПС.

Предполагаем, что на всех станциях существуют здания с идентичными параметрами, в которых располагаются душевые комнаты для персонала. Количество персонала, использующего данные помещения, также принимается одинаковым для всех рассматриваемых площадок.

Для расчета были выбраны города, расположенные в различных широтах, как на территории России, так и на территории СНГ. На рисунке 4 представлено сравнение поступления солнечной радиации для выбранных городов.



Рисунок 2. Распределение солнечной радиации на территории России

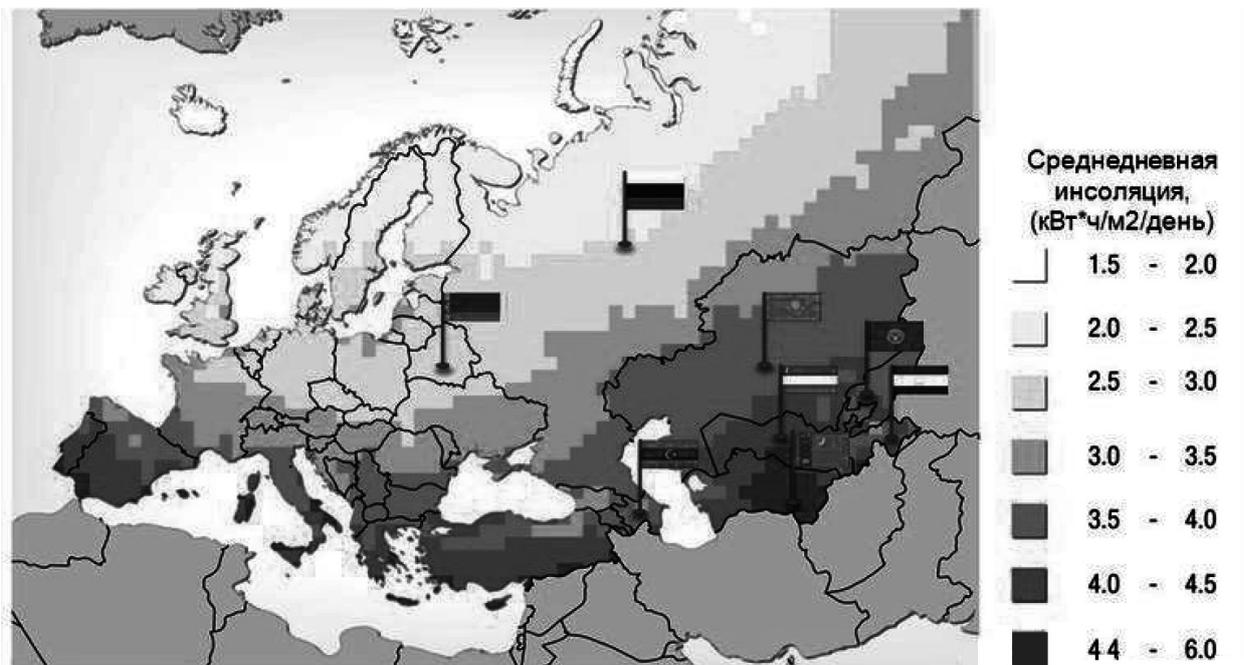


Рисунок 3. Распределение солнечной радиации на территории СНГ

Из анализа рисунка 4 видно, что наибольшее поступление солнечной радиации в зимний период приходится на города Владивосток, Краснодар, Баку и Кызылорда, а наименьшее — на Новый Уренгой. В летний период поступление солнечной радиации в рассматриваемых городах примерно одинаковое и варьируется в диапазоне от 230 до 250 кВт · ч/м<sup>2</sup>.

В качестве установки принята система горячего водоснабжения с баком-аккумулятором и резервным источником (электрическим ТЭНом). В связи с тем, что рассматривается возможность внедрения солнечных коллекторов (СК) также и в городах, где преобладают низкие температуры окружающего воздуха, были подобраны вакуумные солнечные коллекторы EG 390. Такие СК имеют ряд преимуществ по сравнению с плоскими коллекторами:

- низкие теплотери;
- работоспособность в холодное время года до минус 35 °С;
- способность обеззараживать воду;
- длительный период работы в течение суток;
- удобство монтажа и транспортировки, высокая надёжность [7].

Также был подобран бак-аккумулятор ACVLCAP объемом 1500 л. Его стоимость 162 тыс. руб./шт.

Расчет проводился в соответствии с [8, 9]. В таблице 1 приведены результаты расчета установки солнечного горячего водоснабжения.

Нефтеперекачивающие станции зачастую располагаются в районах, удаленных от проходящих сетей газораспределения, поэтому топливом для котельных на таких объектах является мазут или товарная нефть. Таким образом, использование солнечной энергии помимо уменьшения затрат на топливо при эксплуатации котельных позволит также снизить выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду (особенно при сжигании жидкого топлива) (таблица 1).

Площадь СК рассчитывается по формуле [8]:

$$A = \frac{G \cdot c(t_{w2} - t_{w1})}{\eta \cdot I_T}, \quad (1)$$

где  $G$  — расход теплоносителя, кг/с;

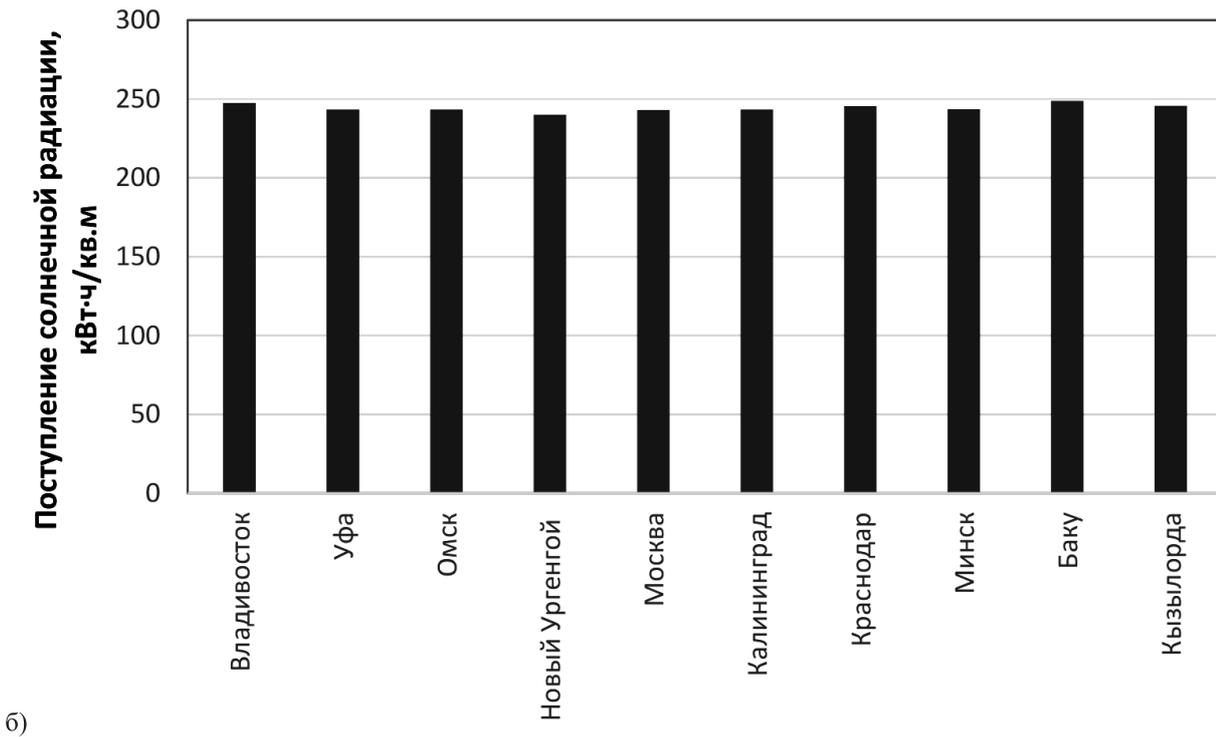
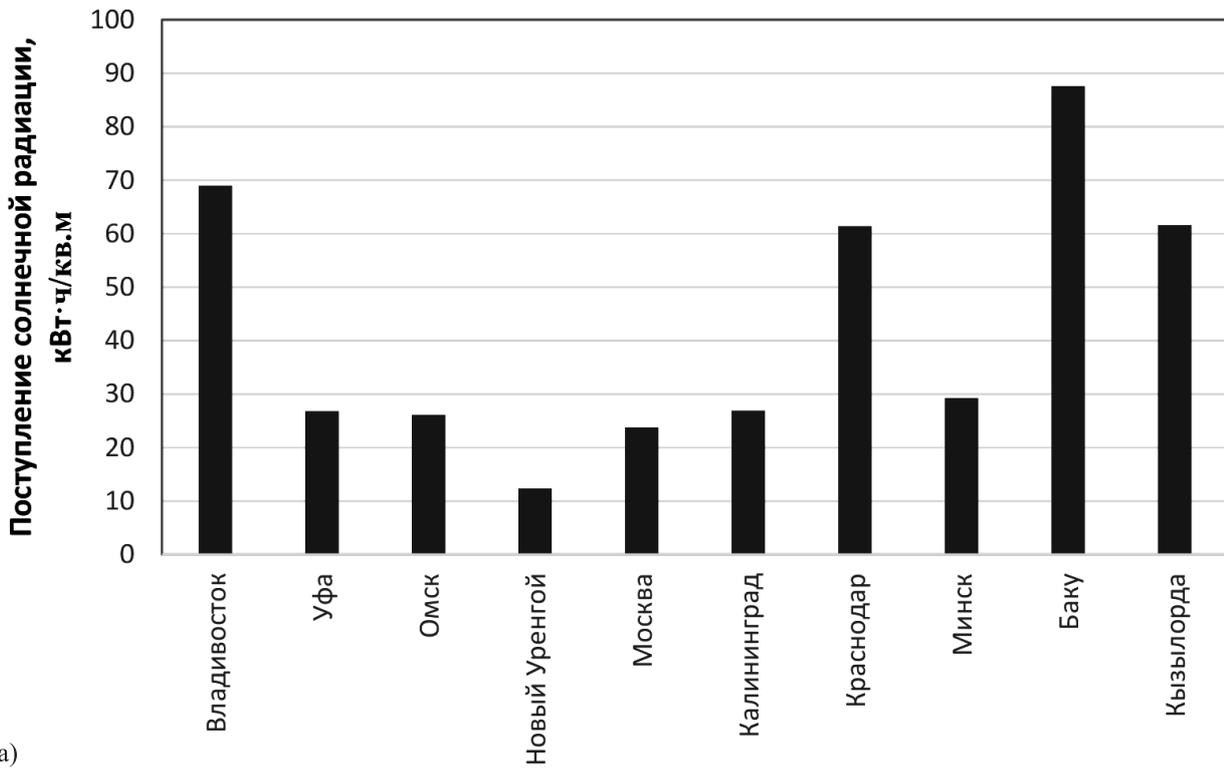
$c$  — удельная массовая теплоемкость теплоносителя, кДж/(кг · К);

$t_{w2}, t_{w1}$  — температуры теплоносителя на выходе и входе солнечного коллектора соответственно, °С;

$\eta$  — КПД солнечного коллектора;

$I_T$  — среднемесячный дневной приход суммарной солнечной радиации, кДж/(м<sup>2</sup> · сут).

Из формулы (1) видно, что площадь зависит от КПД коллектора и величины



а) январь; б) июнь

Рисунок 4. Поступление солнечной радиации

Таблица 1. Результаты расчетов солнечного горячего водоснабжения

Наименование	Владивосток	Уфа	Омск	Новый Уренгой	Москва	Калининград	Краснодар	Минск	Баку	Кызылорда
Широта	43° 07'00"	54° 44'00"	54° 58'00"	66° 05'05"	55° 45'21"	54° 42'23"	45° 02'41"	53° 55'00"	40° 21'59"	44° 51'00"
Разность температур между теплоносителем и окружающей средой, °С	72,3	72,4	76,3	86,0	68,0	61,5	59,4	64,5	56,0	68,0
Температура холодной воды ( $t_h$ ), °С	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Температура горячей воды ( $t_r$ ), °С	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Коэффициент положения СК для солнечной радиации ( $P_o$ )	0,94	0,75	0,68	0,58	0,67	0,68	0,75	0,68	0,71	0,75
Интенсивность падающей солнечной радиации в плоскости коллектора ( $q_i$ ), Вт/м <sup>2</sup>	7555	3601	3515	3800	3280	3616	6920	3844	9323	6898
Расход горячей воды (G) в сутки, м <sup>3</sup> /сут	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Суммарное количество теплоты (q), кДж	3329,82	3329,82	3329,82	3329,82	3329,82	3329,82	3329,82	3329,82	3329,82	3329,82
Количество сэкономленного топлива (dB), ГДж/год	158653,66	158653,66	161094,48	163611,59	134245,40	149587,74	149587,74	153987,38	136877,67	156285,69
Количество сэкономленного топлива в денежном выражении (dPr), руб./год	793268,30	793268,30	805472,42	818057,93	671227,02	747938,68	747938,68	769936,88	684388,33	781428,47
КПД СК	0,66	0,66	0,65	0,64	0,78	0,70	0,70	0,68	0,765	0,67
Площадь солнцепоглощающей поверхности установок (A), м <sup>2</sup>	56,72	119,00	123,78	116,29	110,53	111,75	58,39	108,21	39,65	61,19
Число необходимых коллекторов (n), шт.	39,25	82,35	85,66	80,48	76,49	77,33	40,41	74,89	27,44	42,35
Капитальные затраты (L), руб.	6808648,0	14127944,6	14638593,2	13787512,2	13106647,4	13276863,6	6978864,2	12766215,0	4766053,6	7319296,6
Суммарный объём баков-аккумуляторов (V), м <sup>3</sup>	4,54	9,52	9,90	9,30	8,84	8,94	4,67	8,66	3,172	4,90
Полный расход (G), м <sup>3</sup> /ч	1,25	2,62	2,72	2,56	2,43	2,46	1,28	2,38	0,872	1,35
Скорость движения теплоносителя в проходных сечениях элеваторов каждой подгруппы БА (w), м/с	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Площадь поверхности бака (FБА), м <sup>2</sup>	10,87	10,87	10,87	10,87	10,87	10,87	10,87	10,87	10,87	10,87
Количество аккумулируемой теплоты (Q <sub>1</sub> ), кДж	282825	282825	282825	282825	282825	282825	282825	282825	282825	282825
Допустимые потери теплоты (Q <sub>2</sub> ), кДж/ч	589,22	589,22	589,22	589,22	589,22	589,22	589,22	589,22	589,22	589,22
Коэффициент теплопередачи (κ), Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	0,292	0,292	0,292	0,292	0,292	0,292	0,292	0,292	0,292	0,292
Толщина слоя, м	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Среднее количество солнечных часов в сутки в месяце с наименьшей солнечной радиацией	9,13	7,44	7,43	3,25	7,24	7,44	8,87	7,61	9,40	8,93
Срок окупаемости системы, лет	8,79	18,01	18,38	17,05	19,77	17,97	9,55	16,80	7,20	9,57

поступающей солнечной радиации, а КПД СК, в свою очередь, зависит от многих факторов (интенсивности солнечной радиации в данной местности, угла установки солнечного коллектора, температуры окружающего воздуха и т.д.).

На рисунке 5 приведена зависимость площади коллектора от интенсивности падения солнечной радиации.

Согласно рисунку 5, была получена зависимость для расчета площади солнечного коллектора:

$$A = 535811 \cdot I^{-1,031} \quad (2)$$

В таблице 2 приведен расчет погрешности вычисления по выведенной формуле.

Как видно из таблицы 2, максимальная погрешность составляет 15 %. Также были

произведены расчеты площади солнечных коллекторов по формуле (2) и по [8, 9] для трех других городов. В таблице 3 представлены полученные результаты.

Из таблицы 3 видно, что погрешность расчетов для других городов составляет не более 8 %.

**Вывод**

Несмотря на достаточно большую погрешность определения площади, формула (2) позволяет выполнять приблизительные расчеты требуемой площади солнечных коллекторов. Это существенно снизит трудозатраты для определения срока окупаемости и рентабельности внедрения солнечных коллекторов не только в нефтегазовой отрасли.

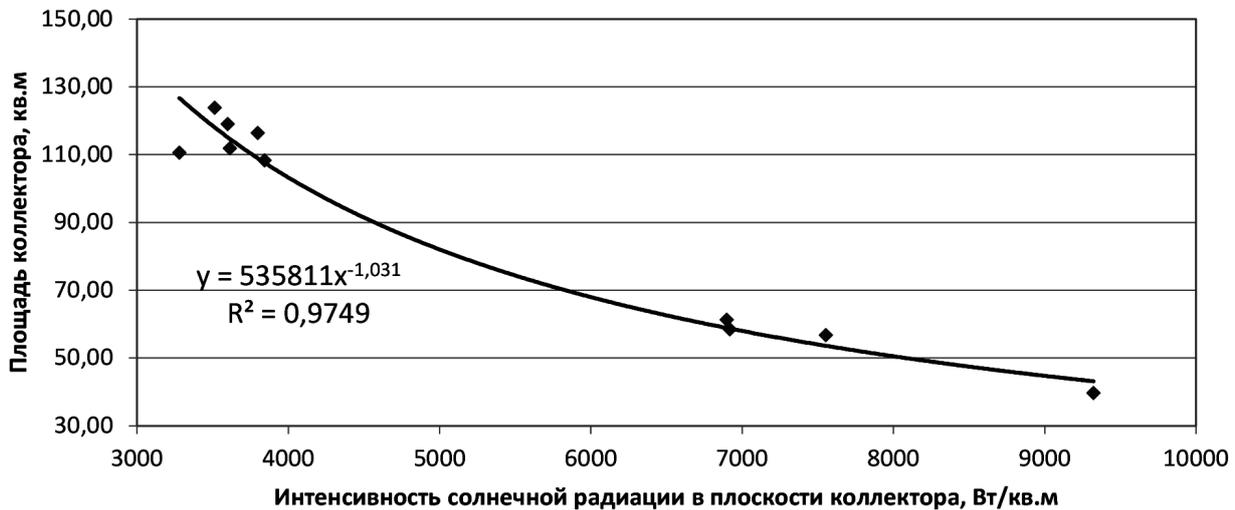


Рисунок 5. Зависимость солнечного коллектора от интенсивности падения солнечной радиации в плоскости коллектора

Таблица 2. Погрешность вычисления

№ п/п	Город	По формуле (2)	По [8, 9]	Погрешность, %
1	Владивосток	56,7	53,8	5,2
2	Уфа	119,0	115,4	3,0
3	Омск	123,8	118,3	4,4
4	Новый Уренгой	116,3	109,2	6,1
5	Москва	110,5	127,1	15,0
6	Калининград	111,7	115,0	2,9
7	Краснодар	58,4	58,9	0,8
8	Минск	108,2	107,9	0,3
9	Баку	79,6	43,3	9,2
10	Кызылорда	61,2	59,1	3,5

Таблица 3. Сравнение расчетных данных

№ п/п	Город	По формуле (2)	По [8, 9]	Погрешность, %
1	Ташкент	49,9	48,2	7,4
2	Сургут	205,7	217,3	4,1
3	Тимяшево	117,9	114,4	3,0

### Список литературы

1. Бубенчиков А.А., Нурахмет Е.Е., Руденко А.И., Молодых В.О. Солнечная энергия как источник электрической энергии // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. Вып. 5 (47) Ч. 3. С. 59–62.
2. Список стран-лидеров альтернативной энергетики // Российская газета [Электронный ресурс]. 2017. Режим доступа: <https://rg.ru/2017/02/15/opublikovan-spisok-stran-liderov-alternativnoj-energetiki.html>. (дата обращения: 05.12.2017).
3. Энергетическая стратегия России до 2030 года: утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р.
4. Федеральный закон от 26 марта 2003 г. N 35-ФЗ «Об электроэнергетике» (с изменениями и дополнениями).
5. Зайцева М.Л. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии: из прошлого через настоящее в будущее. Нижний Новгород, 2012. [http://masters.donntu.org/2015/etf/mukha/library/article\\_9.htm](http://masters.donntu.org/2015/etf/mukha/library/article_9.htm).
6. Матрунчик А.С., Бурков А.И. Использование солнечной энергии в системах горячего водоснабжения Using of the Solar Energy in Hot Water Systems // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2015. № 2. С. 237–247.
7. Сравнительная таблица достоинств и недостатков вакуумных и плоских солнечных коллекторов / ООО ПК «АНДИ-Групп [Электронный ресурс]. 2017. Режим доступа: [http://solar-kollektor.ru/solnechnye\\_kollektor/sravnenie.htm](http://solar-kollektor.ru/solnechnye_kollektor/sravnenie.htm). (дата обращения: 05.12.2017).
8. РД 34.20.115-89. Методические указания по расчету и проектированию систем солнечного обогрева.
9. ВСН 52-86. Установки горячего солнечного водоснабжения. Нормы проектирования.

### References

1. Bubenchikov A.A., Nurakhmet Ye.Ye., Rudenok A.I., Molodykh V.O. Solar Power as Sources of Electrical Energy. *International Scientific and Research Journal*, 2016, Issue 5 (47), P. 3, pp. 59–62. [in Russian].
2. List of Countries-Leaders of Alternative Energy. *Rossiyskaya Gazeta* [Electronic Resource]. 2017. Available at: <https://rg.ru/2017/02/15/opublikovan-spisok-stran-liderov-alternativnoj-energetiki.html>. (accessed 05.12.2017). [in Russian].
3. *Energy Strategy of Russia until 2030: Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dd. November 13, 2009 No. 1715-p*. [in Russian].
4. *Federal Law dd. March 26, 2003 N 35-FZ «On Electricity»* (with amendments and additions). [in Russian].
5. Zaytseva M.L. *Non-Traditional Renewable Energy Sources: from the Past through the Present to the Future*. Nizhniy Novgorod, 2012. [http://masters.donntu.org/2015/etf/mukha/library/article\\_9.htm](http://masters.donntu.org/2015/etf/mukha/library/article_9.htm). [in Russian].
6. Matrunchik A.S., Burkov A.I. Using of the Solar Energy in Hot Water Systems. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*, 2015, No. 2, pp. 237–247. [in Russian].
7. *Comparative Table of Advantages and Disadvantages of Vacuum and Flat Solar Collectors*. PC ANDI-Group LLC [Electronic Resource]. 2017. Available at: [http://solar-kollektor.ru/solnechnye\\_kollektor/sravnenie.htm](http://solar-kollektor.ru/solnechnye_kollektor/sravnenie.htm). (accessed 05.12.2017). [in Russian].
8. RD 34.20.115-89. *Methodical Guidelines for the Calculation and Design of Solar Heating Systems*. [in Russian].
9. VSN 52-86. *Installations of Hot Solar Water Supply. Design Standards*. [in Russian].



**Мустафаев В. А.**  
**Mustafaev V. A.**

*доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Информатика»,  
Сумгаитский государственный  
университет,  
г. Сумгаит, Азербайджанская Республика*



**Салманова М. Н.**  
**Salmanova M. N.**

*аспирант кафедры «Информатика»,  
Сумгаитский государственный  
университет,  
г. Сумгаит, Азербайджанская Республика*

УДК 519.95

## **МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ МЕХАНООБРАБОТКИ В ВИДЕ РАСКРАШЕННЫХ ВРЕМЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ**

В работе рассмотрены раскрашенные временные сети Петри (РВСП), являющиеся сетями более высокого уровня и позволяющие, по сравнению с обычными сетями Петри (СП), анализировать дополнительные свойства моделируемых процессов без усложнения структуры сети. Показано, что сложность реальных систем, параллелизм процессов, взаимные синхронизации и блокировки вызывают необходимость расширения выразительных средств в моделировании, что приводит к разработке новых расширенных модификаций СП и усовершенствованию существующих. Во временных сетях переходы срабатывают с некоторой задержкой, а маркеры находятся в позициях определенное время, что дает возможность моделирования не только последовательности событий, но и их привязки ко времени. РВСП, используемые в моделировании, объединяют в себе достоинства как раскрашенных, так и временных сетей. Разработан алгоритм функционирования РВСП. Предложенный алгоритм обеспечивает эффективную форму представления структуры, динамики состояния моделей, пространство достижимых состояний и последовательность срабатывания переходов в виде совокупности векторов и матриц. Определяют распределение цветов маркеров по входным и выходным позициям переходов сети, решают задачи разрешимости срабатывания переходов, находящихся в состоянии конфликта, упрощают и ускоряют процесс моделирования. Созданы модели модулей обрабатывающего центра и транспортного манипулятора в гибкой производственной системе механообработки. Построение моделей в виде РВСП основано на множестве событий и условий, а также на некоторых очевидных причинно-следственных связях. В результате симуляции получено дерево достижимости в виде последовательности матриц. Произведен анализ модели на основе свойств РВСП.

**Ключевые слова:** модель, алгоритм, раскрашенные временные сети Петри, функция распределения цветов, симуляция модели, обрабатывающий центр, транспортный манипулятор.

## **MODEL OF FUNCTIONING OF PRODUCTION SYSTEM OF MECHANICAL PROCESSING IN THE FORM OF COLORED TIMED PETRI NETS**

Painted colored timed Petri nets (CTPN) are considered, which are networks of a higher level and allow, in comparison with conventional Petri networks (PN), to analyze additional properties of simulated processes without complicating the network structure. It is shown that the complexity

of real systems, the parallelism of processes, mutual synchronization and blocking make it necessary to expand the expressive means in modeling, which leads to the development of new extended modifications of PN and the improvement of existing ones. In time networks, transitions are triggered with some delay, and the markers are in positions for a certain time, which makes it possible to model not only the sequence of events, but also their time reference. CTPN, used in modeling, combine the advantages of both colored and temporary networks. An algorithm for the functioning of the CTPN was developed. The proposed algorithm provides an effective form of representation of the structure, dynamics of the state of models, the space of achievable states and the sequence of triggering transitions in the form of a set of vectors and matrices. the distribution of colors of markers at input and output positions of network transitions was defined, problems of the solvability of triggering of transitions in a state of conflict were solved, the process of modeling was simplified and accelerated. Models of the processing center and transport manipulator modules in a flexible production system for mechanical processing have been created. The construction of models in the form of a CTPN is based on many events and conditions, as well as on some obvious cause-effect relationships. As a result of the simulation, a reachable tree is received in the form of a sequence of matrices. The model is analyzed on the basis of the properties of the CTPN.

**Key words:** model, algorithm, colored timed Petri nets, color distribution function, model simulation, processing center, transport manipulator.

### *Введение*

Модели динамических взаимодействующих процессов можно описывать дифференциальными уравнениями в непрерывном времени, уравнениями в конечных разностях и конечными автоматами в дискретном времени [1]. В нерегулярном (событийном) времени лишь в считанные моменты в системе происходят события, изменяющие состояние, поэтому они почти не поддаются аналитическому описанию, и в таких случаях наиболее мощными инструментами являются сетевые автоматы и производственные системы [2].

Моделирование сетевыми автоматами и производственными системами в значительной степени ориентировано на детерминированные и стохастические процессы, которые не позволяют в явном виде учитывать параллелизм и динамику взаимодействия, описывать множество параметров и особенностей предметной области [3]. Инструментом для них являются модели на расширенных сетях Петри (СП), которые в определенных случаях могут служить основой для имитационных моделей. СП имеют ряд недостатков, ограничивающих их возможности. К недостаткам выразительных возможностей СП относятся [4]: непригодность для моделирования событий с приоритетами; отсутствие в структуре формальных конструктивных средств, упрощающих программирование моделей; при моделировании сложных распределенных систем значительно превышает число позиций и переходов, необходимых для

описания моделируемого объекта, что значительно усложняет процесс моделирования; отсутствие в явном виде временных параметров. Перспективно в данном случае применение математического аппарата раскрашенных временных сетей Петри (РВСП) [5].

РВСП отражают последовательность событий, позволяют проследить потоки информации, отражают взаимодействие параллельных процессов, позволяют одновременно моделировать несколько параллельных событий в процессе функционирования сложных систем [6]. В аналогичных моделях на основе обычных СП приходится искусственно вводить дополнительные позиции, не являющиеся отображениями элементов процесса, служащие для упорядочения запусков переходов сети, что усложняет пространственную структуру модели и затрудняет ее интерпретацию. РВСП дают возможность значительно сократить число позиций и переходов, что ускоряет процесс моделирования. В отличие от «классических» СП, в РВСП немаловажную роль играет типизация данных, основанная на понятии множества цветов, которая аналогична типизации в декларативных языках программирования [7]. В связи с этим в статье представлены в виде РВСП модели функционирования транспортного манипулятора и обрабатывающего центра в гибкой производственной системе механообработки. Разработан алгоритм функционирования РВСП.

*Правила срабатывания переходов и алгоритм функционирования раскрашенных временных сетей Петри*

Обобщенная РВСП формально определяется как набор вида [8, 9]  $C = (N, R, \Lambda, \Phi, \Psi, Z, S, \mu_0)$ , где  $N = (P, T, I, O)$  структура раскрашенной сети Петри;  $P = \{p_i\}$ , ( $i = 1, \dots, n$ ;  $n$  — число позиций)  $T = \{t_j\}$ , ( $j = 1, \dots, m$ ;  $m$  — непустое конечное множество позиций; число переходов) — непустое конечное множество переходов;  $I: P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ ;  $O: T \times P \rightarrow \{0, 1\}$  — соответственно входная и выходная функции переходов;  $R = \{r_i\}$ , ( $i = 1, \dots, k$ ;  $k$  — число цветов) — непустое конечное множество цветов позиций и маркеров;  $\Phi: (P \times R) \times T \rightarrow (0, 1)$  и  $\Psi: T \times (P \times R) \rightarrow (0, 1)$  — функция распределения цветов маркеров соответственно по входным и выходным позициям переходов сети;  $\Lambda$  — функция распределения цветов по позициям сети;  $Z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$  — вектор параметров временных задержек маркеров в позициях РВСП;  $S = (s_1, s_2, \dots, s_m)$  — вектор параметров времен срабатывания разрешенных переходов;  $\mu_0$  — начальная маркировка сети. Функции  $\Phi$  и  $\Psi$  задают законы срабатывания переходов и определяют распределения цветов маркеров по позициям сети в процессе ее функционирования.

Маркеры в позициях могут находиться в двух состояниях — доступном и недоступном, т.е. на маркеры в позициях действует временные задержки. По истечении времени блокировки маркеры переходят в выходные позиции разрешенных незаблокированных переходов  $t_j$  в период времени  $s_j$  по следующим правилам:

— для каждой из входных позиций перехода  $t_j$  по формуле:

$$\mu^{k+1}(p_i, r_l) = \mu^k(p_i, r_l) - \varphi(p_i, r_l) \cdot I(p_i, t_j),$$

$$i = \overline{1, |I(t_j)|}, l = \overline{1, k};$$

— для каждой из выходных позиций перехода  $t_j$  по формуле:

$$\mu^{k+1}(p_i, r_l) = \mu^k(p_i, r_l) + \varphi(p_i, r_l) \cdot O(t_j, p_i),$$

$$i = \overline{1, |O(t_j)|}, l = \overline{1, k}.$$

Каждый маркер, совершивший переход из  $p_i \in I(t_j)$  в  $p_r \in O(t_j)$ , будет недоступным в позиции  $p_r$  в течение времени  $z_r$ , начиная с момента его появления в  $p_r$  ( $z_r$  — время блокировки маркера в позиции  $p_r$ , по истечении которого маркер снова становится доступным).

Функционирование сети представляет собой процесс изменения её маркировки в результате запусков и завершений переходов. Переход завершается через  $\tau_j$  тактов времени после запуска.

Время рассматривается не как абсолютная величина, а как временные единицы, т.е. часы, секунды, наносекунды и т.д.

Учитывая вышеизложенное, разработан алгоритм функционирования РВСП.

*Начало алгоритма*

Шаг 1. Создание матрицы входных инцидентий  $D^- = [d_{ij}^-]$ , где  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$  ( $n$  — число позиций;  $m$  — число переходов). Элемент  $d_{ij}^-$  равен числу дуг от  $i$ -й позиции к  $j$ -му переходу:

$$d_{ij}^- = \begin{cases} 1, & \text{если } p_i \in I(t_j); \\ 0, & \text{если } p_i \notin I(t_j). \end{cases}$$

Шаг 2. Создание матрицы выходных инцидентий  $D^+ = [d_{ij}^+]$ , где  $j = \overline{1, m}$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Элемент  $d_{ij}^+$  равен числу дуг от  $j$ -го перехода к  $i$ -й позиции:

$$d_{ij}^+ = \begin{cases} 1, & \text{если } p_i \in O(t_j); \\ 0, & \text{если } p_i \notin O(t_j). \end{cases}$$

Шаг 3. Создание матрицы начальной маркировки  $M = [\mu_{il}]$ , где  $i = \overline{1, n}$ ,  $l = \overline{1, k}$  ( $k$  — число цветов). Элемент  $\mu_{il}$  равен числу маркеров цвета  $r_l$  в позиции  $p_i$ .

Шаг 4. Создание матрицы распределения цветов по позициям  $\Lambda = [\lambda_{il}]$ , где  $i = \overline{1, n}$ ,  $l = \overline{1, k}$ :

$$\lambda_{il} = \begin{cases} 1, & \text{если } (p_i \cdot r_l) \in R; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 5. Создание матрицы распределения цветов маркеров по входным позициям переходов  $\Phi = [\varphi_{jl}]$ , где  $j = \overline{1, m}$ ,  $l = \overline{1, k}$ :

$$\varphi_{jl} = \begin{cases} 1, & \text{если } (p_j, t_l) = r_l; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 6. Создание матрицы распределения цветов маркеров по выходным позициям переходов  $\Psi = [\psi_{jl}]$ , где  $j = \overline{1, m}$ ,  $l = \overline{1, k}$ :

$$\psi_{jl} = \begin{cases} 1, & \text{если } (t_j, p_l) = r_l; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 7. Создание вектора задержек маркеров в позициях:  $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ .

Шаг 8. Создание вектора времени срабатывания разрешенных переходов:  $s = (s_1, s_2, \dots, s_m)$ .

Шаг 9. Начальное время функционирования сети  $\tau = 0$ . Время функционирования сети равно  $T$ .

Шаг 10. Поиск разрешенного перехода: для каждого перехода  $t_j, j = \overline{1, m}$  проверяется условие срабатывания:

10.1. Из матрицы  $D^- = [d_{ij}^-]$  определяются все входные позиции перехода  $t_j: p_{i_1}, p_{i_2}, \dots, p_{i_q}, q = |I(t_j)|$ ;

10.2. Из матрицы  $\Phi$  определяются все доступные распределения цветов по входным позициям  $t_j: r_{i_1}, r_{i_2}, \dots, r_{i_q}, i \in [1, k]$ ;

10.3. Из матрицы  $M$  выбираются числа установленного цвета маркеров во всех определенных входных позициях перехода  $t_j$ :

$$\mu_{i_q, l_v} = (p_{i_q}, r_{l_v}), q = \overline{1, |I(t_j)|}, v = \overline{1, k};$$

10.4. Если для  $\forall i_q$  существует  $\exists l_v$ , при этом  $\mu_{i_q, l_v} \geq d_{i_q, l_v}^-$ , то переход  $t_j$  разрешен, и выполняется переход к шагу 12.

Шаг 11. Если для перехода  $t_j$  условие срабатывания не выполняется, то индекс  $j$  увеличивается на единицу:  $j = j + 1$ . Если  $j \leq m$ , то осуществляется переход к п. 10.1, в противном случае сообщается о тупиковом состоянии и осуществляется переход к концу алгоритма.

Шаг 12. Нахождение максимального времени блокировок маркеров входных позиций перехода  $t_j$ :

12.1.  $z_{\max} = 0$ ;

12.2. если для всех  $p_i \in I(t_j)$ , выполняется условие  $z_i > z_{\max}$ , то полагают  $z_{\max} = z_i$ .

Шаг 13. Вычисляется время срабатывания перехода  $t_j$ :

$$\tau = \tau + z_{\max} + s_j.$$

Шаг 14. Если  $\tau < T$ , то осуществляется переход к шагу 15, в противном случае время функционирования сети завершается и осуществляется переход к концу алгоритма.

Шаг 15. Вычисление элементов матрицы новой маркировки  $M'$ :

$$\mu'_{i_q, l_v} = \mu_{i_q, l_v} - \varphi_{j l_v} d_{i_q, l_v}^-, q = \overline{1, |I(t_j)|}, v = \overline{1, k};$$

$$\mu'_{i_q, l_v} = \mu_{i_q, l_v} + \psi_{j l_v} d_{j i_q}^+, q = \overline{1, |O(t_j)|}, v = \overline{1, k}.$$

Шаг 16. Переход к шагу 10.

*Конец алгоритма.*

### *Модель функционирования обрабатывающего центра*

В состав гибкой производственной системы механообработки входят три обрабатывающих центра (ОЦ) и транспортно-накопительная система. Транспортирование необработанных и обработанных деталей осуществляет транспортный манипулятор. Накопительная система включает в себе два склада-накопителя: для необработанных и обработанных деталей.

Рассмотрим модель функционирования модуля «обрабатывающий центр» в гибкой производственной системе механообработки. Обрабатывающий центр состоит из одного персонального входного накопителя для необработанных деталей, из устройства 1 и устройства 2, выполняющих две различные операции над деталью, из робота-манипулятора, выполняющего загрузки-разгрузки устройства 1 и устройства 2 соответственно и из персонального выходного накопителя для обработанных деталей. Связь модуля с предыдущим и последующим модулями происходит соответственно с помощью вышеуказанных накопителей.

Модуль работает следующим образом: необработанные детали поступают на входной накопитель и ожидают обработку; при наличии деталей на входном накопителе робот-манипулятор осуществляет загрузку устройства 1; после обработки детали разгружаются; затем осуществляется загрузка устройства 2; после обработки детали происходит разгрузка устройства 2 и цикл повторяется.

В представленной модели, составленной с применением РВСП (рисунок 1), состояние модуля обрабатывающего центра описывается следующими позициями:

$p_1$  и  $p_2$  — обслуживание соответственно устройства 1 и устройства 2;  $p_3$  — входной накопитель необработанных деталей;  $p_4, p_8$  — загрузки соответственно устройства 1 и устройства 2;  $p_5$  и  $p_{10}$  — готовность для выполнения операций с одной деталью соответственно устройства 1 и устройства 2;  $p_6$  и  $p_9$  — завершение обработки детали устройства 1 и устройства 2;  $p_7$  и  $p_{11}$  — соответственно разгрузки устройства 1 и устройства 2;  $p_{12}$  — выходной накопитель обработанных деталей.

Возможные события в модуле обрабатывающего центра описываются следующими переходами:

$t_1$  и  $t_4$  — выполнение загрузки соответственно устройства 1 и устройства 2;  $t_2$  и  $t_5$  — обработка детали соответственно устройства 1 и устройства 2;  $t_3$  и  $t_6$  — выполнение разгрузки соответственно устройства 1 и устройства 2;  $t_7$  — транспортировка детали из выхода устройства 1

к входу устройства 2;  $t_8$  — перемещение робота-манипулятора от устройства 2 к устройству 1.

В разработанной модели имеется шесть цветов:  $r_1$  — робот;  $r_2$  — заготовка 1;  $r_3$  — устройство 1;  $r_4$  — заготовка 2;  $r_5$  — устройство 2;  $r_6$  — изделия.

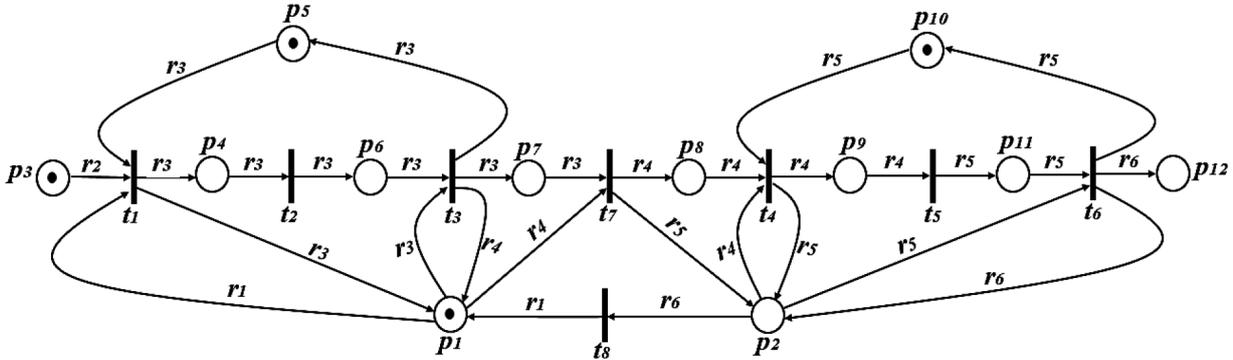


Рисунок 1. Граф модель РВСП «обрабатывающий центр» в гибкой производственной системе механообработки

Функция инцидентности множества позиций представляется матрицей  $D^-(12,8)$ :

$$D^-(8,12) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Функция инцидентности множества переходов представляется матрицей  $D^+(8,12)$ :

$$D^+(8,12) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Матрицы распределения цветов маркеров по входным и выходным позициям переходов представляются матрицами:

$$\Phi(8,6) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \Psi(8,6) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Распределение цветов по позициям и начальная маркировка сети представляются матрицами  $\Lambda(12,6)$  и  $\mu^0(12,6)$ :

$$\Lambda(12,6) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \mu^0(12,6) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Элементы вектора параметров временных задержек маркеров в позициях:

$$Z = (3, 3, 1, 1, 2, 1, 3, 4, 2, 2, 4, 3).$$

Элементы вектора параметров времен срабатывания разрешенных переходов:

$$S = (5, 2, 4, 5, 2, 5, 4, 2).$$

По вышеуказанным начальным данным проведены эксперименты симуляции сети и получены результаты в виде пространства состояний. Определены возможные траектории обслуживания робота-манипулятора параллельно функционирующим обрабатывающим центрам в гибкой производственной системе. Выбрана оптимальная траектория при симуляции модели.

Во время симуляции графа при каждом срабатывании переходов происходят изменения маркировки графа. Маркировка определяет общее состояние системы. Дерево достижимых маркировок делает возможным анализ системы. В результате симуляции получено дерево достижимости в виде последовательности матриц маркировок.

Отраженные в матрицах изменения маркировки приведены в таблице 1 (при начальной маркировке  $\mu_{1,1}^0 = \mu_{3,2}^0 = \mu_{5,3}^0 = \mu_{10,1}^0 = 1$ ).

Последовательность запусков срабатываемых переходов принимает вид  $\sigma = (t_1, t_2, t_3, t_7, t_4, t_5, t_6, t_8)$ .

*Модель функционирования транспортного манипулятора*

**Таблица 1.** Изменения маркировок в матрицах

Срабатываемые переходы	Моменты времени срабатывания переходов	Маркировки
$t_1$	$\tau_{t_1} = 8$	$\mu_{1,3}^1 = 1, \mu_{4,3}^1 = 1, \mu_{10,5}^1 = 1$
$t_2$	$\tau_{t_2} = 11$	$\mu_{1,3}^2 = 1, \mu_{6,3}^2 = 1, \mu_{10,5}^2 = 1$
$t_3$	$\tau_{t_3} = 18$	$\mu_{1,3}^3 = 1, \mu_{1,4}^3 = 1, \mu_{5,3}^3 = 1, \mu_{5,4}^3 = 1, \mu_{7,3}^3 = 1, \mu_{7,4}^3 = 1, \mu_{10,5}^3 = 1$
$t_7$	$\tau_{t_7} = 25$	$\mu_{2,4}^4 = 1, \mu_{2,5}^4 = 1, \mu_{5,3}^4 = 1, \mu_{5,4}^4 = 1, \mu_{7,4}^4 = 1, \mu_{7,5}^4 = 1, \mu_{10,5}^4 = 1$
$t_4$	$\tau_{t_4} = 34$	$\mu_{2,4}^5 = 1, \mu_{5,3}^5 = 1, \mu_{5,4}^5 = 1, \mu_{7,4}^5 = 1, \mu_{7,5}^5 = 1, \mu_{9,4}^5 = 1$
$t_5$	$\tau_{t_5} = 38$	$\mu_{2,4}^6 = 1, \mu_{5,3}^6 = 1, \mu_{5,4}^6 = 1, \mu_{7,4}^6 = 1, \mu_{7,5}^6 = 1, \mu_{11,5}^6 = 1$
$t_6$	$\tau_{t_6} = 47$	$\mu_{2,4}^7 = 1, \mu_{2,5}^7 = 1, \mu_{2,6}^7 = 1, \mu_{5,3}^7 = 1, \mu_{5,4}^7 = 1, \mu_{7,4}^7 = 1,$ $\mu_{7,5}^7 = 1, \mu_{10,5}^7 = 1, \mu_{10,6}^7 = 1, \mu_{12,5}^7 = 1, \mu_{12,6}^7 = 1$
$t_8$	$\tau_{t_8} = 52$	$\mu_{1,1}^8 = 1, \mu_{2,4}^8 = 1, \mu_{2,5}^8 = 1, \mu_{5,3}^8 = 1, \mu_{5,4}^8 = 1, \mu_{7,4}^8 = 1,$ $\mu_{7,5}^8 = 1, \mu_{10,5}^8 = 1, \mu_{10,6}^8 = 1, \mu_{12,5}^8 = 1, \mu_{12,6}^8 = 1$

В граф модели (рисунок 2), составленной с применением РВСП функционирования транспортного манипулятора в гибкой производственной системе механообработки, его состояния описываются следующими позициями:

$p_1$  — транспортный манипулятор, выполняющий загрузки-разгрузки ОЦ1, ОЦ2, ОЦ3;  $p_2, p_3, p_4$  — соответственно входные накопители необработанных деталей ОЦ1, ОЦ2, ОЦ3;  $p_5, p_6, p_7$  — соответственно конец загрузки, начало обработки деталей ОЦ1, ОЦ2, ОЦ3;  $p_8, p_9, p_{10}$  — соответственно конец обработки деталей, начало разгрузки ОЦ1, ОЦ2, ОЦ3;  $p_{11}, p_{12}, p_{13}$  — соответственно блокировки, исключающие загрузки незгруженных ОЦ1, ОЦ2, ОЦ3;  $p_{14}, p_{15}, p_{16}$  — соответственно выходные накопители обработанных деталей ОЦ1, ОЦ2, ОЦ3.

Возможные события при функционировании транспортного манипулятора описываются следующими переходами:

$t_1, t_2, t_3$  — операции загрузки соответственно ОЦ1, ОЦ2, ОЦ3;  $t_4, t_5, t_6$  — обработка деталей соответственно ОЦ1, ОЦ2, ОЦ3;  $t_7, t_8, t_9$  — операции соответственно разгрузки ОЦ1, ОЦ2, ОЦ3.

Функция инцидентности множества позиций представляется матрицей  $D^-(16,9)$ :

$$D^-(9,16) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Функция инцидентности множества переходов представляется матрицей  $D^+(9,16)$ :

$$D^+(9,16) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

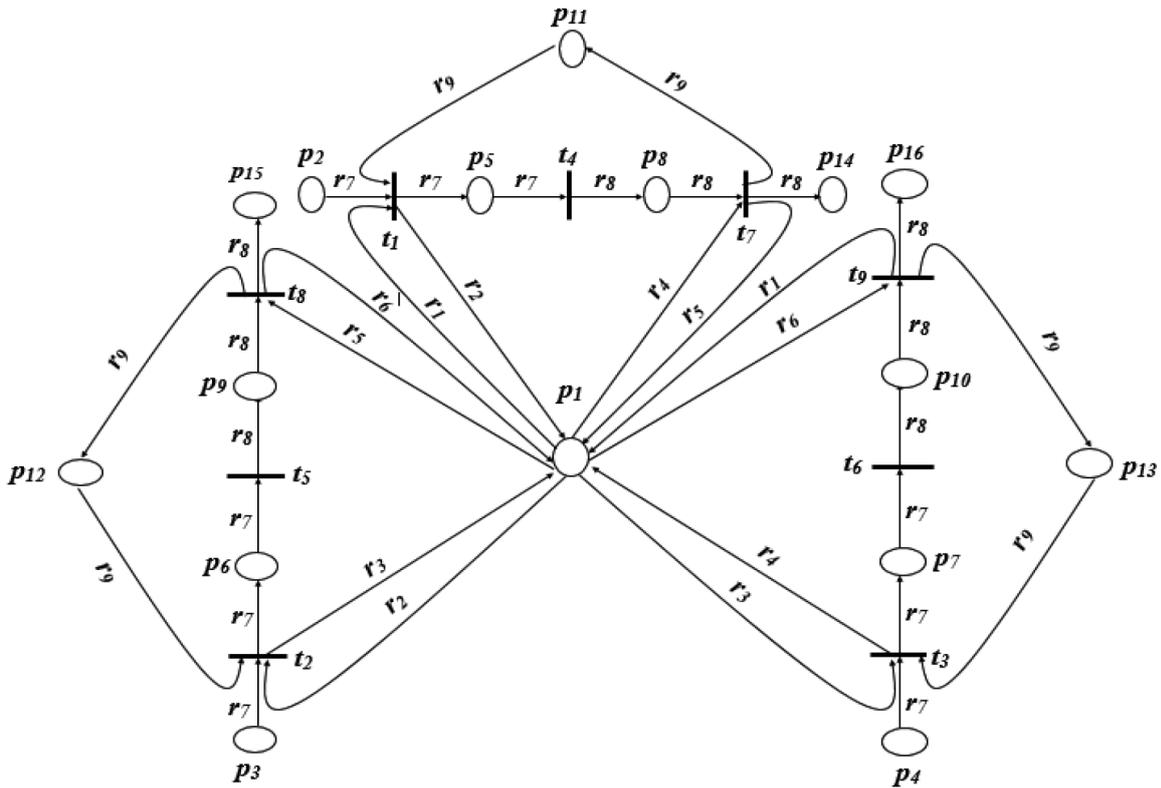


Рисунок 2. Граф-схема модели функционирования транспортного манипулятора

Матрицы распределения цветов маркеров по входным и выходным позициям переходов представляются матрицами:

$$\Phi(9,9) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \Psi(9,9) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Распределения цветов по позициям и начальная маркировка сети представляются матрицами  $\Lambda(16,9)$ :

$$\Lambda(16,9) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \mu^0(16,9) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Элементы вектора параметров временных задержек маркеров в позициях:

$$Z = (3, 3, 1, 1, 2, 1, 3, 4, 2, 2, 4, 3, 6, 3, 4, 7).$$

Элементы вектора параметров времен срабатывания разрешенных переходов:

$$S = (5, 2, 4, 5, 2, 5, 4, 2, 6).$$

В результате компьютерного эксперимента получена последовательность срабатывания переходов  $\sigma = (t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9)$  из начальной маркировки:

$$\begin{aligned} \mu_{1,1}^0 &= \mu_{1,2}^0 = \mu_{1,3}^0 = \mu_{2,7}^0 = \mu_{3,7}^0 = \\ &= \mu_{4,7}^0 = \mu_{11,9}^0 = \mu_{12,9}^0 = \mu_{13,9}^0 = 1. \end{aligned}$$

Отраженные в матрицах изменения маркировки приведены в таблице 2.

В разработанной модели множество цветов, связываемых с метками и дугами сети, описывается с вектором  $R = (r_1, r_2, \dots, r_9)$ . В сети раскрашены метка, имитирующая функционирование обрабатывающих центров, и дуги траектории маршрута транспортного манипулятора. Начальный цвет метки в позиции  $p_1$  равен  $r_1$  и дуга  $(p_1, t_1)$  окрашена цветом  $r_1$ . После срабатывания перехода  $t_1$  метка возвращается в позицию  $p_1$ , имея цвет  $r_2$ , поскольку дуга  $(t_1, p_1)$  раскрашена в цвет  $r_2$ . При этом срабатывается переход  $t_2$ , поскольку дуга раскрашена  $(p_1, t_2)$  в цвет  $r_2$ , после срабатывания перехода  $t_2$  в позицию  $p_1$  метка возвращается,

имея цвет  $r_3$ . Возбуждается переход  $t_3$ , поскольку дуга  $(p_1, t_3)$  раскрашена в цвет  $r_3$ , после срабатывания перехода  $t_3$  в позицию  $p_1$  метка возвращается, имея цвет  $r_4$  поскольку дуга  $(t_3, p_1)$  раскрашена в цвет  $r_4$ .

Раскрашивание дуг обеспечивает возбуждение только одного из переходов, следу-

ющих за  $p_1$ , при любом состоянии системы. При данной раскраске маршрут транспортного манипулятора представлен последовательностью срабатывающих переходов  $t_1, t_2, t_3, t_7, t_8, t_9$ , т.е. происходят загрузки ОЦ1, затем ОЦ2, ОЦ3. После загрузки ОЦ3 следует их разгрузка и цикл повторяется.

**Таблица 2.** Изменения маркировок в матрицах

Срабатываемые переходы	Моменты времени срабатывания переходов	Маркировки
$t_1$	$\tau_{t_1} = 9$	$\mu_{1,2}^1 = 2, \mu_{1,3}^1 = 1, \mu_{1,7}^1 = 1, \mu_{3,7}^1 = 1, \mu_{4,7}^1 = 1, \mu_{5,2}^1 = 1,$ $\mu_{5,7}^1 = 1, \mu_{12,9}^1 = 1, \mu_{13,9}^1 = 1,$
$t_2$	$\tau_{t_2} = 14$	$\mu_{1,2}^2 = 1, \mu_{1,3}^2 = 2, \mu_{1,7}^2 = 1, \mu_{4,7}^2 = 1, \mu_{5,2}^2 = 1, \mu_{5,7}^2 = 1,$ $\mu_{6,3}^2 = 1, \mu_{6,7}^2 = 1, \mu_{13,9}^2 = 1$
$t_3$	$\tau_{t_3} = 24$	$\mu_{1,2}^3 = 1, \mu_{1,3}^3 = 1, \mu_{1,4}^3 = 1, \mu_{1,7}^3 = 1, \mu_{5,2}^3 = 1, \mu_{5,7}^3 = 1,$ $\mu_{6,3}^3 = 1, \mu_{6,7}^3 = 1, \mu_{7,4}^3 = 1, \mu_{7,7}^3 = 1$
$t_4$	$\tau_{t_4} = 31$	$\mu_{1,2}^4 = 1, \mu_{1,3}^4 = 1, \mu_{1,4}^4 = 1, \mu_{1,7}^4 = 1, \mu_{5,2}^4 = 1, \mu_{6,3}^4 = 1,$ $\mu_{6,7}^4 = 1, \mu_{7,4}^4 = 1, \mu_{7,7}^4 = 1, \mu_{8,8}^4 = 1$
$t_5$	$\tau_{t_5} = 34$	$\mu_{1,2}^5 = 1, \mu_{1,3}^5 = 1, \mu_{1,4}^5 = 1, \mu_{1,7}^5 = 1, \mu_{5,2}^5 = 1, \mu_{6,3}^5 = 1,$ $\mu_{7,4}^5 = 1, \mu_{7,7}^5 = 1, \mu_{8,8}^5 = 1, \mu_{9,8}^5 = 1$
$t_6$	$\tau_{t_6} = 42$	$\mu_{1,2}^6 = 1, \mu_{1,3}^6 = 1, \mu_{1,4}^6 = 1, \mu_{1,7}^6 = 1, \mu_{5,2}^6 = 1, \mu_{6,3}^6 = 1,$ $\mu_{7,4}^6 = 1, \mu_{7,7}^6 = 1, \mu_{8,8}^6 = 1, \mu_{9,8}^6 = 1, \mu_{10,8}^6 = 1$
$t_7$	$\tau_{t_7} = 50$	$\mu_{1,2}^7 = 1, \mu_{1,3}^7 = 1, \mu_{1,4}^7 = 1, \mu_{1,5}^7 = 1, \mu_{1,7}^7 = 1, \mu_{1,8}^7 = 1,$ $\mu_{1,9}^7 = 1, \mu_{5,2}^7 = 1, \mu_{6,3}^7 = 1, \mu_{7,4}^7 = 1, \mu_{7,7}^7 = 1, \mu_{9,8}^7 = 1,$ $\mu_{10,8}^7 = 1, \mu_{11,5}^7 = 1, \mu_{11,8}^7 = 1, \mu_{11,9}^7 = 1, \mu_{14,5}^7 = 1, \mu_{14,8}^7 = 1, \mu_{14,9}^7 = 1$
$t_8$	$\tau_{t_8} = 55$	$\mu_{1,2}^8 = 1, \mu_{1,3}^8 = 1, \mu_{1,4}^8 = 1, \mu_{1,5}^8 = 1, \mu_{1,6}^8 = 1, \mu_{1,7}^8 = 1,$ $\mu_{1,8}^8 = 1, \mu_{1,9}^8 = 1, \mu_{5,2}^8 = 1, \mu_{6,3}^8 = 1, \mu_{7,4}^8 = 1, \mu_{7,7}^8 = 1,$ $\mu_{10,8}^8 = 1, \mu_{11,5}^8 = 1, \mu_{11,8}^8 = 1, \mu_{11,9}^8 = 1, \mu_{12,6}^8 = 1, \mu_{12,8}^8 = 1,$ $\mu_{12,9}^8 = 1, \mu_{14,5}^8 = 1, \mu_{14,8}^8 = 1, \mu_{14,9}^8 = 1, \mu_{15,6}^8 = 1, \mu_{15,8}^8 = 1, \mu_{15,9}^8 = 1$
$t_9$	$\tau_{t_9} = 64$	$\mu_{1,1}^9 = 1, \mu_{1,2}^9 = 1, \mu_{1,3}^9 = 1, \mu_{1,4}^9 = 1, \mu_{1,5}^9 = 1, \mu_{1,6}^9 = 1, \mu_{1,7}^9 = 1,$ $\mu_{1,8}^9 = 1, \mu_{1,9}^9 = 1, \mu_{5,2}^9 = 1, \mu_{6,3}^9 = 1, \mu_{7,4}^9 = 1, \mu_{7,7}^9 = 1,$ $\mu_{11,5}^9 = 1, \mu_{11,8}^9 = 1, \mu_{11,9}^9 = 1, \mu_{12,6}^9 = 1, \mu_{12,8}^9 = 1, \mu_{12,9}^9 = 1,$ $\mu_{13,1}^9 = 1, \mu_{13,8}^9 = 1, \mu_{13,9}^9 = 1, \mu_{14,5}^9 = 1, \mu_{14,8}^9 = 1, \mu_{14,9}^9 = 1,$ $\mu_{15,6}^9 = 1, \mu_{15,8}^9 = 1, \mu_{15,9}^9 = 1, \mu_{16,1}^9 = 1, \mu_{16,8}^9 = 1, \mu_{16,9}^9 = 1$

### Вывод

Разработан алгоритм функционирования РВСП, который обеспечивает: представление структурных элементов сети в матричном виде; распределение цветов маркеров по входным и выходным позициям переходов сети; решение задачи разрешимости срабатывания переходов, находящихся в состояниях конфликта; сокращение числа позиций и переходов сети; упрощение и ускорение процесса моделирования; определение режима работы сети с максимально возмож-

ной скоростью. На основе предложенного алгоритма разработаны модели функционирования транспортного манипулятора и обрабатывающего центра в гибкой производственной системе механообработки. Разработано программное обеспечение в системе программирования Delphi 7.0, которое позволяет решать задачи с матрицами достаточно большого размера, что вполне удовлетворяет требованиям к моделированию сложных распределенных систем.

**Список литературы**

1. Управление ГПС: Модели и алгоритмы / Под. общ. ред. академика АН СССР С.В. Емельянова. М.: Машиностроение, 1987. 368 с.
2. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 284 с.
3. Ding Z., Zhou Y., Zhou M. A Polynomial Algorithm to Performance Analysis of Concurrent Systems via Petri Nets and Ordinary Differential Equations // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2015. V. 12, № 1. P. 295–308.
4. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. 264 с.
5. W.M.P. van der Aalst, Stahl C. Modeling Business Processes. A Petri Net Oriented Approach. The MIT Press, 2011. 400 p.
6. Lopez-Mellado E. Analysis of Discrete Event Systems by Simulation of Timed Petri Net Models // Mathematics and Computers in Simulation. 2002. Vol. 61, No. 1. P. 53–59.
7. Jensen K., Kristensen L.M., Wells L. Colored Petri Nets and CPN Tools for Modeling and Validation of Concurrent Systems // Int. Journal on Software Tools for Technology Transfer. 2007. Vol. 9, No. 3–4. P. 213–254.
8. Jensen K., Kristensen L.M. Coloured Petri Nets: Modeling and Validation of Concurrent Systems. Ist Springer Publishing Company Inc., 2009. 384 p.
9. Holliday M.A., Vernon M.K. A Generalized Timed Petri Net Model for Performance Analysis. IEEE Transactions on Software Engineering. 1987. Vol. Se–13, No. 12.

**References**

1. Management of GPS: Models and Algorithms / Ed. by Academician AN SSSR S.V. Emelyanov. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 368 p. [in Russian].
2. Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B. Modeling Systems. Dynamic and Hybrid Systems. Saint-Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2006. 284 p. [in Russian].
3. Ding Z., Zhou Y., Zhou M. A Polynomial Algorithm to Performance Analysis of Concurrent Systems via Petri Nets and Ordinary Differential Equations. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 295–308.
4. Peterson J. Petri Nets Theory and Systems Modeling. Moscow, Mir Publ., 1984. 264 p. [in Russian].
5. W.M.P. van der Aalst, Stahl C. Modeling Business Processes A Petri Net Oriented Approach. The MIT Press, 2011. 400 p.
6. Lopez-Mellado E. Analysis of Discrete Event Systems by Simulation of Timed Petri Net Models. Mathematics and Computers in Simulation, 2002, Vol. 61, No. 1, pp. 53–59.
7. Jensen K., Kristensen L.M., Wells L. Colored Petri Nets and CPN Tools for Modeling and Validation of Concurrent Systems. Int. Journal on Software Tools for Technology Transfer, 2007, Vol. 9, No. 3–4, pp. 213–254.
8. Jensen K., Kristensen L.M. Coloured Petri Nets: Modeling and Validation of Concurrent Systems. Ist Springer Publishing Company Inc., 2009. 384 p.
9. Holliday M.A., Vernon M.K. A Generalized Timed Petri Net Model for Performance Analysis. IEEE Transactions on Software Engineering, 1987, Vol. Se–13, No. 12.



**Бондарев А. В.**

**Bondarev A. V.**

*кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой  
«Электроснабжение промышленных предприятий»,  
Кумертауский филиал ФГБОУ ВО «Оренбургский  
государственный университет»,  
г. Кумертау, Российская Федерация*

УДК 621.382.2/.3

## **ФОРМИРОВАНИЕ СУБЪЕКТИВНЫХ И ОБЪЕКТИВНЫХ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ ПРИГОДНОСТИ ПРИ ГЕНЕТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ (НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ MICROGRID)**

Данная статья посвящена сложноподчиненным факторам генетического моделирования сложных систем. Актуальность работы заключается в описании эффективных критериев оценки и определения функций пригодности системы MicroGrid для генетического моделирования. Методы линейного и нелинейного программирования включены в качестве основополагающих для формирования субъективных и объективных критериев энергоэффективности систем на предприятиях. Решение проблемы сбережения энергии особенно актуально для развития мировой экономики в глобальном контексте. Для разработки системы MicroGrid были использованы следующие технические и технологические параметры: контроль напряжения и оборудования, электротехнические и автоматизированные параметры системы и комплексов реактивной мощности, определенная локализация контролируемых и управляющих устройств. В результате была сформирована и предложена к разработке функциональная параметрическая модель, позволяющая сберегать энергоресурсы и эффективно использовать существующую механизированную и автоматизированную компьютерную модель. Функциональные эвристические методы оценки качества произведенной оптимизации ACO и PSO были выбраны в качестве наиболее рационально подходящих для определения валидности функциональных параметров и критериев выбранной системы MicroGrid. Построение запросов, их очередность и формирование в кластеры в рамках экспериментального тестирования для данной работы было применено с учетом производственных факторов для существенной экономии природных энергоресурсов на предприятии. В результате данного исследования было решено сформировать будущие цели и задачи по проектам энергоресурсного развития в рамках современных глобальных экологических инициатив. Таким образом, в результате проектной апробации методов линейного и нелинейного программирования в рамках данного исследовательского проекта было установлено, что они валидны и функционально эффективны для последующего тестирования субстанциональных подпроектов в этой отрасли. Автоматизированные системы управления на основе компьютеризации были выбраны в качестве наиболее функционально эффективных и результативных, что отражено в полученных экспериментальных данных этого проекта.

**Ключевые слова:** генетическое моделирование, линейное программирование, нелинейное программирование, MicroGrid.

## **FORMATION OF SUBJECTIVE AND OBJECTIVE CRITERIA OF EVALUATION AND DETERMINATION OF SUITABILITY FUNCTION IN GENETIC MODELING OF COMPLEX SYSTEMS (ON THE EXAMPLE OF MICROGRID SYSTEM)**

This work explores both linear and non-linear programming methods with the constituting genetic algorithm for energy saving techniques. The actuality of the article is that it highlights acute problematic components of heavy loaded energy consuming systems at big plants and

factories. The provided solution is MicroGrid system that when installed is able to limit energy consumption and energy wasteful loss. This article is focused on addressing the need of MicroGrid implementation to work out the economically effective techniques in the global context. The following technical and technological parameters were used to develop the MicroGrid system: voltage and equipment monitoring, electrical and automated parameters of the system and reactive power complexes, and a certain localization of monitoring and control devices. As a result, a functional parametric model was developed and proposed for development that allows saving energy resources and effectively using the existing mechanized and automated computer model. Functional heuristic methods for assessing the quality of the generated optimization of ACO and PSO were chosen as the most rationally suitable for determining the validity of the functional parameters and criteria of the selected MicroGrid system. The construction of queries, their order and formation in clusters in the framework of experimental testing for this work was applied taking into account the production factors for a significant saving of natural energy resources in the enterprise. As a result of this study, it was decided to form future goals and objectives for energy-resource development projects within the framework of modern global environmental initiatives. Thus, as a result of the project approbation of linear and nonlinear programming methods within the framework of this research project, it was established that they are valid and functionally effective for the subsequent testing of substantive subprojects in this field. Automated control systems based on computerization were selected as the most functionally effective and efficient, which is reflected in the experimental data of this project.

**Key words:** genetic modeling, linear programming, non-linear programming, MicroGrid.

### *Введение*

Тенденции роста сложности и расширения междисциплинарной интеграции генетически моделированных сложных систем обуславливают необходимость поиска и разработки новых методологических подходов, обеспечивающих создание таких систем на единой методологической основе, с возможностью реализации структурного предвидения и максимального приближения принципов их структурообразования к природным аналогам. Таким требованиям удовлетворяют положения теории генетического синтеза сложных электромеханических систем. Генетический подход к синтезу и анализу сложных систем значительно сокращает временные и материальные затраты на поисковые исследования, особенно на ранних этапах проектирования и принятия решений. Методология генетического синтеза основана на определении и расшифровке генетических программ соответствующих классов объектов, которые определяют структурный потенциал их допустимых структурных вариантов. Еще один важный аспект генетического подхода заключается в его междисциплинарности, что открывает возможность постановки задач направленного синтеза сложных технических систем с компонентами различной генетической природы.

Результаты предыдущих теоретических и экспериментальных исследований подтвердили возможность использования общего элементного и информационного базиса Генетической классификации первичных источников поля как системной модели для реализации процедур предсказания структур как электромагнитного, так и механического происхождения [1].

### *Постановка задачи*

Эффективность и надежность работы MicroGrid базируется на ее оптимальной архитектуре относительно распределения потоков электроэнергии и информации о состоянии всех ее узлов. Задача оптимизации сводится к минимизации целевой функции при различных субъективных и объективных критериях оценки эффективности и определения функции пригодности при генетическом моделировании сложных систем.

В настоящее время достаточно широкий круг исследователей предлагают и используют различные подходы к построению математических моделей функционирования микроэнергетических систем с несколькими источниками распределенной генерации. Задачей данной статьи является анализ литературных источников по методам разработки математических моделей функционирования и оптимизации работы MicroGrid.

*Результаты исследования*

В области электроэнергетических систем приоритетной задачей является достижение приемлемых экономических решений. Эта задача заключается в разработке определенных конфигураций электрических сетей для обеспечения необходимых требований, которые накладываются на оптимальное (эффективное) функционирование как каждого элемента сети, так и системы в целом. Такие требования закладываются выходными энергетическими параметрами, а именно: графиком нагрузки потребителей, качеством электрической энергии, надежностью работы электроэнергетической системы, условиями ее эксплуатации. Важным параметром, который учитывается при разработке оптимальной конфигурации электросети, является также безопасность функционирования этой системы как по отношению к внутренним элементам системы, так и по отношению к окружающей среде. Для получения решения по оптимизации процессов в электроэнергетической системе, функционирование которой контролируется определенными параметрами (контроль напряжения и оборудования, электротехнические и автоматизированные системы и комплексы реактивной мощности, определенная локализация контролируемых и управляющих устройств, и т.д.), были разработаны оптимизационные алгоритмы для обеспечения бесперебойной работы электроэнергетической системы на основе традиционных оптимизационных методов для решения задач такого типа. Решение заключается в нахождении минимального или максимального значения целевой функции, которая включает в себя необходимые параметры функционирования электроэнергетической системы в допустимой области поиска, которая ограничена требованиями, накладываемыми на работу этой системы. В общем виде эти методы и критерии классифицируются следующим образом.

1. Методы линейного программирования — простые оптимизационные методы, в которых целевая функция и область поиска определяются линейными зависимостями. Методы линейного программирования применялись для различных задач электроэнер-

гетики, таких как задачи нахождения экономического распределения электроэнергии, проектирование и функционирование электроэнергетической системы, согласованности ее защиты, обеспечения графика нагрузки, оценки состояния системы [2, 3]. К методу линейного программирования принадлежат также методы целочисленного программирования, в которых все или некоторые переменные определены как дискретные целочисленные величины. Этот метод используется для оценки безопасности энергетических систем, для оптимизации и проектирования ЛЭП, анализа надежности, проектирования распределенных систем и менеджмента нагрузки [4–6].

2. Методы нелинейного программирования — оптимизационные методы, в которых целевая функция задана нелинейной зависимостью при допустимой области поиска, которая может быть выражена как линейными, так и нелинейными зависимостями. Однако нахождение оптимального решения нелинейной целевой функции с нелинейными ограничениями считается очень сложной задачей. Поэтому при решении такого типа задач область допустимого поиска задается линейной зависимостью. Методы нелинейного программирования с линейно ограниченной областью поиска относятся к линейно ограниченному задачам нелинейного программирования. Этот метод интенсивно используется для оптимизационных задач динамической безопасности электрических систем, контроля перетоков реактивной мощности, проектирования и функционирования электрических систем, оптимального потока мощности в системе, оптимального размещения средств компенсации реактивной мощности и оптимальной локации источников электроэнергии.

3. Методы стохастического программирования — оптимизационные методы, используются для решения задач, содержащих в себе неопределенность, в которых целевая функция задается вероятностной функцией. Эти методы также называются методами динамического программирования [12]. Эти методы широко используются для решения задач оптимизации, но нахождение числен-

ного решения требует значительных вычислительных расчетов, которые увеличивают вероятность получения квазиоптимальных результатов, которые, в основном, обусловлены размерностью переменных. Например, этот метод был использован для оптимизации мощности источников генерации электроэнергии и в задаче оптимального функционирования электрической системы на уровне распределенной системы.

#### *Генетический алгоритм MicroGrid*

Приведенные выше методы оптимизации при нахождении минимального или максимального значения целевой функции при наложенных ограничениях оказались эффективными при разработке MicroGrid и моделировании ее оптимального функционирования.

Как было сказано выше, MicroGrid является управляемым компонентом SmartGrid и представляет собой низковольтную сеть небольшой мощности, которая спроектирована для электроснабжения небольшого локального объекта (жилья, торговой площади, промышленного участка и т.д.).

Математическое описание MicroGrid как оптимизационной задачи в реальном времени является сложной задачей. Главным образом это обусловлено нелинейностью в нагрузках и в структуре тарифных ставок (например фиксированная или дифференцированная плата за обслуживание), необходимостью проведения расчетов путем нахождения целочисленных решений при функционировании / отключении источников

питания (устройств генерации, аккумулярования и преобразования энергии), неопределенностью будущего профиля нагрузки, возможностью изменения структуры MicroGrid, времени и стоимости запуска оборудования.

Управление в MicroGrid направлено на обеспечение следующих параметров:

- безопасность системы и ее оптимальное функционирование;
- уменьшение вредных выбросов в окружающую среду при функционировании системы;
- плавный переход от одного режима к другому без нарушений системных ограничений и эксплуатационных требований.

Обеспечение этих параметров достигается следующими функциональными и управляющими компонентами MicroGrid.

1. Для обеспечения качества электроэнергии необходимо существенно выравнять баланс между активной и реактивной мощностью внутри MicroGrid за короткий период времени.

2. MicroGrid может функционировать в двух эксплуатационных режимах: либо автономно в пределах локального объекта без связи централизованной сетью, или в режиме работы автономных источников, которые присоединены к централизованной сети;

3. Генерация и аккумулярование электроэнергии должны быть надлежащим образом сбалансированы с учетом необходимых требований обеспечения графика нагрузки.

<b>Имя</b>	<b>Процессоры</b>	<b>Архитектура</b>
Bruce	128	Myrinet 2g (gm)
Narwhal	1068	Myrinet 2g (gm)
Tiger	128	Myrinet 2g (gm)
Bull	384	Quadrics Elan4
megaladon	128	Myrinet 2g (gm)
Dolphin	128	Myrinet 2g (gm)
Requin	1536	Quadrics Elan4
Whale	3072	Gigabit Ethernet
Zebra	128	Myrinet 2g (gm)
Bala	128	Myrinet 2g (gm)

**Рисунок 1.** Оборудование для системы MicroGrid

4. Экономически выгодная эксплуатация обеспечивается определенным графиком генерации электроэнергии, эффективным распределением мощности и оптимизацией потоков энергии различных источников.

5. Безопасность системы поддерживается путем анализа последствий аварий (отключений), возможных при данном режиме функционирования. Необходимо учитывать особенности работы MicroGrid в аварийном режиме при снижении нагрузки путем ограничения или выключения некоторых компонентов системы, исходя из требований потребителя.

6. Временный дисбаланс между генерацией и нагрузкой должен выравниваться путем динамического прогнозирования согласования графика нагрузки с экономиче-

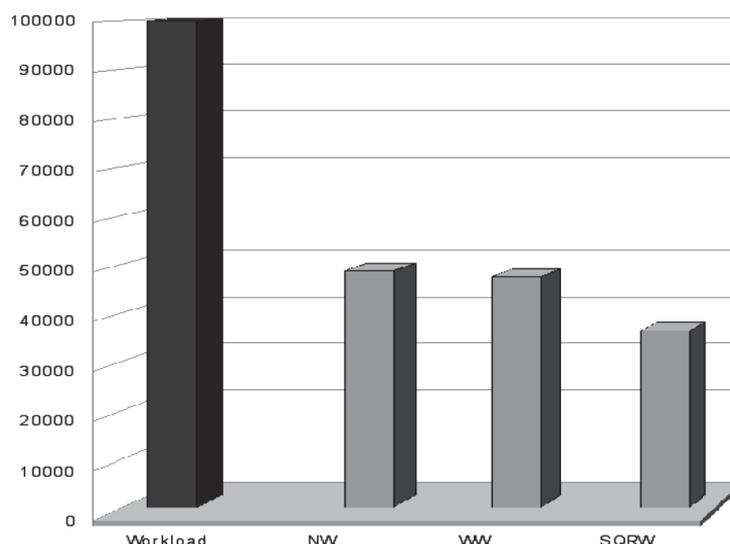
ски обоснованным объемом генерации системы, в том числе и путем привлечения пользователя к управлению спросом, в первую очередь из-за принятия решений по дополнительной генерации или уменьшению потребления в пиковые периоды работы MicroGrid.

7. Организация функционирования MicroGrid, качественного энергоменеджмента, защиты и контроля поведения системы должна базироваться на использовании телекоммуникационных инфраструктур с соответствующими протоколами сбора, обработки и передачи информации.

Математические методы оптимизации, используемые при проектировании и моделировании работы электроэнергетических систем, также нашли свое применение



**Рисунок 2.** Формирование совокупности субъективных и объективных критериев оценки при генетическом моделировании сложных систем (на примере системы MicroGrid)



**Рисунок 3.** Среднее время ожидания запросов в очереди при максимальной загрузке процессора

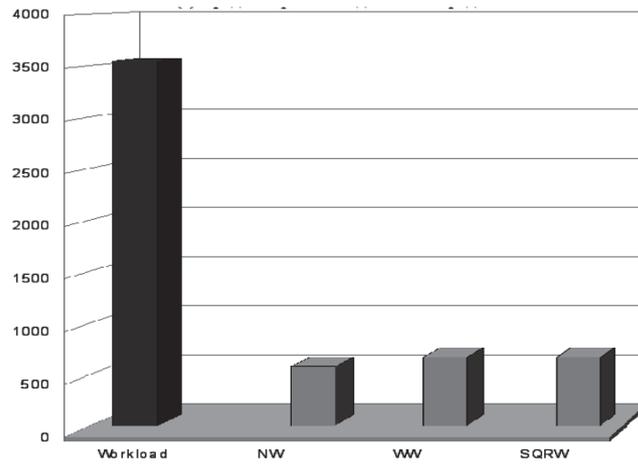


Рисунок 4. Средняя длина очереди запросов

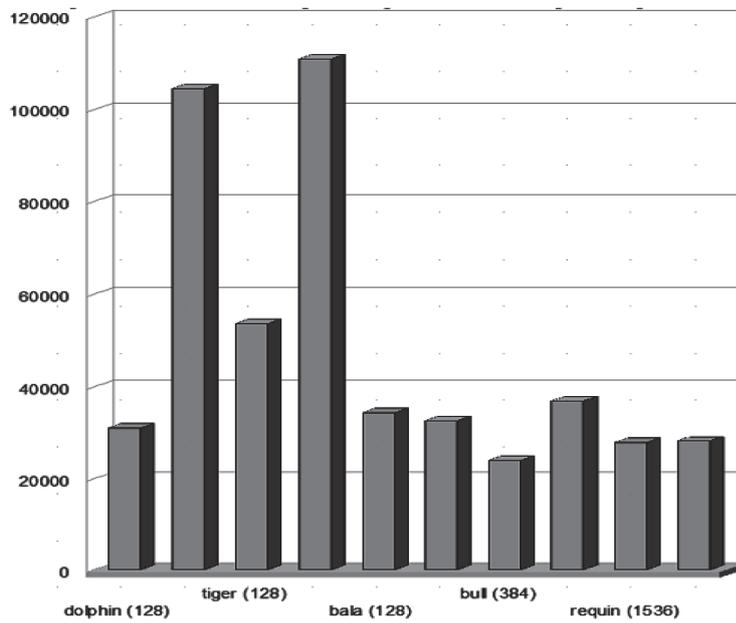


Рисунок 5. Среднее время ожидания в каждом кластере

и для MicroGrid. Аналогично их можно разделить согласно классификации, приведенной ниже.

Предложенные принципы оптимизации основаны на методах линейного программирования рядом с эвристическими методами. Инструментарий линейного программирования используется для исследования функции «высокой надежности для потребителя». Большое количество компонентов сети влияют на показатели надежности в целом. Идея заключается в том, что без детального учета каждого компонента системы корректное описание MicroGrid невозможно. Поэтому некоторые авторы предлагают использовать интеллектуальные датчики, которые способны предвидеть некоторые

нарушения работы в микросети, и линейные выключатели, которые смогут ограничить распространение таких побочных эффектов на MicroGrid в целом. Таким образом, в описанном подходе целевая функция надежности корректно максимизируется путем сужения предельных ограничений, налагаемых на функцию, оптимизируется, как использованием интеллектуальных датчиков, так и линейных выключателей. Этот пример показывает эффективность использования методов линейного программирования путем сведения нелинейных граничных условий к линейной конфигурации посредством использования аппаратных компонентов для упрощения поиска оптимума заданной целевой функции.

## Вывод

Из приведенного анализа литературных источников видно, что для проектирования и обеспечения эффективного функционирования MicroGrid пригодны к применению как традиционные, так и современные эвристические методы оптимизации. Однако, как свидетельствуют полученные результаты математического моделирования, эвристические методы оптимизации как объективные критерии эффективности и пригодности моделируемой системы оказались более приемлемыми для нахождения оптимальных значений целевых функций, что доказано преимуществом эвристических методов над традиционными методами оптимизации, в частности поиска минимальных или максимальных значений многокритериальных целевых функций.

## Список литературы

1. Grid 2030: A National Version for Electricity's Second 100 Years // Office of Electric Transmission and Distribution United State Department of Energy. July 2003.
2. Delson J.K., Shahidehpour S.M. Linear Programming Applications to Power System Economics, Planning and Operations // *Power Systems, IEEE Transactions*. 1992. Vol. 7, No. 3. P. 1155–1163.
3. Khodr H.M., Gomez J.F., Barnique L., Vivas J.H., Paiva P., Yusta J.M., Urdaneta A.J. A Linear Programming Methodology for the Optimization of Electric Power-Generation Schemes // *Power Systems, IEEE Transactions*. 2002. Vol. 17, No. 3. P. 864–869.
4. Alguacil N., Motto A.L., Conejo A.J. Transmission Expansion Planning: A mixed-Integer LP Approach // *Power Systems, IEEE Transactions*. 2003. Vol. 18, No. 3. P. 1070–1077.
5. Lima F.G.M., Galiana F.D., Kockar I., Munoz J. Phase Shifter Placement in Large-Scale Systems via Mixed Integer Linear Programming // *Power Systems, IEEE Transactions*. 2003. Vol. 18, No. 3. P. 1029–1034.
6. Soudi F., Tomsovic K. Optimized Distribution Protection using Binary Programming // *Power Delivery, IEEE Transactions*. 1998. Vol. 13, No. 1. P. 218–224.

Среди эвристических методов наиболее популярными в задачах оптимизации стали методы ACO и PSO. Как указано выше, метод ACO позволяет находить оптимальное решение за короткий промежуток времени при наличии сложных ограничений. Вместе с тем, метод PSO позволяет получать решения на значительно более коротком интервале времени и характеризуется повышенной устойчивостью к сходимости результатов, позволяет находить оптимальное решение с меньшим количеством выходных параметров, характеризуется большей вариативностью в сравнении с другими эвристическими или традиционными методами и функциональными критериями обеспечения эффективности.

## References

1. *Grid 2030: A National Version for Electricity's Second 100 Years*. Office of Electric Transmission and Distribution United State Department of Energy. July 2003.
2. Delson J.K., Shahidehpour S.M. Linear Programming Applications to Power System Economics, Planning and Operations. *Power Systems, IEEE Transactions*, 1992, Vol. 7, No. 3, pp. 1155–1163.
3. Khodr H.M., Gomez J.F., Barnique L., Vivas J.H., Paiva P., Yusta J.M., Urdaneta A.J. A Linear Programming Methodology for the Optimization of Electric Power-Generation Schemes. *Power Systems, IEEE Transactions*, 2002, Vol. 17, No. 3, pp. 864–869.
4. Alguacil N., Motto A.L., Conejo A.J. Transmission Expansion Planning: A mixed-Integer LP Approach. *Power Systems, IEEE Transactions*, 2003, Vol. 18, No. 3, pp. 1070–1077.
5. Lima F.G.M., Galiana F.D., Kockar I., Munoz J. Phase Shifter Placement in Large-Scale Systems via Mixed Integer Linear Programming. *Power Systems, IEEE Transactions*, 2003, Vol. 18, No. 3, pp. 1029–1034.
6. Soudi F., Tomsovic K. Optimized Distribution Protection Using Binary Programming. *Power Delivery, IEEE Transactions*, 1998, Vol. 13, No. 1, pp. 218–224.



**Муфтеев В. Г.**  
**Mufteev V. G.**  
кандидат  
технических наук,  
доцент кафедры  
«Механика  
и инженерная  
графика»,  
ФГБОУ ВО  
«Башкирский  
государственный  
аграрный  
университет»,  
г. Уфа,  
Российская  
Федерация



**Зиатдинов Р. А.**  
**Ziatdinov R. A.**  
кандидат физико-  
математических  
наук (PhD),  
преподаватель  
кафедры  
«Промышленная  
инженерия»,  
Университет Кемён,  
г. Тэгу,  
Южная Корея



**Зелев А. П.**  
**Zelev A. P.**  
кандидат  
технических  
наук, доцент,  
доцент кафедры  
«Управление и  
сервис в технических  
системах», ФГБОУ  
ВО «Уфимский  
государственный  
нефтяной  
технический  
университет»,  
г. Уфа,  
Российская  
Федерация



**Набиев Р. И.**  
**Nabiev R. I.**  
кандидат  
педагогических  
наук, доцент  
кафедры «Основы  
конструирования  
машин  
и механизмов»,  
ФГБОУ ВО  
«Уфимский  
государственный  
авиационный  
технический  
университет»,  
г. Уфа, Российская  
Федерация



**Марданов А. Р.**  
**Mardanov A. R.**  
инженер кафедры  
«Основы конструирования  
машин и механизмов»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный  
авиационный технический  
университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Ахметшин Р. И.**  
**Akhmetshin R. I.**  
старший преподаватель,  
аспирант кафедры  
«Основы конструирования  
машин и механизмов»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный  
авиационный технический  
университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Талыпов М. А.**  
**Talypov M. A.**  
ассистент кафедры  
«Механика и инженерная  
графика»,  
ФГБОУ ВО «Башкирский  
государственный аграрный  
университет»,  
г. Уфа, Российская  
Федерация

УДК 519.7

## ПРОГРАММА FAIRCURVEMODELER МОДЕЛИРОВАНИЯ КРИВЫХ И ПОВЕРХНОСТЕЙ КЛАССА «F» И РАЗРАБОТКА НА ЕЕ ОСНОВЕ ПРИКЛАДНЫХ САПР

В статье описывается программно-методический комплекс (ПМК) FairCurveModeler для моделирования кривых линий и поверхностей класса F (Functional). Качество кривых и поверхностей класса F превосходит на порядок качество кривых и поверхностей класса A. На основе ПМК FairCurveModeler разрабатываются прикладные системы автоматизированного проектирования (САПР) для проектирования объектов с функциональными кривыми и поверхностями.

Авторы предлагают концепцию применения функциональных кривых высокого качества по критериям плавности и методы моделирования, обеспечивающие эти критерии. Для реализации этого подхода предлагается ПМК FairCurveModeler.

Предложенная концепция и ее реализация посредством ПМК FairCurveModeler — универсальное и дешевое средство улучшения качества проектируемого изделия. Иными словами, вы можете, только следуя требованиям концепции и с помощью ПМК FairCurveModeler, без дизайнерских ухищрений, путем улучшения геометрии предыдущего проекта или хорошо известного проекта получить более качественный проект и продукт.

Этот подход применяется при разработке прикладных САПР и специализированных приложений.

Концепция использования кривых высокого качества при моделировании функциональных поверхностей была использована в стандартной схеме моделирования рабочей поверхности плуга.

На основе функционала ПМК разработаны методы моделирования профиля кулачка, обеспечивающие современные требования к геометрии профиля кулачка: метод геометрического моделирования профиля кулачка высокого качества по параметрам плавности: высокий порядок (до 9-го порядка) гладкости с плавным изменением кривизны и с фиксированными участками, геометрически точно совпадающими с дугами окружностей.

Большое значение для повышения качества трассы имеет функция моделирования кривой высокого качества на касательной ломаной. Данная функция позволяет моделировать трассу дороги по теодолитным ходам. При этом качество трассы не отличается от моделирования по реперным точкам.

Открытый авторами эффект влияния потенциальной энергии кривой линии траектории движения материальной частицы с трением должен, безусловно, учитываться при проектировании трассы дороги.

**Ключевые слова:** NURBS, fair curve, fair surface, кривые высокого качества, поверхности высокого качества, САПР, прикладные САПР.

## THE PROGRAM FAIRCURVEMODELER MODELING OF CURVES AND SURFACES CLASS «F» AND THE DEVELOPMENT ON ITS BASIS OF APPLICATION OF CAD

The article describes the program-methodical complex (PMC) FairCurveModeler for modeling curves and surfaces of class F (Functional). The quality of curves and surfaces of class F exceeds by an order of magnitude the quality of curves and surfaces of class A. On the basis of PMC FairCurveModeler, applied computer-aided design (CAD) systems are developed for the design of objects with functional curves and surfaces.

The authors propose the concept of application of high quality functional curves on the criteria of smoothness and modeling methods that provide these criteria. To implement this approach, a PMC FairCurveModeler.

The proposed concept and its implementation through PMC FairCurveModeler is a universal and cheap means of improving the quality of the designed product. That is, you can only follow

the requirements of the concept and with the help of PMC FairCurveModeler, without design tricks, by improving the geometry of your previous project or a well-known project to get a better project and product.

This approach is used in the development of CAD applications and specialized applications.

The concept of using high-quality curves for functional surface modeling was used in the standard scheme of plow working surface modeling.

On the basis of the functionality of the PMC developed methods for simulation of the Cam profile, which provide modern requirements to the geometry of the Cam profile: a method of geometric modeling of the Cam profile of the high quality and the parameters of smoothness: high order (up to 9th order) smoothness with smooth change of curvature and with fixed plots, geometrically identical to the arcs.

The function of modeling a high-quality curve on a tangent polyline is of great importance for improving the quality of the track. This function allows to model the road route by the traverse. The quality of the route is not different from the simulation by reference points.

The effect of the potential energy of the curve of the trajectory of a material particle with friction, discovered by the authors, should be taken into account in the design of the road route.

**Key words:** NURBS, fair curve, fair surface, high quality curves, high quality surfaces, CAD, applied CAD.

### *Введение*

Существует обширный класс изделий с функциональными кривыми и поверхностями, определяющими их существенные проектные характеристики. Это внешние обводы летательных аппаратов, судов; осевые линии трассы дорог, трубопроводов; профили крыльев летательных аппаратов, лопасти турбин и компрессоров, профили кулачков, рабочие поверхности почвообрабатывающих агрегатов.

На основе результатов анализа пространственной криволинейной траектории движения материальной точки формулируется список базовых требований к качеству функциональных кривых [1]:

- высокий, не ниже 4-го, порядок гладкости моделируемой кривой;
- минимум вершин кривой при заданной форме;
- ограничение значений кривизны и скорости изменения кривизны;
- плавность кручения пространственной кривой.

В качестве дополнительной оценки качества кривых используется значение потенциальной энергии кривой.

Необходимость выбора функциональной кривой с малым значением потенциальной энергии можно обосновать следующим предположением. При движении объекта с функциональной поверхностью с большой скоростью среда, обтекающая объект, ведет себя

как упругое тело. Очевидно, что для деформации упругой среды по линиям тока с меньшей потенциальной энергией будет затрачиваться меньше работы.

Кривые и поверхности, отвечающие перечисленным требованиям, были названы кривыми и поверхностями класса F (Functional) [2].

В топовых CAD-системах (Catia, NX, Alias Design) и в системах для промдизайна (Rhinoceros) существуют методы моделирования кривых высокого качества (т.н. кривые и поверхности класса A). Но кривые и поверхности класса A не удовлетворяют перечисленным выше требованиям к функциональным кривым и поверхностям. Методы класса A обеспечивают интегральную гладкость кривых и поверхностей не выше G3. И, прежде всего, эти методы не обеспечивают безусловной минимальности вершин кривой (минимальности количества экстремумов кривизны). Это означает, что если исходные точки лежат на окружности, то метод класса A нарисует плавную кривую, но не окружность.

Но такие методы есть.

Эти методы разрабатывались в ходе выполнения с 1974 г. по 1990 г. хоздоговоров по открытой тематике вуза (Уфимского авиационного института, затем Уфимского нефтяного института) с МЗ им. П.О. Сухого, с НПО «Молния», с опытно-конструкторским бюро при УМО и с рядом машиностро-

ительных предприятий. НИР были включены в планы НИР Минвуза РСФСР (секция Авиационная техника, подсекция «САПР и АСТПП поверхностей», председатель подсекции проф. Осипов В.А.).

На основе инновационных геометрически ориентированных методов был разработан программно-методический комплекс (ПМК) FairCurveModeler моделирования кривых линий и поверхностей высокого качества по критериям плавности.

Ключевой инновационный метод — метод огибающей [3], который обобщает методы прикладной геометрии обводов на основе кривых второго порядка (К2П). Моделируемая кривая не имеет аналитического выражения и была названа виртуальной кривой ( $v$ -кривой) [4]. Точки  $v$ -кривой генерируются на множествах К2П двойного соприкосновения. В пределе итераций генерации точек  $v$ -кривая стремится к кривой класса  $C5$ .

Важнейшими свойствами метода являются:

- 1) *абсолютная минимизация количества вершин* (экстремумов кривизны) кривой, определяемой на локально выпуклой ломаной;
- 2) *дуальность определителя кривой*, то есть возможность определения одной и той же кривой как на опорной ломаной, так и на касательной ломаной.

*Программно-методический комплекс FairCurveModeler*

Существуют две тенденции применения программных продуктов CAD/CAM/CAE систем.

Первый вариант — применение «тяжелой» системы САПР. Этот вариант предпочтителен для крупных предприятий с относительно устоявшейся технологией проектирования.

Второй вариант — *интеграция различных CAD/CAM/CAE систем*. Благодаря стандартам обмена графическими и геометрическими моделями между CAD/CAM/CAE системами можно создавать произвольные конфигурации интегрированной CAD/CAM/CAE системы. Этот вариант дает возможность конфигурирования и развития инте-

грированной системы в соответствии с реальными потребностями и финансовыми возможностями пользователя, а также обеспечивает возможность выбора лучшего в своем классе продукта.

Базовый функционал САД-системы реализуется набором ПМК, решающих некоторую законченную задачу, например моделирование NURBS кривых и поверхностей [5]. Базовый функционал существующих САД-систем не всегда удовлетворяет всем требованиям конкретных задач, встающих перед инженерами. Расширение функционала САД-систем выполняется внешними приложениями. Внешнее приложение может представлять собой *функциональный ПМК*, который расширяет и развивает базовый функционал. Внешнее приложение может решать некоторую специальную инженерную задачу на основе базового функционала САД-системы. В этом случае внешнее приложение называется *прикладной САПР*.

ПМК FairCurveModeler [2, 6–8] относится к функциональным ПМК. ПМК FairCurveModeler расширяет и развивает базовый функционал САД-систем до возможности моделирования кривых линий и поверхностей класса F.

Интеграция ПМК FairCurveModeler в САД/CAM/CAE системы решается 3 способами.

1). Используются API конкретных САД/CAM/CAE систем. Функции прикладного приложения разрабатываются как приложения конкретных САД-систем (AutoCAD + вертикальные продукты AutoCAD, nanoCAD, КОМПАС) и математических компьютерных систем (MathCAD, Mathematica). Приложения выполняются в десктопном варианте.

2). Разрабатывается облачный продукт FairCurveModeler как приложение всех САД-систем [8]. Облачные технологии в настоящее время интенсивно развиваются. Позволяют реализовать принцип «мощный сервер — тощий клиент». *Обеспечивается доступность и постоянная актуальность продукта*. Связь с САД-системами реализуется с помощью стандартных файлов обмена (DXF-файлов и IGES файлов) и передачей моделей через буфер памяти.

3). Разрабатывается универсальная открытая платформа на базе Excel + VBA + FairCurveModeler + CAD-системы [7]. Связь с CAD-системами реализуется с помощью стандартных файлов обмена (DXF-файлов), передачей моделей через буфер памяти и через специальный Геометрический Буфер (ГБ).

Последние два способа *независимы от конкретных CAD-систем*.

ПМК FairCurveModeler имеет в своем составе следующие приложения:

1). 'FairCurveModeler app AutoCAD' приложение AutoCAD и вертикальных продуктов AutoCAD;

2). прикладная библиотека 'FairCurveModeler 2D' КОМПАС ГРАФИК;

3). прикладная библиотека 'FairCurveModeler 3D' КОМПАС 3D;

4). 'Web FairCurveModeler' — облачный продукт;

5). 'FairCurveModeler app Mathematica' — приложение математического пакета Mathematica;

6). FairCurveModeler.xlsm — приложение Excel.

Приложения разрабатываются по технологии СОМ-автоматизации.

Весь геометрический функционал содержится в одной DLL-программе FairCurve.exe. Все приложения (кроме прикладных библиотек КОМПАС 3D) используют один единственный СОМ-компонент FairCurve.exe.

Собственно приложения обеспечивают только интерфейс между системой и пользователем, системой и внешним СОМ-компонентом.

Приложения ПМК для различных систем могут работать согласованно, используя т.н. Геометрический Буфер для обмена NURBS моделями кривых и поверхностей. ГБ представляет собой папку с зарезервированным именем 'FairCurveModeler\_TEMP'.

Для разработки прикладных САПР и специализированных приложений на основе ПМК FairCurveModeler рекомендуется использовать интегрированную платформу, состоящую из следующих компонентов:

1). Компьютерные математические системы (MatchCAD, Mathematica, Wolfram Cloud);

2). CAD-системы для моделирования (AutoCAD / nanoCAD / КОМПАС);

3). CAD-система для конструирования — КОМПАС 3D;

4). САЕ-системы для испытаний на аэродинамику и прочность (Flow Vision, Win Machine).

ПМК FairCurveModeler + интегрированная платформа позволяют:

1) выполнять моделирование кривых линий и криволинейных поверхностей и тестирование их качества с использованием ПМК FairCurveModeler и компонентов интегрированной платформы;

2) выполнять гидродинамическое испытание объектов с функциональными поверхностями в САЕ-системе FlowVision, выполнять анализ на прочность в САЕ-системе WinMachine;

3) конструировать 3D модели деталей и сборки в КОМПАС 3D, обеспечить законченный цикл проектирования подготовкой чертежной документации и спецификаций по 3D моделям деталей и сборок в КОМПАС 3D.

В ПМК FairCurveModeler v-кривые высокого качества изогеометрически и с сохранением качества аппроксимируются NURBS кривыми, которые являются фактическим стандартом для CAD/CAM/CAE систем. NURBS поверхности высокого качества, моделируемые на каркасах и сетях v-кривых, конвертируются в примитивы CAD-систем путем аппроксимации или, с сохранением точной геометрии, через стандарт IGES.

Чрезвычайно важно в условиях жесткой конкуренции на рынке САПР иметь программные продукты отечественного производства, которые бы не уступали западным в возможности моделирования кривых и поверхностей высокого качества по критериям плавности.

ПМК FairCurveModeler дополняет функционал отечественных программных продуктов до более высокого уровня, чем уровень топовых CAD-систем. Это отечественные CAD-системы, геометрические ядра которых независимы от импортных аналогов. Это nanoCAD и КОМПАС 3D. ПМК FairCurveModeler позволяет в интеграции с nanoCAD и КОМПАС моделировать кривые

и поверхности класса F, качество которых на порядок выше, чем качество кривых и поверхностей класса A.

При разработке ПМК используются API AutoCAD и язык программирования Visual AutoLISP. Развитые средства отладки Visual AutoLISP позволяют в короткие сроки выполнить и отладить функции ПМК.

Отечественный продукт nanoCAD не имеет таких широких возможностей, но приложения на языке AutoLISP адекватно воспринимаются nanoCAD.

ПМК в виде приложения КОМПАС 3D разрабатывается на основе API 'КОМПАС МАСТЕР'.

#### *Прикладные САПР*

Авторы предлагают концепцию применения функциональных кривых высокого качества по критериям плавности и методы моделирования, обеспечивающие эти критерии. Для реализации этого подхода предлагается ПМК FairCurveModeler.

*Концепция и выполнение ПМК FairCurveModeler — универсальное и дешевое средство улучшения качества проектируемого изделия.* Иными словами, вы можете, только следуя требованиям концепции и с помощью ПМК FairCurveModeler, без дизайнерских ухищрений, путем улучшения геометрии вашего предыдущего проекта или хорошо известного проекта получить более качественный проект и продукт.

Этот подход применяется при разработке прикладных САПР и специализированных приложений.

#### *Прикладная САПР плуга общего назначения*

В рамках научного направления «Совершенствование технических средств и технологических приемов сельскохозяйственного производства (госрегистрация № 01201462520)» под руководством проф. С. Г. Мударисова разрабатывается прикладная САПР плугов общего назначения (разработчики: С. Г. Мударисов, В. Г. Муфтьев, И. М. Фархутдинов, А. Р. Марданов).

Концепция использования кривых высокого качества при моделировании функциональных поверхностей была использована в стандартной схеме моделирования рабочей поверхности плуга проф. Н. В. Щучкина [9].

В схеме были отбракованы кривые, приводящие к нерегулярным участкам поверхности, и заменены кривыми высокого качества [10, 11]. Также была радикально решена проблема устранения задира почвы кромкой плуга [12].

Два важных положения были реализованы в конструкции плуга:

1) при больших скоростях пласт почвы ведет себя как упругое тело. Очевидно, что упругая деформация по траектории с наименьшей потенциальной энергией потребует меньше энергетических затрат на деформацию;

2) на основе анализа формулы работы по перемещению материальной точки по вогнутой кривой с трением и формулы потенциальной энергии кривой доказывается, что чем меньше потенциальная энергия криволинейной траектории, тем меньше энергии будет затрачиваться на перемещение материальной точки по криволинейной траектории на преодоление сил трения, возникающих от нормального ускорения материальной точки [13].

Геометрия рабочей поверхности плуга проверена путем тестирования почвенно-динамических характеристик отвала в системе Flow Vision [11].

В прикладной САПР на платформе MathCAD + FairCurveModeler + AutoCAD + КОМПАС 3D выполнено проектирование и изготовление опытного образца плуга по предложенному методу.

Полевые испытания опытного образца показали поразительный результат. Произошло одновременное и улучшение качества вспашки, и снижение энергозатрат [14].

#### *Кулачковые механизмы*

На основе функционала ПМК FairCurveModeler разрабатывается прикладная САПР кулачковых механизмов на кафедре основ конструирования механизмов и машин УГАТУ (разработчики В. Г. Муфтьев, Р. И. Ахметшин).

В общем случае к геометрическим свойствам профилей кулачков и, соответственно, к методам профилирования и методам геометрического представления профилей предъявляются следующие требования:

1) высокий порядок гладкости (не ниже 5-го порядка). Несоблюдение этого

требования буквально «дорого» обошлось владельцам «жигулей» 70-х годов прошлого века [15];

2) плавность изменения дифференциальных характеристик, влияющих на ускорение (acceleration) и динамический удар (jerk) [16, 17];

3) сохранение постоянства диаметра кулачка на участках «выстоя» толкателя [17].

Существующие методы не обеспечивают одновременно все требования к геометрическим свойствам профилей кулачков.

На основе функционала ПМК разработаны методы моделирования профиля кулачка, обеспечивающие современные требования к геометрии профиля кулачка:

— метод геометрического моделирования профиля кулачка 2-го порядка гладкости и с фиксированными участками, геометрически точно совпадающими с дугами окружностей;

— метод геометрического моделирования профиля кулачка высокого качества по параметрам плавности: высокий порядок (до 9-го порядка) плавности с плавным изменением кривизны и с фиксированными участками, геометрически точно совпадающими с дугами окружностей;

— разработан документ MathCAD для анализа вертикального перемещения толкателя, скоростей, ускорений, третьих производных вертикального перемещения толкателя.

*Приложение для моделирования функциональных эстетических кривых на базе аналитических кривых*

На кафедре основ конструирования механизмов и машин УГАТУ разрабатывается специализированное приложение для моделирования функциональных эстетических кривых и поверхностей (разработчики: В.Г. Муфтеев, Р.А. Зиятдинов, Р.И. Набиев).

Эстетические качества изделия играют важную роль в его продвижении на рынке сбыта. Эстетика внешнего облика и внутреннего дизайна автомобиля является важнейшей характеристикой при оценке автомобиля покупателем. Эстетика внешнего и внутреннего дизайна становится значимой и для множества других объектов промышленного

дизайна. Таким образом, эстетика становится важной составляющей потребительских свойств изделия.

К эстетической оценке кривых и поверхностей предлагается многокритериальный подход [18].

Приоритетным является оценка по критериям плавности. Экспертная оценка с позиций законов технической эстетики правомерна только после оценки на плавность.

*Приложение Mathematica*

В приложении используется десктопный вариант Mathematica.

В приложении реализованы методы приближения фиксированных аналитических функциональных и эстетических кривых. Для моделирования эстетических кривых используется универсальная формула Суперспирали Зиятдинова [19]. С помощью параметров управления формой (a, b, c) можно генерировать любую известную спираль (клотоиду, логарифмическую спираль, эвольвенту) и любую спиралевидную кривую.

NURBS-шаблоны эстетических кривых передаются в CAD-системы в виде DXF файлов или через Геометрический Буфер.

*Web-приложение на интегрированной платформе*

Данное приложение обходится без десктопного варианта Mathematica.

В облачном варианте реализованы методы приближения фиксированных аналитических функциональных и эстетических кривых и методы построения плавных участков сопряжения.

В приложении предлагается техника (методика) моделирования эстетических кривых в интегрированной системе Web FairCurveModeler + Cloud Wolfram + Excel VBA. Web FairCurveModeler обеспечивает интерфейс между CAD-системой пользователя и реализацию запросов на моделирование функциональных и эстетических кривых. В Cloud Wolfram реализуются расчеты определения функциональных и эстетических на основе сложных аналитических выражений функциональных (цепная линия, клотоида, эвольвента, коническая спираль и т.п.) и эстетических кривых и Суперспирали Зиятдинова.

### *Прикладная САПР трассирования дороги*

Прикладная САПР трассирования дороги разрабатывается на кафедре автомобильных дорог и технологии строительного производства архитектурно-строительного института УГНТУ (разработчики: В.Г. Муфтеев, М.А. Талыпов, М.М. Фаттахов, М.М. Абдуллин, П.А. Федоров).

Теоретические основы разработки прикладной САПР приведены в [20, 21].

Большое значение для повышения качества трассы имеет уникальная функция моделирования  $\nu$ -кривой высокого качества на касательной ломаной. Данная функция позволяет моделировать трассу дороги по теодолитным ходам. При этом качество трассы не отличается от моделирования по реперным точкам.

Открытый авторами эффект влияния потенциальной энергии кривой линии траектории движения материальной частицы с трением оказывает существенное влияние на способ проектирования трассы дороги.

В перспективных исследованиях авторы планируют обосновать и реализовать высокий порядок гладкости (не ниже 4-го порядка) трассы дороги в плане и в профиле.

Прикладная САПР трассирования дороги разрабатывается на основе релиза программы FairCurveModeler на платформах AutoCAD и AutoCAD Civil [6].

Авторы считают, что прикладная САПР трассирования дороги может найти применение и в трубопроводном транспорте, особенно при проектировании переходных участков трубопроводов на поворотах и пересечениях естественных препятствий вида русла рек.

#### *Образование*

На кафедре основ конструирования и машин разрабатывается интерактивное учебное пособие в рамках образовательной системы Moodle УГАТУ (разработчики В.Г. Муфтеев, А.П. Зелев, Р.И. Набиев, Р.И. Ахметшин).

В [22] предложен инновационный подход к обучению графическим дисциплинам и основам САПР. Этот подход реализован в виде учебного курса обучения основам САПР КОМПАС 3D на платформе образовательной системы Moodle в УГАТУ.

В существующих САПР общего машиностроения (КОМПАС, AutoCAD, nanoCAD) отсутствуют специальные команды построения кривых и поверхностей класса А и F.

Будущие инженеры, которые обучаются методам геометрического моделирования с применением функционала обычных машиностроительных САПР, не получают знаний, навыков и умения моделирования кривых и поверхностей высокого качества для изделий с функциональными кривыми и поверхностями. И в будущем они обречены на проектирование изделий с низкими функциональными характеристиками.

Для обучения инновационным методам моделирования кривых линий высокого качества в среде КОМПАС ГРАФИК на основе функционала ПМК FairCurveModeler разработано интерактивное учебное пособие '6 Моделирование кривых линий класса F'. Учебное пособие включено в курс обучения основам САПР КОМПАС 3D на платформе образовательной системы Moodle в УГАТУ [23].

В учебном пособии кратко излагается теория кривых линий высокого качества по критериям плавности, описываются способы моделирования кривых с применением программы FairCurveModeler на различных видах исходных данных, показывается преимущество способов моделирования перед существующими способами в САД-системе КОМПАС 3D. Даются упражнения для освоения способов. Приводятся контрольные вопросы для закрепления изученного материала. Предлагается интерактивный тест с получением оценки.

#### **Выводы**

В статье предложен программно-методический комплекс FairCurveModeler для моделирования кривых линий и поверхностей класса F (Functional). Качество кривых и поверхностей класса F превосходит на порядок качество кривых и поверхностей класса А.

На основе ПМК FairCurveModeler разработаны прикладные САПР для проектирования объектов с функциональными кривыми и поверхностями.

Показано, что концепция применения кривых высокого качества по критериям плавности позволяет улучшать качество проектируемых изделий.

### Список литературы

1. Муфтеев В.Г., Мударисов С.Г., Фархутдинов И.М., Марданов А.Р., Семенов А.С., Талыпов М.А. Обоснование выбора оптимальной формы функциональной кривой динамической поверхности технического изделия // Известия Международной академии аграрного образования. 2013. Вып. 17. С. 90–93.
2. Muftejev V. Modeling class F NURBS curves in the integrated environment — CAD-system + web-app FairCurveModeler + Mathematica / Wolfram Library Archive. MathSource. 2013-07-26. URL: <http://library.wolfram.com/infocenter/MathSource/8465> (дата обращения: 01.07.2017).
3. Муфтеев В.Г. Конструирование плоских кривых методом огибающей // Изв. вузов. Авиационная техника. 1980. № 4. С. 43–47.
4. Муфтеев В.Г., Марданов А.Р. Геометрическое моделирование кривых линий высокого качества // Прикладная геометрия. Applied Geometry [Электронный ресурс]. М.: МАИ, 2006. № 18, Вып. 8. Режим доступа к журн.: <http://www.mai.ru>. Загл. с титул. экрана. С. 37–66.
5. Норенков И.П. Автоматизированное проектирование. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 188 с.
6. URL: [https://apps.autodesk.com/ACD/en/Detail/Index?id=4526969846340104233&appLang=en&os=Win32\\_64&mode=preview&utostart=True&loginRequired=True](https://apps.autodesk.com/ACD/en/Detail/Index?id=4526969846340104233&appLang=en&os=Win32_64&mode=preview&utostart=True&loginRequired=True).
7. Муфтеев В.Г., Аминев Р.И., Гизатова Д.Х., Талыпов М.А. Открытая платформа для разработки прикладных САПР изделий с функциональными кривыми и поверхностями // Проблемы строительного комплекса России: матер. XX Междунар. науч.-техн. конф. 2016. С. 115–117.
8. Муфтеев В.Г., Марданов А.Р., Романюк А.Н., Турга В.Г., Фархутдинов И.М. Программа изометрического моделирования кривых линий высокого качества. Web-приложение САД-систем // Компьютерная графика и распознавание изображений: матер. Междунар. науч.-техн. интернет-конф. Винница, 2012. С. 127–139.
9. Щучкин Н.В. Лемешные плуги и луцильники. М.: Машгиз, 1952. 291 с.
10. Патент 111380 РФ, МПК Ф 01 В 15/08. Корпус плуга / С.Г. Мударисов, В.Г. Муфтеев, И.М. Фархутдинов (РФ). 2011135766/13, Заявл. 26.08.2011; Опубл. 20.12.2011 Бюл. № 35.
11. Мударисов С.Г., Муфтеев В.Г., Фархутдинов И.М. Оптимизация геометрии лемешно-отвальной поверхности плуга // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2009. № 4. С. 17–19.
12. Свидетельство программы на ЭВМ № 2011614160 Россия. Программа формирования предельной линии задира на отсеке лемешно-отвальной поверхности корпуса плуга / В.Г. Муфтеев, С.Г. Мударисов, А.Р. Марданов, И.М. Фархутдинов. 2010612350; заявл. 05.04.2011; опубл. 27.05.2011. 10 с.
13. Муфтеев В.Г., Мударисов С.Г., Фархутдинов И.М., Марданов А.Р., Семенов А.С., Талыпов М.А. Обоснование выбора оптимальной формы функциональной кривой динамической поверхности технического изделия // Известия Международной академии аграрного образования. 2013. Вып. 17. С. 90–93.
14. Фархутдинов И.М. Совершенствование лемешно-отвальной поверхности корпуса плуга на основе моделирования технологического процесса вспашки: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 2012. 176 с.
15. Интервью с А. Рожковым. Кулачки анфас и в профиль // За рулем. 1997. № 5. С. 162–163.
16. Авторское свидетельство 1237778, МПК F 01 L, 1/08. Кулачок привода клапана / А.П. Рожков, приоритет от 5.09.1983, зарегистрирован 15.02.1986; с 1.07.1991 выдан патент взамен авторского свидетельства.
17. Neamtu M., Pottmann H., Schumaker L.L. Designing NURBS Cam Profiles Using Trigonometric Splines // Journal of Mechanical Design. 1998. No. 120 (2). P. 175–180.
18. Муфтеев В.Г., Зиатдинов Р.А. Функциональность и эстетичность кривых линий в промышленном дизайне: многокритериальный подход к оценке качества форм в САД-системах будущего // Вестник машиностроения. 2018. № 7. С. 23–27.
19. Ziatdinov R. Family of Superspirals with Completely Monotonic Curvature Given in Terms of Gauss Hypergeometric Function //

Computer Aided Geometric Design. 2012. No. 29 (7). P. 510-518.

20. Фаттахов М.М., Федоров П.А., Абдуллин М.М., Муфтеев В.Г., Марданов А.Р. Моделирование параметров автомобильных дорог в архитектурно-ландшафтном проектировании (с элементами дорожной геометрии). Уфа: Нефтегазовое дело, 2014. 268 с.

21. Муфтеев В.Г., Талыпов М.А., Абдуллин М.М., Федоров П.А., Фаттахов М.М. Проектирование оси трассы с помощью программы Faircurvemodeler // Проблемы строительного комплекса России: матер. XVIII Междунар. науч.-техн. конф. 2014. С. 152–155.

22. Зелев А.П., Муфтеев В.Г., Талыпов М.А. Концепция информационной системы преподавания графических дисциплин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. Т. 13. № 2. С. 41–47.

23. URL: [http://fair-nurbs.ru/CONTENT\\_KG/MU\\_KG\\_UAI.htm](http://fair-nurbs.ru/CONTENT_KG/MU_KG_UAI.htm).

### References

- Mufteev V.G., Mudarisov S.G., Farhutdinov I.M., Mardanov A.R., Semenov A.S., Talypov M.A. Determination of the Optimal Form of Functional Curve of Working Surface of Technical Object. *News of the International Academy of Agrarian Education*, 2013, Issue 17, pp. 90–93. [in Russian].
- Muftejev V. Modeling Class F NURBS Curves in the Integrated Environment — CAD-system + web-app FairCurveModeler + Mathematica. *Wolfram Library Archive. MathSource*. 2013-07-26. URL: <http://library.wolfram.com/infocenter/MathSource/8465/> (accessed 01.07.2017). [in Russian].
- Mufteev V.G. The construction of plane curves by the envelope method. *Izv. vuzov. Proceedings of Higher Educational Institutions. Aviation Equipment*, 1980, No. 4, pp. 43–47. [in Russian].
- Mufteev V.G., Mardanov A.R. Geometric Modeling of High-Quality Curves. *Applied Geometry [Electronic Resource]*. Moscow, MAI, 2006, No. 18, Issue 8, pp. 37–66. Available at: <http://www.mai.ru>. [in Russian].
- Norenkov I.P. *Computer-Aided Design*. Moscow, MSTU named for N.Je. Bauman, 2000. 188 p. [in Russian].
- URL: [https://apps.autodesk.com/ACD/en/Detail/Index?id=4526969846340104233&appLang=en&os=Win32\\_64&mode=preview&autostart=True&loginRequired=True](https://apps.autodesk.com/ACD/en/Detail/Index?id=4526969846340104233&appLang=en&os=Win32_64&mode=preview&autostart=True&loginRequired=True).
- Mufteev V.G., Aminev R.I., Gizatova D.H., Talypov M.A. Open Platform for the Development of Applied CAD Products with Functional Curves and Surfaces. *Materials of XX International Scientific and Technical Conference «Problems of the Russian Construction Industry»*, 2016, pp. 115–117. [in Russian].
- Mufteev V.G., Mardanov A.R., Romanjuk A.N., Turta V.G., Farhutdinov I.M. Program of Isogeometric Modeling of High-Quality Curves. Web-Application of CAD-Systems. *Materials of International Scientific and Technical Internet-Conference «Computer Graphics and Image Recognition»*. Vinnitsa, 2012, pp. 127–139. [in Russian].
- Shhuchkin N.V. *Reversible Plows and Cultivators*. Moscow, Mashgiz Publ., 1952. 291 p. [in Russian].
- Mudarisov S.G., Mufteev V.G., Farhutdinov I.M. *Plow Body*. Patent RF, No. 111380, 2011. [in Russian].
- Mudarisov S.G., Mufteev V.G., Farhutdinov I.M. Optimization of the Geometry of the Plowshare-Plow Surface. *Mechanization and Electrification of Agriculture*, 2009, No. 4, pp. 17–19. [in Russian].
- Mudarisov S.G., Mufteev V.G., Farhutdinov I.M., Mardanov A.R. *The Program of Formation of the Limiting Line of a Teaser on a Compartment of a Plowshare Leach-And-Dump Surface*. Program for PC, No. 2011614160, 2011. [in Russian].
- Mufteev V.G., Mudarisov S.G., Farhutdinov I.M., Mardanov A.R., Semenov A.S., Talypov M.A. Substantiation of the Choice of the Optimal Shape of the Functional Curve of the Dynamic Surface of a Technical Product. *Izvestiya International Academy of Agrarian Education*, 2013, Issue 17, pp. 90–93. [in Russian].
- Farhutdinov I.M. *Improvement of the Plowshare Surface on the Basis of Plowing Process Modeling*. Cand. Engin. Sci. Diss. Ufa, 2012. 176 p. [in Russian].
- Interview with A. Rozhkov. *Cams in Full Face and in Profile*. Steering, 1997, No. 5, pp. 162–163. [in Russian].

16. Rozhkov A.P. *Cam Valve Actuator*. Certificate of Authorship RF, No. 1237778, 1991. [in Russian].
17. Neamtu M., Pottmann H., Schumaker L.L. Designing NURBS Cam Profiles Using Trigonometric Splines. *Journal of Mechanical Design*, 1998, No. 120 (2), pp. 175–180.
18. Mufteev V.G., Ziatdinov R.A. Functionality and Aesthetics of Curved lines in Industrial Design: a Multi-Criteria Approach to assessing the Quality of Forms in CAD Systems of the Future. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2018, No. 7, pp. 23–27.
19. Ziatdinov R. Family of Superspirals with Completely Monotonic Curvature Given in Terms of Gauss Hypergeometric Function. *Computer Aided Geometric Design*, 2012, No. 29 (7), pp. 510–518. [in Russian].
20. Fattahov M.M., Fedorov P.A., Abdullin M.M., Mufteev V.G., Mardanov A.R. *Modeling Highway Parameters in Architectural and Landscape Design (with Elements of Road Geometry)*. Ufa, Neftegazovoe delo Publ., 2014. 268 p. [in Russian].
21. Mufteev V.G., Talypov M.A., Abdullin M.M., Fedorov P.A., Fattahov M.M. Designing of a Path Axis Using the Fair-curve modeler Program. *Materials of XX International Scientific and Technical Conference «Problems of the Russian Construction Industry»*, 2014, pp. 152–155. [in Russian].
22. Zelev A.P., Mufteev V.G., Talypov M.A. Concept of the Information System for Teaching Graphic Disciplines. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2017, Vol. 13, No. 2, pp. 41–47. [in Russian].
23. URL: [http://fair-nurbs.ru/CONTENT\\_KG/MU\\_KG\\_UAI.htm](http://fair-nurbs.ru/CONTENT_KG/MU_KG_UAI.htm).



**Татаринов А. И.**

**Tatarinov A. I.**

*аспирант кафедры «Информационные технологии и управляющие системы», ГБОУ ВО Московской области «Технологический университет», инженер, АО «Научно-производственное объединение измерительной техники», г. Королев, Российская Федерация*

УДК 62-83:681.5

## СТРУКТУРНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПУНКТАМИ

Для анализа таких сложных систем, как мобильный измерительный пункт (МИП), следует применять теорию систем и системного анализа. Это позволяет оценить работу любого технического устройства, как единого целого, так и отдельных его элементов, понять структуру устройства, выявить закономерности функционирования его частей.

Дистанционное управление напрямую связано с автоматизацией управления. Автоматизированная система управления (АСУ) — комплекс аппаратных и программных средств, предназначенный для управления различными процессами в рамках технологического процесса, производства, предприятия. АСУ применяются в различных отраслях промышленности, энергетике, транспорте и т.п. Термин «автоматизированная», в отличие от термина «автоматическая», подчёркивает сохранение за человеком-оператором некоторых функций, либо наиболее общего, целеполагающего характера, либо не поддающихся автоматизации. Важнейшая задача АСУ — повышение эффективности управления объектом на основе роста производительности труда и совершенствования методов планирования процесса управления.

С целью обеспечения реализации дистанционного управления (ДУ) мобильным измерительным пунктом, а также получения от него измерительной информации и информации состояния требуется проанализировать все аспекты информационного взаимодействия с МИП.

В результате проведенного анализа выяснилось, что в информационном обмене со стороны МИП должны участвовать следующие составные части: сервер мобильного измерительного пункта, система мобильная антенная, малогабаритная приемная радиотелеметрическая станция.

Также проведенный анализ дает понять, что информационное взаимодействие с МИП должно организовываться по следующим направлениям:

- передача на сервер МИП исходных данных для проведения сеансов измерений;
- прием от сервера МИП информации о текущем состоянии;
- передача от сервера МИП зарегистрированной измерительной информации;
- дистанционное управление МИП через сервер МИП.

В данной статье исследованы схемы диагностики и дистанционного управления мобильными измерительными пунктами, в результате исследований был построен алгоритм работы и логика функционирования программного обеспечения комплексной системы дистанционного управления и диагностики мобильных измерительных пунктов, в основе которой лежит модернизация мобильного измерительного пункта путем создания клиент-серверной связи.

**Ключевые слова:** телеметрическая информация, ракетно-космическая техника, мобильный измерительный пункт, система дистанционного управления, схема диагностики, схема дистанционного управления, информационное взаимодействие.

## STRUCTURAL IDENTIFICATION OF REMOTE CONTROL SYSTEMS OF MOBILE MEASURING POINTS

To analyze such complex systems as mobile measuring point (MMP), apply the systems theory and system analysis. This allows you to evaluate the work of any technical device, as a whole, and its individual elements, to understand the structure of the device to reveal the regularities of functioning of its parts.

Remote control is directly related to automation of control. Automated control system (ACS) — a set of hardware and software tools designed to manage various processes within the technological process, production, enterprise. ACS is used in various industries, energy, transport, etc. The term «automated», in contrast to the term «automatic», emphasizes the retention of some functions for the operator, or the most general, purposeful character, or not automatable. The most important task of the ACS is to increase the effectiveness of the management of the facility on the basis of increasing labor productivity and improving the methods of planning the management process.

To ensure the implementation of remote control of mobile measurement point, and getting measurement information and status information required to perform all aspects of information interaction with the MMP.

In the result of the analysis revealed that in the exchange of information by the MMP should involve the following components: the mobile server from the measuring point, the mobile antenna, compact each of the radio-metric station.

Also, the analysis makes clear that the information interaction with the MMP should be organized in the following areas:

- transfer to the server MMP of original data for sessions of measurements;
- receiving from the server MMP information on the current status;
- transmission from the server to MMP was the measuring data;
- remote control MMP using the server MMP.

Schemes of diagnostics and remote control of mobile measuring points are investigated in this article. As a result of the research, the algorithm of operation and logic of functioning of the software of the integrated remote control and diagnostics system for mobile measuring points were constructed, based on the modernization of the mobile measuring point by creating a client-server connection.

**Key words:** telemetry data, space-rocket engineering, mobile measuring point, remote control system, diagnostic scheme, remote control scheme, information interaction.

Немаловажное значение при создании и модернизации новых измерительных комплексов имеет резкое сокращение экономических затрат за счёт отказа от строительства и содержания стационарных зданий и сооружений путём организации вахтового метода применения мобильных измерительных пунктов (МИП). При этом перспективы реализации дистанционного управления (ДУ) хотя бы частью узловых агрегатов мобильного измерительного пункта дадут удобство и заметную выгоду в использовании измерительной аппаратуры ракетно-космической техники [1].

Для эффективного функционирования системы дистанционного управления мобильными измерительными пунктами разработаны следующие режимы работы

системы дистанционного управления (рисунок 1):

«Idle» — Режим ожидания, в этом режиме сервер ДУ ПКТИ ждёт команды на переход в другие режимы;

«Run» — Идёт сеанс измерения, антенна и МПРС работают;

«Wait» — На изготовке, антенна ждет время старта;

«Obstacle» — Выполняется процедура оценки помеховой обстановки, засекаются источники помех. Оценка осуществляется для заданных литер частот приемника;

«AutoChecking» — Выполняется процедура автономной проверки. Антенна вращается, передаются сигналы через имитатор, оценивается состояние в/ч тракта.

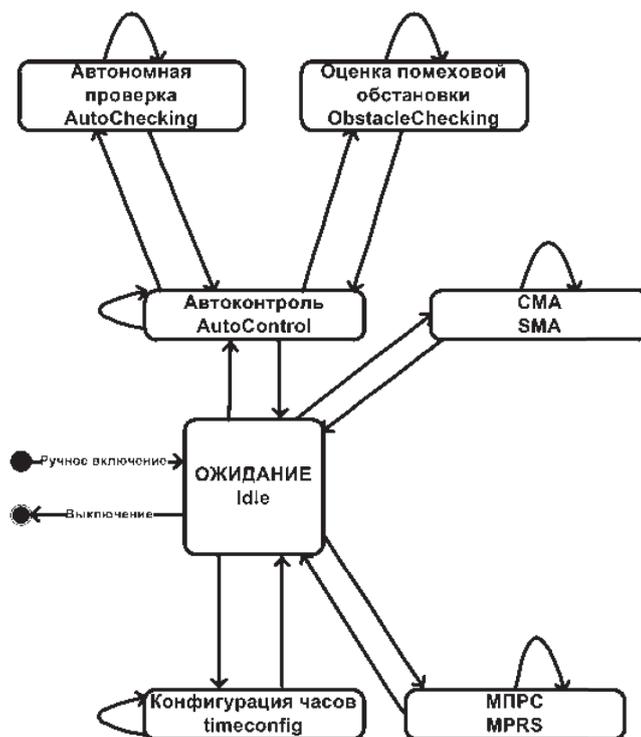


Рисунок 1. Схема режимов работы сервера МИП

Во всех режимах поддерживается запрос текущего состояния и безусловный возврат в режим «Idle» — исходное состояние объекта управления. Для принудительного выхода из режима предусмотрена команда.

Исходя из проведенного анализа схем системы дистанционного управления МИП [2-4], был разработан перечень режимов СМА и МПРС, необходимых для работы системы. Взаимодействие этих режимов показано на схемах: рисунок 2 — для СМА и рисунок 3 — для МПРС.

«Спящий» режим является базовым, антенна неподвижна. Из него происходит переход к рабочим режимам, и в него осуществляется возврат при выходе из рабочих режимов.

Команда перехода в режим «Переброс» сопровождается координатами точки (азимут, угол места). При получении команды антенна начинает движение в заданную точку.

Для работы в режиме «Табличный» требуются предварительные действия. Во время нахождения в режиме «Спящий» подается команда инициализации новой таблицы априорных целеуказаний. Находясь в режиме «Табличный», при наступлении времени

начала отсчёта антенна начинает движение в соответствии с заданной таблицей.

Режим «Оперативный» предназначен для выполнения скорректированных ЦУ, поступающих в реальном масштабе времени. В отличие от априорных ЦУ в относительной шкале, оперативные ЦУ даются в формате московского времени.

В режиме «Автономный» выполняются технологические операции с участием оператора на измерительном пункте, например регламентные работы по техническому обслуживанию.

Режим «Вращение» обеспечивает поворот антенны с постоянной скоростью, заданной в процентах от номинальной частоты оборотов привода. Применяется для проверки работоспособности. Путём циклического опроса состояния в процессе вращения пользователь системы ДУ удостоверяется в равномерности движений опорно-поворотного устройства и в возможности установки углов по всему предусмотренному диапазону азимута и угла места.

Для функционирования МПРС предусматриваются следующие режимы работы:

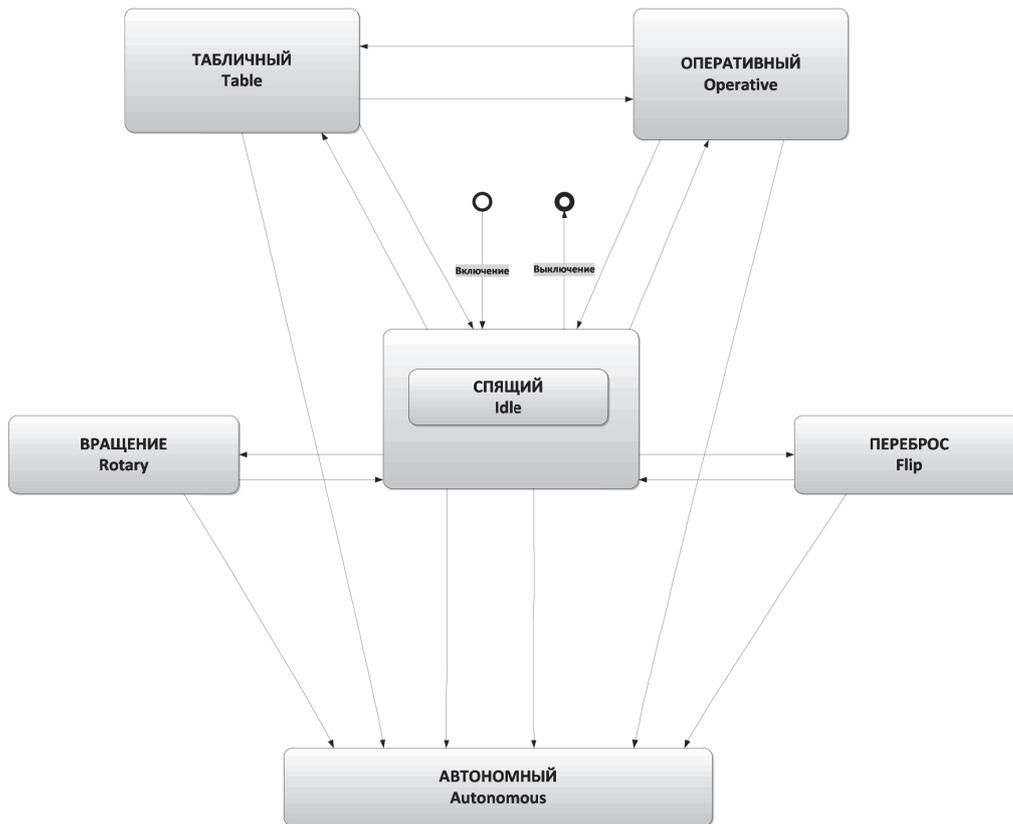


Рисунок 2. Схема режимов антенной системы

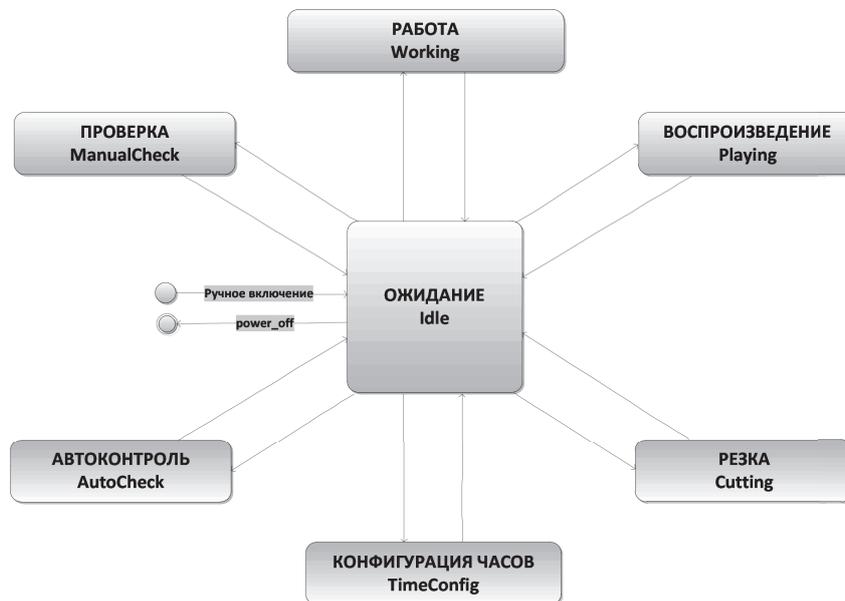


Рисунок 3. Схема режимов приемной станции

а) «Ожидание» (Idle) — исходное состояние, в котором осуществляется конфигурирование объекта. В данном режиме доступны команды установки и запроса опций, а также команды перехода к другим режимам работы;

б) «Конфигурация часов» (TimeConfig) — для установки часов с синхронизацией по сигналам СЕВ или GPS/ГЛОНАСС. По оконча-

нии выполнения конфигурации часов объект управления автоматически должен вернуться в режим «Ожидание», из которого далее можно осуществить запрос параметров времени и проверить корректность установки;

в) «Автоконтроль» (AutoCheck) — диагностический режим для оценки готовности.

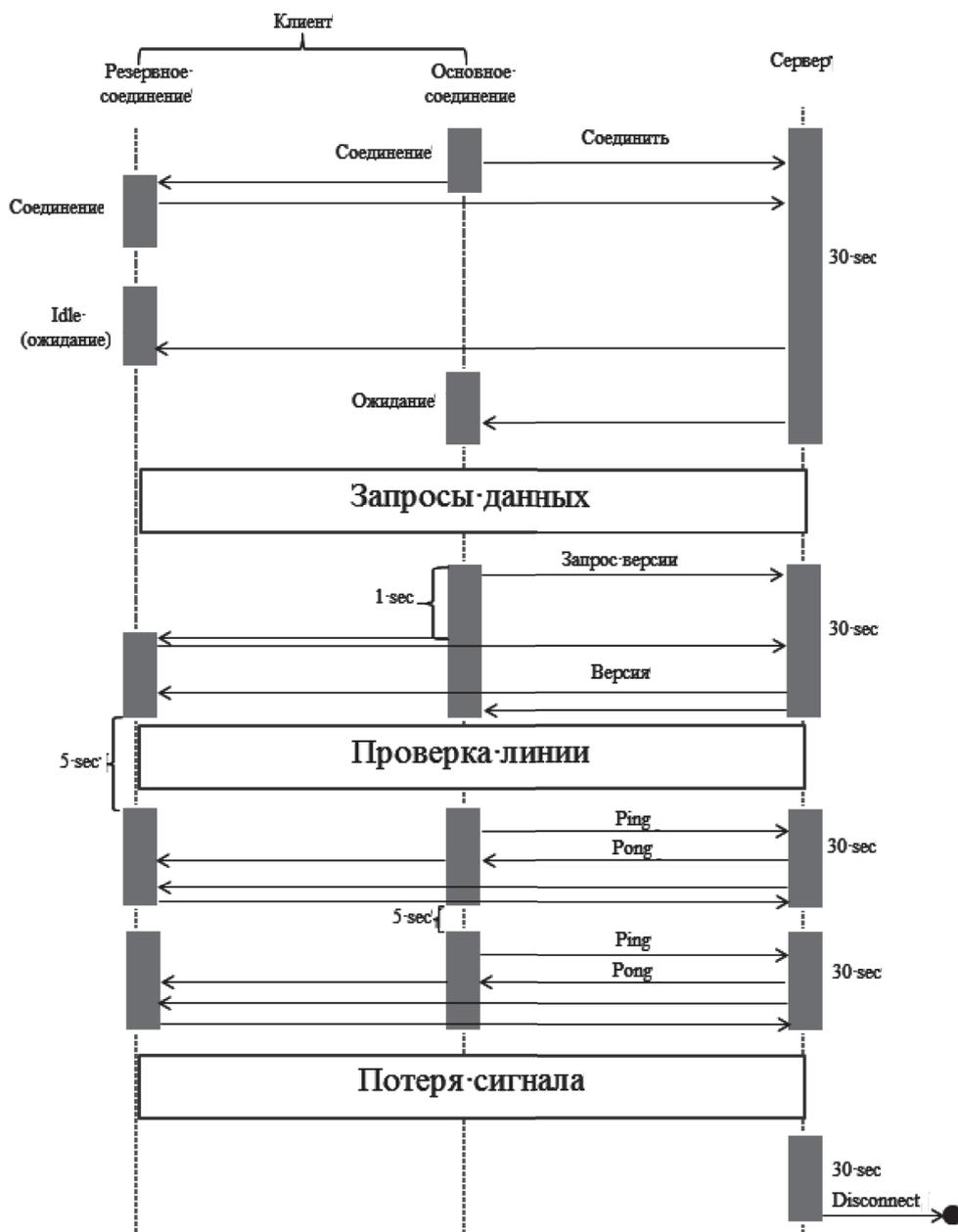


Рисунок 4. Диаграмма поддержки линии связи клиент-серверной связи

По окончании автоконтроля осуществляется возврат в режим «Ожидание»;

d) «Работа» (Working) — рабочий режим, в котором доступны команды запуска и останова регистрации файлов телеметрической информации (ТМИ) и рассылки репортажных потоков ТМИ по сети. Исходными данными на регистрацию и рассылку является «программа сеанса», устанавливаемая в режиме «Ожидание». В режим «Ожидание» объект управления переходит только по прямой команде на возврат в исходное состояние;

е) «Проверка» (ManualCheck) — аналог рабочего режима с приёмом сигнала от

радиоимитатора. Доступны команды запуска и останова регистрации и рассылки;

f) «Воспроизведение» (Playing) — воспроизведение репортажа ТМИ из зарегистрированных файлов на заданном временном интервале. Доступны команды запуска и останова рассылки репортажных потоков. По завершению воспроизведения осуществляется возврат в режим «Ожидание»;

г) «Резка» (Cutting) — выборка телеметрической информации по заданному временному интервалу — запись вырезанного фрагмента ТМИ из ранее зарегистрированного потока. По окончании формирования

файлов производится возврат в режим «Ожидание».

Во всех режимах поддерживается запрос текущего состояния и безусловный возврат в режим «Ожидание» — исходное состояние объекта управления.

Для исследований структурных особенностей работы линии связи ДУ МИП была построена диаграмма поддержки линии клиент-серверной связи (рисунок 4), которая показывает, как происходят подключение клиента к серверу ДУ МИП, запрос данных, а также проверка линии связи и потеря сигнала [5, 6].

### Список литературы

1. Современная телеметрия в теории и на практике / А.В. Назаров, Г.И. Козырев, И.В. Щитов, В.П. Обрученков, А.В. Древин, В.Б. Краскин, С.Г. Кудряков, А.И. Петров, С.М. Соколов, В.Л. Якимов, А.И. Лоскутов. Санкт-Петербург: Наука и техника, 2007. 627 с.

2. Татаринов А.И. Анализ структуры мобильных измерительных пунктов ракетно-космической техники // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2016): сб. ст. VI Междунар. заоч. науч.-техн. конф.: В 2 Ч. Тольятти: Изд-во ПВГУС, 2016. Ч. 2. С. 246–251.

3. Татаринов А.И. Построение и исследование структурных схем диагностики и дистанционного управления мобильных измерительных точек ракетно-космической техники // Развитие современной цивилизации: ответы на вызовы времени: сб. тр. по матер. Междунар. науч.-практ. конф. 25 ноября 2015 года, г.о. Королёв, «МГОТУ» / Под общ. научн. ред. В.А. Смирнова. М.: Научный консультант, 2016. С. 359–365.

4. Татаринов А.И. Применение мобильных измерительных пунктов для решения информационно-телеметрического обеспечения при запуске ракетно-космической техники // Эволюционные процессы информационных технологий: сб. тр. по матер. Междунар. науч.-практ. конф. 25 ноября 2015 года, г.о. Королёв, «МГОТУ» / Под общ. научн. ред. В.А. Смирнова. М.: Научный консультант, 2016. С. 50–56.

### Вывод

Исследованы схемы диагностики и дистанционного управления мобильными измерительными пунктами, в результате исследований был построен алгоритм работы и логика функционирования программного обеспечения комплексной системы дистанционного управления и диагностики мобильных измерительных пунктов, в основе которой лежит модернизация мобильного измерительного пункта путем создания клиент-серверной связи.

5. Системный анализ в области управления и обработки информации / В.М. Артюшенко, Т.С. Аббасова, Ю.В. Стреналюк, Н.А. Васильев, И.М. Белюченко, К.Л. Самаров, В.Н. Зиновьев, С.П. Посеренин, Г.Г. Вокин, А.П. Мороз, В.С. Шайдуров, С.С. Шаврин / Под науч. ред. д-ра техн. наук, проф. В.М. Артюшенко. Королев МО: МГОТУ, 2015. 168 с.

6. Современные исследования в области теоретических основ информатики, системного анализа, управления и обработки информации / В.М. Артюшенко, Т.С. Аббасова, И.М. Белюченко / Под науч. ред. д-ра техн. наук, проф. В.М. Артюшенко. Королев, ГБОУ ВПО МО ФТА, 2014. 318 с.

### References

1. Nazarov A.V., Kozyrev G.I., Shhitov I.V., Obruchenkov V.P., Drevin A.V., Kraskin V.B., Kudrjakov S.G., Petrov A.I., Sokolov S.M., Jakimov V.L., Loskutov A.I. Modern Telemetry in Theory and Practice. Saint-Petersburg, Nauka i tehnika Publ., 2007. 627 p. [in Russian].

2. Tatarinov A.I. Analysis of Mobile Measuring Points Structure of Rocket and Space Technology. *Collection of Articles of VI International Corresponding Scientific and Technical Conference «Information Technology. Radioelectronics. Telecommunications (ITRT-2016)»: In 2 Ch. Togliatti, PVGUS Publ., 2016, pp. 246–251. [in Russian].*

3. Tatarinov A.I. Development of Modern Civilization: Answers to the Challenges of Time. *Collection of Scientific Works on Materials of International Scientific and Practical Con-*

ference, November 25, 2015, Koroljov, MGOTU. Under Scient. Ed. V.A. Smirnov. Moscow, Nauchnyj konsul'tant Publ., 2016, pp. 359–365. [in Russian].

4. Tatarinov A.I. The Use of Mobile Measuring Points for the Solution of Information and Telemetry Support when Launching Rocket and Space Technology. Collection of Scientific Works on Materials of International Scientific and Practical Conference «Evolutionary Processes of Information Technology», November 25, 2015, Koroljov, MGOTU. Under Scient. Edition of Doctor of Engineering Sciences, Professor V.M. Artjushenko. Moscow, Nauchnyj konsul'tant Publ., 2016, pp. 50–56. [in Russian].

5. Artjushenko V.M., Abbasova T.S., Strenaljuk Ju.V., Vasil'ev N.A., Beljuchenko I.M.,

Samarov K.L., Zinov'ev V.N., Poserenin S.P., Vokin G.G., Moroz A.P., Shajdurov V.S., Shavrin S.S. *System Analysis in the Field of Information Management and Processing*. Under Scient. Edition of Doctor of Engineering Sciences, Professor V.M. Artjushenko. Korolev MO, MGOTU, 2015. 168 p. [in Russian].

6. Artjushenko V.M., Abbasova T.S., Beljuchenko I.M. *Modern Researches in the Field of Theoretical Bases of Computer Science, System Analysis, Management and Information Processing*. Under Scient. Edition of Doctor of Engineering Sciences, Professor V.M. Artjushenko. Korolev, GBOU VPO MO TA, 2014. 318 p. [in Russian].



**Янтилина Л. З.**  
**Yantilina L. Z.**

*аспирант кафедры  
«Телекоммуникационные  
системы», ФГБОУ ВО  
«Уфимский государственный  
авиационный технический  
университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*



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

*доктор технических  
наук, профессор кафедры  
«Телекоммуникационные  
системы», ФГБОУ ВО  
«Уфимский государственный  
авиационный технический  
университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*



**Султанов А. Х.**  
**Sultanov A. Kh.**

*доктор технических  
наук, профессор,  
заведующий кафедрой  
«Телекоммуникационные  
системы», ФГБОУ ВО  
«Уфимский государственный  
авиационный технический  
университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 004.942

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЧИРПИРОВАННОГО ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В RoF

В статье исследуются методы применения чирпированных оптических импульсов в оптических сетях RoF, PON и MAN. Основное применение чирпирования на сетях связи обусловлено задачей компенсации действия хроматической дисперсии. При этом для данных систем важно решить задачу получения чирпированного импульса как можно более дешевым (аппаратно) способом. В частности, это можно обеспечить применением чирпирующего интерферометра Фабри-Перо.

Предложен принцип получения чирпированных оптических импульсов путем подбора параметров чирпирующего интерферометра Фабри-Перо. Для внесения переменного чирпирования в оптический сигнал кристалл из ниобата лития, на котором выполнен интерферометр Фабри-Перо, срезается по оси. Это обеспечивает его неравномерное деформирование при подаче управляющего напряжения, а значит — вносит чирпирование в проходящий сигнал. Следовательно, вносить чирпирование можно плавным изменением рабочей точки интерферометра.

Разработана математическая модель для такого сигнала. Для реализации процесса подбора был составлен алгоритм, написан программный код в программном пакете MATLAB, и выполнен первый прогон итерационного пересчета.

Выполнена экспериментальная апробация предложенного принципа. Для экспериментальной апробации предложенного подхода была собрана установка с использованием оптического BER-тестера со встроенным SFP-модулем и аттенуатором. Длина линии составляла 20 км. Представлены графики зависимости BER от напряжения генератора при подаче на управляющий вход модулятора постоянного напряжения и при подаче линейно-изменяющегося напряжения. Выполнено графическое сравнение результатов имитационного моделирования и результатов эксперимента.

Показано также, что функция чирпа основано на оптических эффектах и оптико-оптических взаимодействиях, следовательно, может использоваться для построения логических устройств управления с точки зрения реализации концепции All Optical Networks. Также функцию чирпа возможно использовать для независимого обмена информацией между

контроллерами-менеджерами в разветвленных сетях, включая программно-конфигурируемые сети SDN и использовать как носителя служебной информации.

**Ключевые слова:** Radio-over-Fiber, полностью оптический сегмент, IR-UWB, управление разветвленной сетью, чирп, интерферометр Фабри-Перо, радиофотонные системы связи, хроматическая дисперсия, PON, MAN.

## MATHEMATICAL MODEL OF DISTRIBUTION OF THE CHIRPED OPTICAL SIGNAL IN RoF SYSTEMS

In the article methods of application of chirped optical pulses in optical networks RoF, PON and MAN are investigated. The main application of chirping on communication networks is due to the task of compensating for the effect of chromatic dispersion. At the same time for these systems it is important to solve the problem of obtaining a chirped pulse as cheap as possible (in hardware) way. In particular, this can be achieved by using a chirping Fabry-Perot interferometer.

The principle of obtaining chirped optical pulses by selecting the parameters of a chirping Fabry-Perot interferometer is proposed. To introduce alternating chirping into the optical signal, a lithium niobate crystal on which a Fabry-Perot interferometer is made is cut off along the axis. This ensures its uneven deformation when applying a control voltage, which means it introduces chirping into the transmitted signal. Consequently, the chirping can be made by smoothly changing the operating point of the interferometer.

A mathematical model for such a signal is developed. To implement the selection process, an algorithm was compiled, a program year was written in the MATLAB software package, and the first iteration count was run.

The experimental approbation of the proposed principle is performed. For the experimental approbation of the proposed approach, an installation was assembled using an optical BER-tester with an integrated SFP-module and an attenuator. The length of the line was 20 km. The graphs of the dependence of the BER on the voltage of the generator are presented when the DC voltage is applied to the control input of the modulator and when a linearly varying voltage is applied. Graphical comparison of results of simulation and experimental results is performed.

It is also shown that the chirp function is based on optical effects and optical-optical interactions, and therefore can be used to construct logical control devices from the point of view of implementing the All Optical Networks concept. Also, the chirp function can be used to independently exchange information between controllers-managers in branched networks, including program-configurable SDN networks and use as a carrier of overhead information.

**Key words:** Radio-over-Fiber, all-optical segment, IR-UWB, branched network control, optical pulse chirp, Fabry-Perot interferometer, radio-photon communication systems, chromatic dispersion, PON, MAN.

### *Введение*

При современных темпах развития современных систем связи важным является увеличение битовой скорости и широкополосности предоставления услуг, а также внедрение «интеллектуальной базы» на нижних сетевых уровнях для возможности управления информационным сигналом с помощью оптических устройств волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП). Высока актуальность этой задачи для волоконно-оптических-радиофотонных систем связи (или Radio-over-Fiber — RoF). В связи с тем

что системы RoF основываются на привлечении физических эффектов к формированию сигналов, существенно упрощается аппаратная часть, что снижает стоимость системы передачи и повышает адаптивность и быстродействие.

При построении высокопроизводительных разветвленных сетей связи, например сетей городского масштаба или Metropolitan Area Networks (MAN) и Passive Optical Networks (PON), данные задачи также актуальны. Поскольку для MAN и PON увеличение общего быстродействия «из конца в

конец» основывается на ускорении процессов управления сигналами [1–4], это увеличивает актуальность интеллектуализации ВОЛП и оправдывает поиск новых средств интеллектуализации. Например, определение и задействование дополнительных «независимых координат» может позволить расширить функциональные возможности сети.

Однако в большинстве случаев такие «независимые координаты» уже освоены и успешно применяются в телекоммуникациях. Соответственно, даже незначительное продвижение в этом направлении представляет значительный технический интерес и является актуальным. Учитывая вышесказанное, изучение возможностей использования такого параметра, как чирп оптического сигнала, является актуальной технической задачей.

### 1. Принципы использования чирпированного оптического импульса на волоконно-оптической линии передачи

Основная сфера применения чирпирования в сетях связи заключается в задаче компенсации действия хроматической дисперсии (ХД), особенно при отсутствии возможности использования системы EDC (Electrical Dispersion Compensate). Это наиболее характерно для систем RoF, PON и MAN в связи с присутствием высоких битовых скоростей (от 10 Гбит/с) и протяжённых ВОЛП (100–150 км). Эффективным решением может быть применение квазисолитонного режима распространения, т.е. случая, когда изначально импульс должен быть сгенерирован чирпированным. При этом также важно найти способ получения чирпированного импульса наиболее дешевым (аппаратно) способом. В частности, это возможно обеспечить использованием чирпирующего интерферометра Фабри-Перо.

Не чирпированный оптический сигнал на выходе интерферометра Фабри-Перо описывается следующим выражением [5]:

$$E_{\text{вых.}}(t) = \sqrt{P_0} \cdot \cos \left[ \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot (-V_b + 2V(t) + \Delta V_1) \right], \quad (1)$$

где  $P_0$  — максимальная оптическая мощность на выходе интерферометра Фабри-Перо;

$V_b$  — напряжение смещения, выставляющее рабочую точку интерферометра Фабри-Перо;  $V_\pi$  — напряжение для обеспечения сдвига фаз на  $\pi$  между двумя плечами интерферометра Фабри-Перо,  $\epsilon$  [3 В, 5 В];  $V(t)$  — сигнал, подаваемый на электрический вход MZM;  $\Delta V_1$  — смещение напряжения, необходимое для подстройки теоретического напряжения смещения под экспериментальное.

Чирпирующий интерферометр Фабри-Перо реализован на пластине ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$ . На подложке из ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$  размещаются волноводы и электроды, к которым прикладывается электрическое напряжение. На электроды подается модулирующий электрический сигнал  $V(t)$  и рабочая точка  $V_b$ , которая выравнивает плечи интерферометра. Чтобы внести переменное чирпирование в оптический сигнал, кристалл из ниобата лития обрезается по оси Z, что служит для обеспечения его неравномерного деформирования при подаче управляющего напряжения, и, следовательно, вносит чирпирование в проходящий сигнал. Таким образом, вносить чирпирование можно плавным изменением рабочей точки интерферометра. Соответственно, напряжение смещения  $V_b$ , которое задает рабочую точку, можно представить в виде:

$$V_b = V_0 + V_N(t), \quad (2)$$

где  $V_0$  — напряжение, которое определяет положение рабочей точки интерферометра Фабри-Перо, подаваемое на его управляющий вход;  $V_N(t)$  — дополнительное (управляющее) напряжение, также подаваемое на управляющий вход.

В данном случае выражение (1) примет следующий вид:

$$E_{\text{вых.}}(t) = \sqrt{P_0} \cdot \cos \left[ \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot (-V_0 - V_N(t) + 2V(t) + \Delta V_1) \right]. \quad (3)$$

Упростив выражение (3), получим следующее:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{вых.}}(t) &= \sqrt{P_0} \cdot \cos \left[ \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot (-V_0 - V_N(t) + 2V(t) + \Delta V_1) \right] = \\
 &= \sqrt{P_0} \cdot \text{Re} \left[ \cos \left( \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot ((-V_0 + 2V(t) + \Delta V_1) - V_N(t)) \right) + \right. \\
 &\quad \left. + j \sin \left( \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot ((-V_0 + 2V(t) + \Delta V_1) - V_N(t)) \right) \right] = \\
 &= \sqrt{P_0} \cdot \text{Re} \left[ e^{j \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot (-V_0 + 2V(t) + \Delta V_1)} \cdot e^{j(-V_N(t))} \right] = \\
 &= \sqrt{P_0} \cdot \cos \left( \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot ((-V_0 + 2V(t) + \Delta V_1) - V_N(t)) \right) = \\
 &= \sqrt{P_0} \cdot \left( \cos \left( \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot (-V_0 + 2V(t) + \Delta V_1) \right) \times \right. \\
 &\quad \times \cos \left( \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot V_N(t) \right) + \sin \left( \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot (-V_0 + 2V(t) + \right. \\
 &\quad \left. + \Delta V_1) \right) \cdot \sin \left( \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot V_N(t) \right) \left. \right). \quad (4)
 \end{aligned}$$

Тогда сигнал на выходе интерферометра Фабри-Перо:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{вых.}}(t) &= \sqrt{P_0} \cdot \cos \left( \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot (-V_0 + 2V(t) + \Delta V_1) \right) \times \\
 &\quad \times \cos \left( \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot V_N(t) \right) + \sqrt{P_0} \cdot \sin \left( \frac{\pi}{2V_\pi} \times \right. \\
 &\quad \left. \times (-V_0 + 2V(t) + \Delta V_1) \right) \cdot \sin \left( \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot V_N(t) \right). \quad (5)
 \end{aligned}$$

Чтобы компенсировать синусоидальные составляющие в выражении (5), будет использована балансная схема, которая состоит из двух интерферометров Фабри-Перо с противофазным смещением управляющих сигналов [5]. В данном случае выражение (5) примет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{вых.}}(t) &= \sqrt{P_0} \cdot \left( \cos \left( \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot (-V_0 + 2V(t) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \Delta V_1) \right) \cdot \cos \left( \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot V_N(t) \right) \right). \quad (6)
 \end{aligned}$$

Изменение показателя преломления кристалла ниобата лития LiNbO<sub>3</sub> описывается выражением [6]:

$$\Delta n = -\frac{n_0^3 \cdot r}{2} \cdot E^a, \quad (7)$$

где  $n_0$  — показатель преломления кристалла ниобата лития без приложенного напряжения;  $r$  — электрооптический коэффициент, м/В;  $E^a$  — прикладываемое к кристаллу электрическое поле.

При учете того что диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  зависит от частоты  $f$  и, соответственно, от длины волны  $\lambda$  [6], то выражение (7) примет вид:

$$\Delta n(\lambda) = -\frac{n_0^3(\lambda) \cdot r}{2} \cdot E^a. \quad (8)$$

При условиях, что  $E^a$  определяется переменным приложенным внешним напряжением  $V_N(t)$ , а напряженность поля от внешнего источника намного больше напряженности поля оптического луча, формула (7) примет следующий вид:

$$\Delta n(\lambda, t) = -\frac{n_0^3(\lambda) \cdot r}{2} \cdot V_N(t) \cdot k, \quad (9)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, равный  $k = \frac{1}{l}$ .

Предположим, что напряженность направлена строго перпендикулярно пластине ниобата лития, тогда  $l = d$ ,  $d$  — толщина кристалла ниобата лития. Учитывая это, выражение для изменения показателя преломления примет вид:

$$\Delta n(\lambda, t) = -\frac{n_0^3(\lambda) \cdot r}{2} \cdot V_N(t) \cdot \frac{1}{d}. \quad (10)$$

Поскольку показатель преломления кристалла ниобата лития в режиме включения/выключения управления можно представить как:  $n(\lambda, t) = n_0(\lambda) + \Delta n(\lambda, t)$ , то тогда оптическая длина определяется через  $l = n \cdot l_0$ , ее изменение равно  $\Delta l = l_0 \cdot (n - n_0)$ , где  $l_0$  — длина ВОЛП. Соответственно, фазовый сдвиг описывается выражением:

$$\Delta \varphi = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta n \cdot l = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (n - n_0) \cdot n \cdot l_0, \quad (11)$$

где  $\varphi$  — фаза изначального оптического сигнала;  $c$  — скорость света в вакууме,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. С учетом вышесказанного, получаем:

$$\Delta\varphi(\lambda, t) = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (n(\lambda, t) - n_0(\lambda)) \cdot n(\lambda, t) \cdot l_0. \quad (12)$$

Следовательно, фазовый сдвиг прямо пропорционален функции chirpa  $C(\lambda, t)$ , и тогда функция chirpa примет вид:

$$\begin{aligned} C(\lambda, t) &= \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (n(\lambda, t) - n_0(\lambda)) \cdot n(\lambda, t) \cdot l_0 = \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot l_0}{\lambda} \cdot (n^2(\lambda, t) - n(\lambda, t) \cdot n_0(\lambda)). \quad (13) \end{aligned}$$

Показатель преломления будет равен:

$$\begin{aligned} n_1(\lambda, t) &= \frac{n_0(\lambda) + \sqrt{n_0^2(\lambda) + \frac{4 \cdot \lambda \cdot C(\lambda, t)}{2 \cdot \pi \cdot l_0}}}{2}, \\ n_2(\lambda, t) &= \frac{n_0(\lambda) - \sqrt{n_0^2(\lambda) + \frac{4 \cdot \lambda \cdot C(\lambda, t)}{2 \cdot \pi \cdot l_0}}}{2}. \quad (14) \end{aligned}$$

Вариант  $n_2(\lambda, t)$  не имеет физического смысла в случае положительного chirpирования, т.к. показатель преломления оказывается меньше нуля. Изменение показателя преломления с учетом (14) примет вид:

$$\Delta n(\lambda, t) = \frac{n_0(\lambda) + \sqrt{n_0^2(\lambda) + \frac{4 \cdot \lambda \cdot C(\lambda, t)}{2 \cdot \pi \cdot l_0}}}{2} - n_0(\lambda). \quad (15)$$

Подставляя в (15) выражение (5), получаем:

$$-\frac{n_0^3(\lambda) \cdot r}{2} \cdot V_N(t) \cdot \frac{1}{d} = \frac{n_0(\lambda) + \sqrt{n_0^2(\lambda) + \frac{4 \cdot \lambda \cdot C(\lambda, t)}{2 \cdot \pi \cdot l_0}}}{2} - n_0(\lambda),$$

откуда  $V_N(t)$  будет равно:

$$\begin{aligned} V_N(t) &= -\frac{2 \cdot d}{n_0^3(\lambda) \cdot r} \times \\ &\times \left( \frac{n_0(\lambda) + \sqrt{n_0^2(\lambda) + \frac{4 \cdot \lambda \cdot C(\lambda, t)}{2 \cdot \pi \cdot l_0}}}{2} - n_0(\lambda) \right). \quad (16) \end{aligned}$$

Функция корректирующего chirpa  $C(\lambda, t)$  примет вид:

$$\begin{aligned} C(\lambda, t) &= \frac{2 \cdot \pi \cdot l_0}{\lambda} \cdot \left( \left( \frac{-n_0^3(\lambda) \cdot r \cdot V_N(t)}{d} + \right. \right. \\ &\left. \left. + n_0(\lambda) \right)^2 - n_0^2(\lambda) \right). \quad (17) \end{aligned}$$

Таким образом, сигнал на выходе интерферометра Фабри-Перо, содержащий началь-

ное chirpирование, будет описываться выражением:

$$\begin{aligned} E_{\text{вых.}}(t) &= \sqrt{P_0} \cdot \left( \cos \left( \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot (-V_0 + 2V(t) + \Delta V_1) \right) \times \right. \\ &\times \left. \cos \left( \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot \left( \frac{2 \cdot d}{n_0^3(\lambda) \cdot r} \cdot \left( \frac{n_0(\lambda) + \sqrt{n_0^2(\lambda) + \frac{4 \cdot \lambda \cdot C(\lambda, t)}{2 \cdot \pi \cdot l_0}}{2}} - n_0(\lambda) \right) \right) \right) \right). \quad (18) \end{aligned}$$

## 2. Задача определения корректирующего chirpa, обеспечивающего наибольшее приближение входной и выходной форм импульса

Чтобы обеспечить передачу оптического сигнала по протяженной ВОЛП без искажений и обеспечить максимальное соответствие форм входного и выходного импульса, необходимо внести в оптический сигнал корректирующий chirp. Решением этой задачи является итерационный пересчет получаемых форм импульса по критерию минимума среднеквадратического отклонения (минимума SKO), для которого применяется интерполяция функции, которая описывает форму входного импульса. Среднеквадратическое отклонение рассчитывается по следующей формуле [6]:

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} (x_i - \bar{x}_i)^2 \cdot p(x) dx}, \quad (19)$$

где  $x_i$  — отсчет эталонной функции;  $\bar{x}_i$  — соответствующий ему отсчет аппроксимирующей функции.

Для подбора функции корректирующего chirpa формула (19) принимает следующий вид:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (E_{\text{вых.}}(t) \cdot C(\lambda, t) - E_{\text{вх.}}(t))^2 dt}, \quad (20)$$

где  $E_{\text{вх.}}(t)$  — желаемая форма импульса на выходе линии;  $T$  — период следования импульсов.

Для реализации процесса подбора был составлен алгоритм и написан в программном пакете MATLAB программный код, по которому был выполнен первый прогон итерационного пересчета. На рисунке 1

представлены входная и выходная формы импульса, при значении СКО:  $\sigma = 6,8212 \cdot 10^{-2}$ .

Для экспериментальной апробации предложенного подхода была собрана установка (рисунок 2), также перед проведением эксперимента было проведено имитационное моделирование.

При исследовании коэффициента битовых ошибок был использован оптический BER-тестер со встроенным SFP-модулем, при этом длина линии составила 20 км. Измерения проводились следующим образом: оптический BER-тестер генерировал PRBS-поток, поступающий на SFP-модуль.

Оптический сигнал с выхода SFP-модуля поступал на аттенюатор, затем на интерферометр Фабри-Перо. После прохождения по линии (20 км) оптический сигнал поступал на приемный вход SFP-модуля, где оптический BER-тестер считывал количество принятых и потерянных битов информации и выводил значение BER. На рисунке 3 показаны графики зависимости BER от напряжения генератора при условии подачи на управляющий вход модулятора постоянного напряжения или же подачи линейно-изменяющегося напряжения.

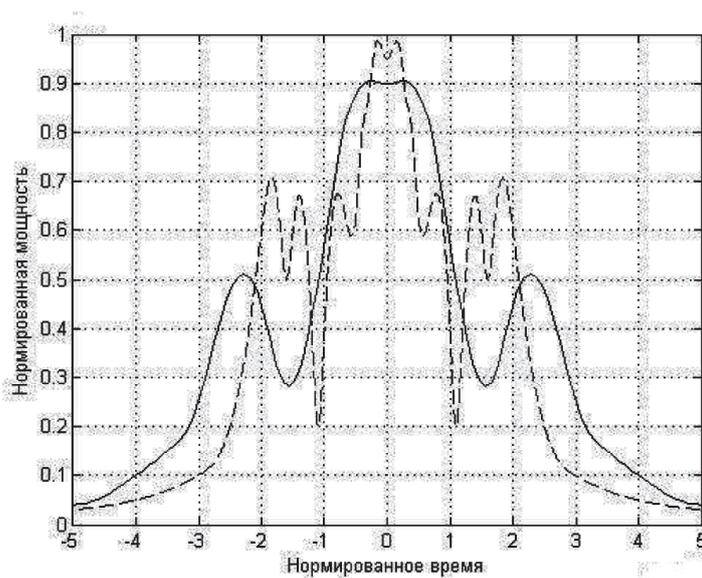


Рисунок 1. Входная (непрерывная) и выходная (пунктирная) формы импульса при значении  $\sigma = 6,8212 \cdot 10^{-2}$

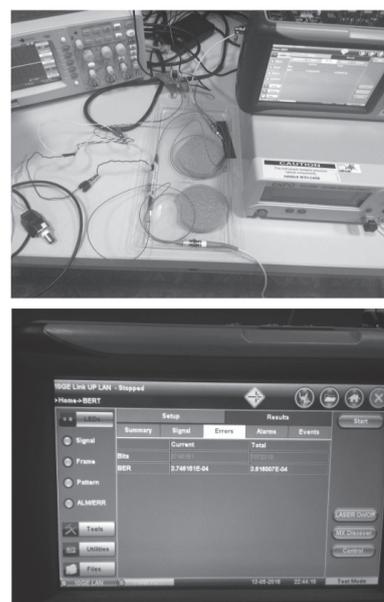
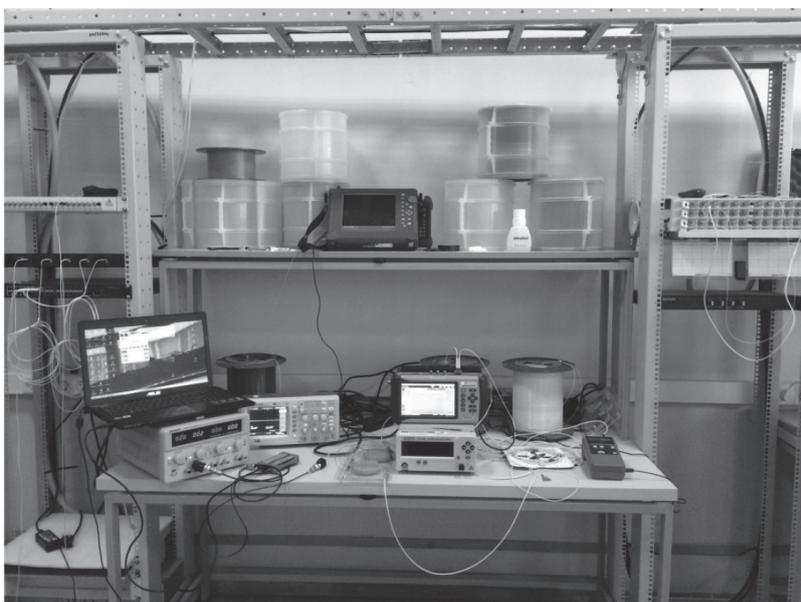
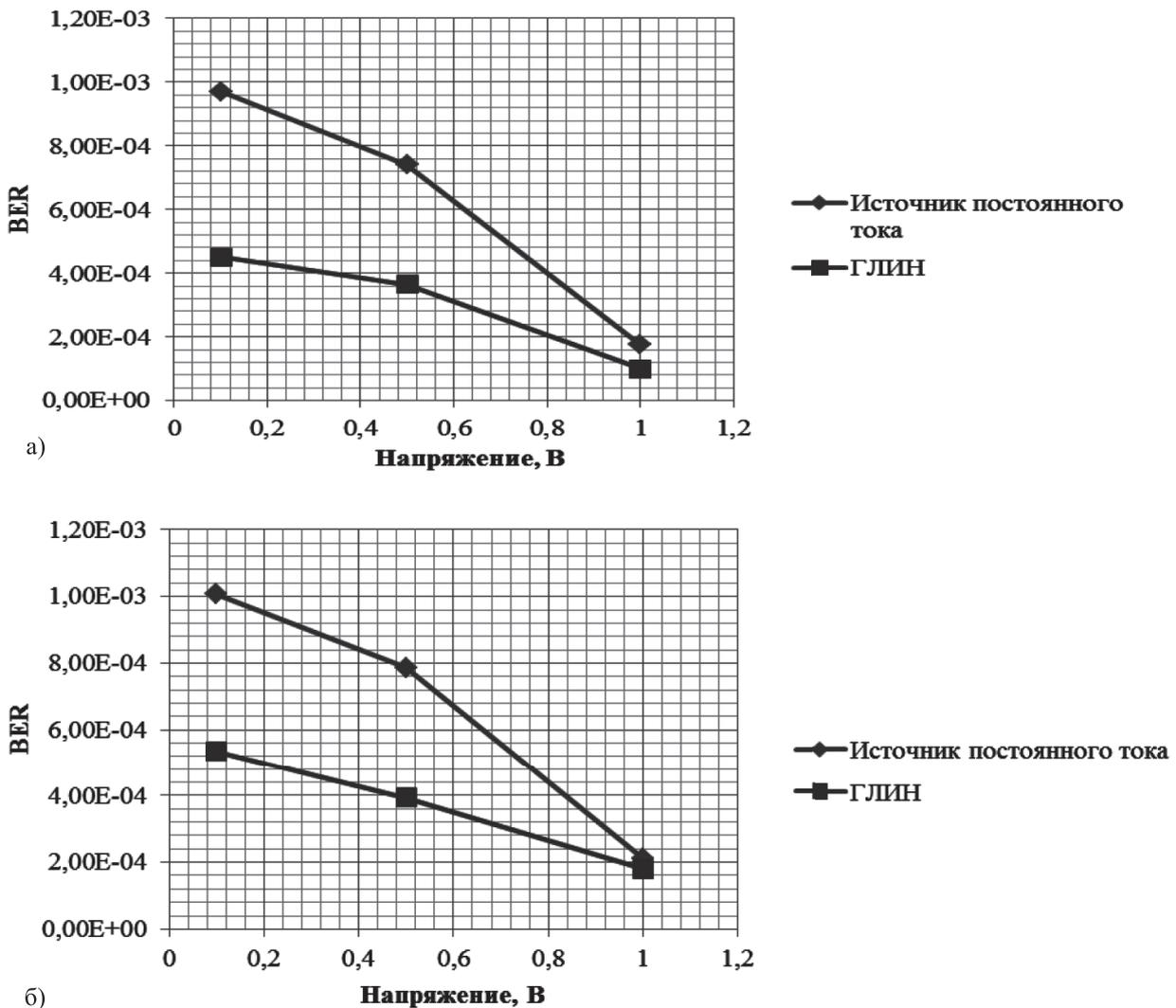


Рисунок 2. Фото экспериментальной установки для апробации метода внесения корректирующего чирпа в оптический сигнал



а) результаты имитационного моделирования; б) результаты эксперимента  
**Рисунок 3.** Графики зависимости BER от значения напряжения на управляющем входе интерферометра Фабри-Перо

На графиках зависимости BER от напряжения на управляющем входе интерферометра Фабри-Перо видно, что при подаче на управляющий вход линейно-изменяющегося напряжения BER существенно улучшается. Данный результат позволяет подтвердить верность разработанной математической модели. Из анализа рисунка 3, видно, что результаты имитационного моделирования и эксперимента практически идентичны, относительная погрешность измерений не превышает 2%.

### 3. Подход к использованию чирпа для управления на сетях связи

В ходе дальнейших исследований планируется доказать возможность использования функции чирпа для независимого обмена информацией между контроллерами-менед-

жерами в разветвленных сетях, в том числе в программно-конфигурируемых сетях SDN (SDN — Software Defined Networks), которые используют волоконно-оптические каналы связи. Традиционно «узким» местом SDN являются сложности во взаимодействии между контроллерами для обеспечения управления сетевыми устройствами инфраструктурного уровня. В числе таких сложностей либо полное отсутствие взаимодействия между контроллерами, либо взаимодействие по транспортным каналам, что вызывает их перегрузку. Использование функции чирпа в качестве носителя служебной информации, которое не требует задействования транспортных каналов и обладает высокой степенью защищенности, может гарантировать многозвенное управление в SDN.

В связи с постоянно растущим объемом данных в сетях приоритетным становится вопрос его оптимального распределения и балансировки для предотвращения перегрузок одних звеньев сети и рационального использования других, менее загруженных звеньев. Используемые в данный момент методы по выявлению наилучших маршрутов не могут верно учесть динамику состояния каналов, а также не позволяют отслеживание динамики в режиме реального времени.

Решением данной проблемы может стать функция чирпа, для управления которой необходимо использовать нелинейный элемент. Действие нелинейного элемента основывается на применении эффектов фазовой само- или кросс-модуляции, причем для усиления эффекта можно использовать много-

проходной интерферометр, например волоконно-оптическая петля с односторонним ответвлением или интерферометр типа Фабри-Перо. Такие схемы могут быть либо реляционными (с применением дополнительного управляющего воздействия) [7], либо нереляционными с управлением, которое «закладывается» в свойствах передаваемого сигнала.

#### Вывод

Следует обратить внимание, что использование такого оптического параметра, как чирпа оптических импульсов, основывается на оптических эффектах и оптико-оптических взаимодействиях и, соответственно, перспективно с точки зрения концепции All Optical Networks и ее реализации для различных типов построения сетей связи.

#### Список литературы

1. Перспективы развития сети Интернет [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://infopud.ucoz.ru/publ/5-1-0-38> (дата обращения: 29.11.2017).
2. Меккель А.М. Коммутация в оптических транспортных сетях // Фотон-экспресс. 2016. № 7. С. 28–33.
3. Росс Сондерс, Гэри Никол, Кевин Воленвебер, Тед Шмидт. Можно ли развернуть 100 Гб/с волны с использованием инженерных правил для 10 Гб/с? [Электронный документ]. Режим доступа: <http://www.oclaro.com/> (дата обращения: 29.11.2017).
4. Султанов А.Х., Гайфуллин Р.Р., Виноградова И.Л. Методы кодирования сетевых адресов на примере сети Ethernet // Инфокоммуникационные технологии. 2007. № 6. С. 56–60.
5. Агравал Г.В. Световолновые технологии телекоммуникационных систем. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2005. 480 p.
6. Каминов И.П. Телекоммуникации оптического волокна ПВ. Холмдел: Академическая пресса, 1997. 534 p.
7. Mukherjee B. *Optical Communication Networks*. Mc.Graw-Hill, 2005. 576 p.

#### References

1. *Prospects for the Development of the Internet* [Electronic Resource]. Available at: <http://infopud.ucoz.ru/publ/5-1-0-38> (accessed 29.11.2017). [in Russian].
2. Mekkel' A.M. Switching in Optical Transport Networks. *Photon-Express*, 2016, No. 7, pp. 28–33.
3. Ross Sonders, Gjeri Nikol, Kevin Volenveber, Ted Shmidt. *Is It Possible to Deploy a 100 Gb/s Wave Using Engineering Rules for 10 Gb/s?* [Electronic Resource]. Available at: <http://www.oclaro.com> (accessed 29.11.2017).
4. Sultanov A.H., Gajfullin R.R., Vиноградова I.L. Methods of Coding Network Addresses Using the Example of an Ethernet Network. *Infocommunication Technologies*, 2007, No. 6, pp. 56–60. [in Russian].
5. Agraval G.V. *Light-Wave Technologies of Telecommunication Systems*. Hoboken, John Wiley & Sons Inc., 2005. 480 p.
6. Kaminov I.P. *Telecommunications of Optical Fiber IIIB*. Holmdel, Akademicheskaja pressa Publ., 1997. 534 p. [in Russian].
7. Mukherjee B. *Optical Communication Networks*. Mc.Graw-Hill, 2005. 576 p.



**Артюшенко В. М.**  
**Artyushenko V. M.**  
*Dr. Sci. Tech., Professor,*  
*Head of Department «Information Technology*  
*and Control Systems»,*  
*SBEI HE MR «Technological University»,*  
*Korolev, Russian Federation*



**Воловач В. И.**  
**Volovach V. I.**  
*Dr. Sci. Tech., Associate Professor,*  
*Head of Department «Information*  
*and Electronic Service»,*  
*FSBEI HE «Volga Region State University*  
*of Service»,*  
*Togliatti, Russian Federation*

UDC 621.391.26:519.2

## МОДЕЛИ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ ПРОТЯЖЕННОГО ОБЪЕКТА

Показано, что для аппроксимации аналитических выражений для ПРВА и  $\nu$ -х начальных моментов огибающей может быть использована ПРВ Накагами и начальные моменты; приведены соответствующие выражения. Приведены выражения, используемые для связи параметров ПРВ огибающих отраженного сигнала с параметрами ПРВ Накагами для наиболее распространенных распределений. Показано, что при использовании ПРВ Накагами распределение фаз отдельных компонент отраженного сигнала независимо от их огибающих, и они распределены либо равномерно, либо по нормальному закону.

Приведены обобщенная модель ПРВ и ее частные случаи для широкого класса негауссовских сигналов. Приведены графики ПРВ сигнала, аппроксимируемого распределением Накагами, и проанализировано влияние на них различных параметров последнего.

Проведенные экспериментальные исследования показывают хорошее совпадение результатов с предложенными математическими моделями ПРВ; в частности, подтверждается многолучевость отраженного сигнала, и для большинства из них характерен вид амплитудно-модулированных (АМ) колебаний. Для проверки полученных в результате обработки ПРВ гипотез использовался критерий  $\chi$ -квадрат. Показано, что в этом случае сигнал подвержен воздействию мультипликативной помехи.

Осуществлен анализ статистических характеристик огибающей сигнала при воздействии мультипликативных (модулирующих) помех. Показано, что огибающие принимаемых сигналов в одних случаях хорошо аппроксимируются ПРВ Накагами, а в других случаях — ПРВ Вейбулла. Определены пределы изменения ключевых статистических характеристик для каждого из двух случаев. Показано, что ПРВ огибающей зависит не только от вида протяженного объекта, но и изменяется в процессе его движения в зоне действия радиолокационного измерителя (РИ), при этом преобладающим является ПРВ Накагами.

Произведен анализ полученных экспериментально статистических характеристик мгновенных значений сигнала, полученных при обработке временных реализаций сигналов, который показывает, что ПРВ мгновенных значений преимущественно носит ярко выраженный бимодальный характер. Показано, что увеличение глубины АМ сигнала приводит к расширению его ПРВ мгновенных значений, изменению ее статистических параметров.

Отмечается, что среди статистических характеристик сигнала, помимо рассмотренных, значительный интерес представляют оценка длительности статистических характеристик выбросов обрабатываемых процессов, анализ параметров спектра сигнала, отраженного от

протяженного объекта, а также нахождение статистических характеристик воздействующих на сигнал помех.

Показано, что для решения задач, связанных работой РИ в условиях ближнего действия, необходимо учитывать явно выраженный негауссовский характер как обрабатываемого сигнала, так и воздействующих на него в общем случае аддитивно-мультипликативных помех.

**Ключевые слова:** плотность распределения вероятности огибающей сигнала, негауссовская помеха, многолучевость, протяженный объект, распределение Накагами.

## MODELS OF PROBABILITY DENSITY AND STATISTICAL CHARACTERISTICS OF THE SIGNAL REFLECTED FROM AN EXTENDED OBJECT

It is shown that the Nakagami probability density function (PDF) and its initial moments can be used to approximate the analytical expression for PDF and  $\nu$ -th initial moments of the envelope; the corresponding expressions are given. The expressions, which are used to relate parameters of the PDF of the envelope of the reflected signal to the parameters of the Nakagami PDF for the most common distributions, are given. It is shown that when the Nakagami PDF is used, phases of separate components of the reflected signal are distributed independently of their envelopes, besides they are distributed either uniformly or according to the normal law.

The generalized PDF model and its specific cases for a wide class of non-Gaussian signals are presented. Graphs of the PDF of the signal approximated by the Nakagami distribution are given, and it is analyzed how they are influenced by different parameters of the Nakagami distribution.

The conducted experimental studies show that their results coincide well with the proposed mathematical models of the PDF; in particular, it is confirmed that the reflected signal is multipath and the form of amplitude-modulated (AM) fluctuations is characteristic for most of them.  $\chi$ -square criterion was used to check hypothesis obtained as a result of the PDF processing. It is shown that in this case the signal is exposed to multiplicative noise.

The statistical characteristics of the envelope of the signal under the influence of multiplicative (modulating) noise are analyzed. It is shown that the envelopes of received signals in some cases are well approximated by the Nakagami PDF, while in other cases they are approximated by the Weibull PDF. Bounds of variations in main statistical characteristics for each of the two cases are defined. It is shown that the PDF of the envelope depends not only on the type of an extended object, but it also varies in the course of its motion within the range of the radar meter (RM), whilst the Nakagami PDF is predominant.

The analysis of the experimentally obtained statistical characteristics of instantaneous values of the signal is carried out. These characteristics were obtained during the processing of time realizations of signals. The analysis shows that the PDF of instantaneous values in most of the cases is of a pronounced bimodal nature. It is shown that increasing the depth of AM signal leads to the expansion of its PDF of instantaneous values and changing its statistical parameters.

It is noted that among the statistical characteristics of the signal in addition to the considered above, there are other issues of interest such as estimating the length of the statistical characteristics of the emissions of the processed processes, the analysis of parameters of the spectrum of the signal reflected from an extended object and finding the statistical characteristics of noise affecting the signal.

It is shown that to solve the problems related to the operation of RM in short-range conditions, a distinctive non-Gaussian nature of both the processed signal and additive multiplicative noise affecting the signal should be taken into account.

**Key words:** probability density distribution of signal envelope, non-Gaussian noise, multipath, extended object, Nakagami distribution.

### Introduction

For the synthesis and analysis of radio systems and devices that detect and measure parameters of motion of extended objects, an effective

model of the probability density (PDF) of the signal reflected from extended objects, as well as of noise affecting it, is needed. There is quite a large number of mathematical models describ-

ing the signal reflected from spatially distributed radar targets: aircrafts, ships, etc. [1–5]. However, many aspects related to the determination of PDF models of the signal and its statistical characteristics for so-called short-range conditions are still insufficiently studied and have a number of specific features [6–11].

The purpose of this work is to select and justify such models of the PDF of the signal reflected from an extended object, which will be as close to the real models as possible; a number of statistical characteristics of the signal is supposed to be described.

*1. Selection and justification of PDF models for the signal reflected from an extended object*

As it is known [12–16], during radio detecting and ranging in short range conditions, the detected object is usually regarded as complex, extended, consisting of a set of  $N$  reflecting elements.

The resulting signal at the input of a receiving device, reflected from an extended object can be written as:

$$s(t, \vec{\lambda}) = \sum_{i=1}^N \text{Re} s_i(t, \vec{\lambda}), \quad (1)$$

where  $s_i(t, \vec{\lambda}) = \text{Re} \{ \alpha_i(t) U(t - \tau_i) \exp j [ (\omega_0 - \Delta f_{di}) t - \omega_0 \tau_i - \Theta_i ] \}$  is the signal received from an arbitrary  $i$ -th point of the object;  $\alpha_i(t)$  is the attenuation coefficient of the «amplitude» of the received signal (as compared to the emitted signal at the time  $t$  from the  $i$ -th point;  $U(t) = f(t) \exp [ j \varphi(t) ]$  is a complex envelope of the signal;  $f(t)$  and  $\varphi(t)$  are functions describing the laws of amplitude and phase (frequency) modulation;  $\tau_i$  is the time of signal delay from the  $i$ -th «brilliant» point;  $\omega_0$  is a carrier frequency;  $\Delta f_{di}$  is Doppler frequency shift from the  $i$ -th «brilliant» point;  $\Theta_i$  is a phase of the signal reflected from the  $i$ -th «brilliant» point usually evenly distributed in the interval  $[-\pi; \pi]$ ;  $\vec{\lambda}$  a vector parameter characterizing the set of the parameters  $\omega_0, f(t), \varphi(t), \alpha(t), \tau$  and  $\Delta f_{di}$ .

Values  $\alpha(t)$  and  $\Theta_i$  are considered to be random and mutually independent.

A wide variety of frequent types of signal models is possible (1). Thus, to describe a multipath nature of the signal reflected from an

extended object in [13] the following model is considered:

$$\begin{aligned} s(t, \vec{\lambda}) &= \text{Re} \{ U(t) \exp j [ \omega_0 t + \Theta(t) ] \} = \\ &= \text{Re} \left\{ \sum_i U(t) \exp j [ \omega_0 t + \Theta(t) ] \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

which explicitly introduces the envelope of the received signal  $U(t)$  and the resulting phase  $\Theta_i$ . The density of probability distribution of instantaneous values, the envelope (amplitude) (PDFA) and the phase (PDFP) of the received signal is of the greatest interest.

The results [17], show that the signal reflected from the extended object (2) can be well described by the generalized PDFA model  $W_g(A; \alpha, r_{xy}, a, \Theta_0)$  (table 1), where  $\varepsilon_n = 1$  when  $n = 0$ ,  $I_n(\cdot)$  is a Bessel function of the  $i$ -th kind of the  $n$ -th order;  $A = U / (\sigma_x^2 \sigma_y^2)^{0.5}$ ,  $a = U_0 / (\sigma_x^2 \sigma_y^2)^{0.5}$  are normalizing values;  $U_0 = (x_0^2 + y_0^2)^{0.5}$ ,  $\Theta_0 = \text{arctg}(y_0/x_0)$  are the module and the argument of a deterministic component of the signal;  $\sigma^2 = \sigma_x^2 = \sigma_y^2$  is the variance of quadrature components of the signal;  $x_0$  and  $y_0$  are deterministic quadrature components of the signal;  $r_{xy}$  is correlation coefficient between quadrature components of the signal  $s(t, \vec{\lambda})$ ,  $\alpha = (\sigma_x^2 - \sigma_y^2) / (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)$  is the parameter of time-varying, changing within the limits of  $[1, -1]$ .

It can be seen from the above expressions, that the PDF of the envelope generally depends on four parameters  $\alpha, r_{xy}, a$  and  $\Theta_0$ . When they change, the shape of the PDFA curve changes as well. Numerical characteristics of the PDFA are described by the relation (table 1)  $m_A^v(\alpha, r_{xy}, a, \Theta_0)$ .

The introduction of complex analytical expressions for the PDFA and  $v$ -th initial moments of the envelope can be approximated by simpler expressions [17]. In particular, the Nakagami PDF and its initial moments give good results

$$\begin{aligned} W(U) &= (2/\Gamma(m)) (m/\Omega)^m U^{2m-1} \exp \{ -mU^2/\Omega \}, \\ &U \geq 0, \end{aligned} \quad (3)$$

where  $m$  and  $\Omega$  are distribution parameters:

$$m = \Omega^2 / (U^2 - \Omega^2)^2 \geq 0.5; \quad \Omega = U^2; \quad (4)$$

$\Gamma(\cdot)$  is a gamma function;  

$$m_U^v = \Gamma(m + v/2) / \Gamma(m) (\Omega/m)^{-v/2}. \quad (5)$$

The expressions which relate the parameters  $m$  and  $\Omega$  to the parameters  $\alpha, r_{xy}, a, \Theta_0$  are:

$$m = (1 + a^2)^2 \left\{ \left( 1 + \left[ r_{xy}^2 (1 - \alpha^2) + \alpha^2 \right] \right) + 2a^2 \left[ 1 + \left( r_{xy}^2 (1 - \alpha^2) + \alpha^2 \right)^{0,5} \times \cos \left( 2\Theta_0 - \text{arctgr}_{xy} \left( r_{xy}^2 (1 - \alpha^2) + \alpha^2 \right) / \alpha \right) \right] \right\}^{-1};$$

$$\Omega = \sigma^2 (1 + a^2).$$

Using these expressions, one can define the relationship between  $m, \Omega,$  and  $\alpha, r_{xy}, a, \Theta_0$  parameters (and vice versa) which is necessary to know when you move from one distribution to another.

Table 2 shows the results of approximations of the envelope of the signal (2) by the Nakagami distribution. Here the phase of the deterministic

component is assumed to be zero ( $\Theta_0 = 0$ ) without loss of generality.

In table 2 the results of approximations of the envelope of the signal (2) by the Nakagami distribution are presented. Here the phase of the deterministic component is assumed to be zero ( $\Theta_0 = 0$ ) without loss of generality.

When the Nakagami distribution is used (3), the issue of the choice of phase distribution remains open. In most studies, it is generally assumed that phases of particular components of the reflected signal are independent from their envelope and are distributed either evenly within the interval  $[-\pi, \pi]$ , or by the normal law [18, 19]:

$$W(U, \Theta) = W_m(U)W(\Theta),$$

where  $W_m(U)$  is determined by the expression (3).

In [17] the statistical characteristics of instantaneous values of non-Gaussian signals (2) are analyzed. Their amplitude  $U$  is described by the generalized PDFa model (see table 1).

**Table 1.** Generalized model of PDFa and its numerical characteristics

Characteristics	Analytical writing of an expression
$W_g(A; \alpha, r_{xy}, a, \Theta_0)$	$\frac{A}{(1-r_{xy}^2)^{0,5}} \exp \left\{ \frac{-A^2 - a^2 [1 - B(\alpha, r_{xy}) \cos 2\Theta_0 - \beta(\alpha, r_{xy})]}{2(1-r_{xy}^2)(1-\alpha^2)^{0,5}} \right\} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n I_n \times$ $\times \left[ \frac{A^2 B(\alpha, r_{xy})}{2(1-r_{xy}^2)(1-\alpha^2)^{0,5}} \right] I_{2n} \left[ \frac{Aa}{1-r_{xy}^2} \left( r_{xy}^2 + B^2(\alpha, \Theta_0) \frac{2r_{xy} \sin 2\Theta_0}{(1-\alpha^2)^{0,5}} \right)^{0,5} \right] \times$ $\times \cos 2nv(\alpha, r_{xy}, \Theta_0)$
$m_A^v(\alpha, r_{xy}, a, \Theta_0)$	$\left[ (1-r_{xy}^2)(1-\alpha^2) \right]^{0,5} \exp \left\{ \frac{-a^2 [1 - B(\alpha, r_{xy}) \cos(2\Theta_0 - \beta(\alpha, r_{xy}))]}{2(1-r_{xy}^2)(1-\alpha^2)^{0,5}} \right\} \times$ $\times M^{\frac{v}{2}}(\alpha, r_{xy}) \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n \left[ \frac{P(\alpha, r_{xy})}{2M^2(\alpha, r_{xy})} \right]^n \left[ \frac{N(\alpha, r_{xy}, a, \Theta_0)}{2} \right]^{2n} \times$ $\times \frac{\cos nv(\alpha, r_{xy}, \Theta_0)}{\Gamma(2n+1)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\Gamma\left(\frac{v}{2} + 2n + 2k + 1\right)}{K! \Gamma(n+k+1)} \left[ \frac{P(\alpha, r_{xy})}{2M(\alpha, r_{xy})} \right]^{-2k} \times$ $\times {}_1F_1 \left[ \frac{v}{2} + 2n + 2k + 1; 2n + 1; \frac{N^2(\alpha, r_{xy}, a, \Theta_0)}{4M(\alpha, r_{xy})} \right]$
Description:	$B(\alpha, r_{xy}) = (\alpha^2 + r_{xy}^2 (1 - \alpha^2))^{0,5}; \quad \beta(\alpha, r_{xy}) = \text{arctgr} \left[ \frac{r_{xy} (1 - \alpha^2)^{0,5}}{\alpha} \right];$ $B(\alpha, \Theta_0) = \left( \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \right)^{0,5} \cos^2 \Theta_0 + \left( \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^{0,5} \sin^2 \Theta_0; \quad v(\alpha, r_{xy}, \Theta_0) = \Delta(\alpha, r_{xy}, \Theta_0) - \frac{\beta(\alpha, r_{xy})}{2};$ $\Delta(\alpha, r_{xy}, \Theta_0) = \text{arctgr} \left\{ \frac{\left( \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^{0,5} \sin \Theta_0 - r_{xy} \cos \Theta_0}{\left( \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^{0,5} \cos \Theta_0 - r_{xy} \sin \Theta_0} \right\}; \quad M(\alpha, r_{xy}) = 0,5(1 - r_{xy}^2)(1 - \alpha^2)^{0,5};$ $N(\alpha, r_{xy}, a, \Theta_0) = \frac{a}{1 - r_{xy}^2} \left[ r_{xy}^2 + B^2(\alpha, \Theta_0) - \frac{2r_{xy} \sin 2\Theta_0}{(1 - \alpha^2)^{0,5}} \right].$

**Table 2.** Relating the parameters of the PDF of the envelope of the reflected signal to the parameters of the Nakagami PDF

Type of distribution	Distribution parameters	Linking by $\Omega_c$ parameters	Linking by $m_c$ parameters	Change range $m$
Rayleigh distribution	$\sigma^2 = \sigma_x^2 = \sigma_y^2$	$\Omega = 2\sigma^2$	—	$m = 1$
Generalized Rayleigh distribution	$a$ ; $\sigma^2 = \sigma_x^2 = \sigma_y^2$	$\Omega = 2\sigma^2(1+a^2)$	$m = \frac{(1+a^2)^2}{1+2a^2}$	$1 < m < \infty$
Hoyt distribution	$\alpha$ ; $\sigma^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$	$\Omega = \sigma^2$	$m = \frac{1}{(1+\alpha^2)}$	$0,5 < m < 1$
Generalized Hoyt distribution	$a$ ; $\alpha$ ; $\sigma^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$	$\Omega = \sigma^2(1+a^2)$	$m = \frac{(1+a^2)^2}{1+2a^2(1+\alpha)+\alpha^2}$	$0,5 < m < \infty$
$\rho$ -distribution	$r_{xy}$ ; $\sigma^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$	$\Omega = 2\sigma^2$	$m = \frac{1}{(1+r_{xy}^2)}$	$0,5 < m < \infty$
Generalized $\rho$ -distribution	$r_{xy}$ ; $a$ ; $\sigma^2 = \sigma_x^2 = \sigma_y^2$	$\Omega = 2\sigma^2(1+a^2)$	$m = \frac{(1+a^2)^2}{1+2a^2+r_{xy}^2}$	$0,5 < m < \infty$
Generalized PDFA	$\alpha$ ; $r_{xy}$ ; $a$ ; $\sigma^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$	$\Omega = \sigma^2(1+a^2)$	$(W_g)$ if $\Theta_o = 0$	$0,5 < m < \infty$
One-sided Gaussian PDFA	$\alpha = 1$ ; $r_{xy} = 1$	$\Omega = \sigma_x^2$	—	$m = 0,5$

If the values  $U = (x^2 + y^2)$  and  $\Theta = \text{arctg}(y/x)$ , where  $y$  and  $x$  are quadrature components of the signal, they are independent of each other, and the phase distribution is equally probable, then the PDF of instantaneous values of the signal  $W(s_c)$  is determined by the ratio presented in the table 3, where  ${}_1F_1(\cdot)$  is a degenerate hypergeometric function.

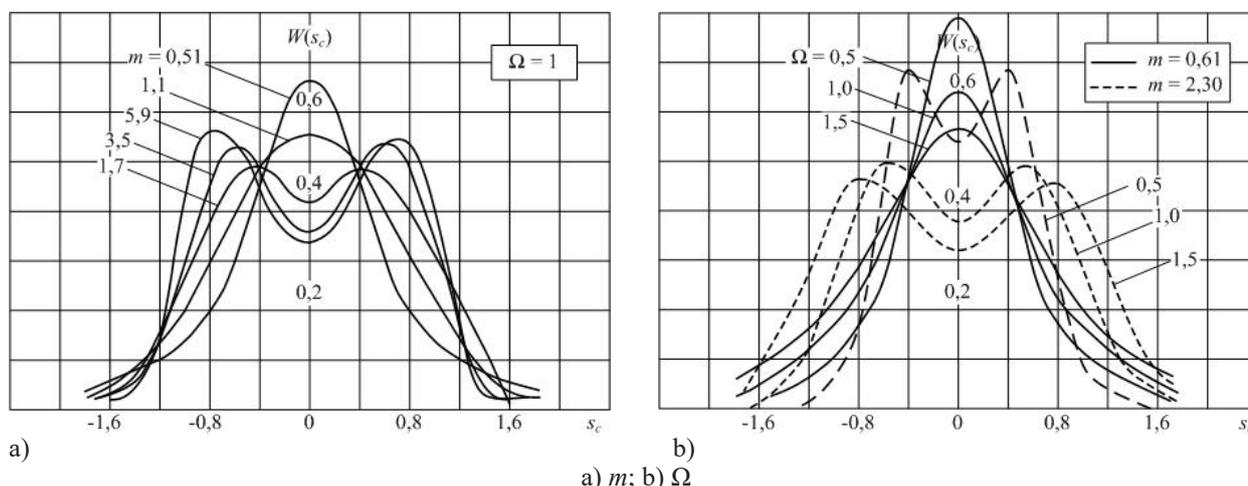
The analysis of the above table shows that the expression  $W(s_c)$  is basic and can serve as a base in determining the PDF of instantaneous values of the radio signal for a wide class of probabilistic models of non-Gaussian processes  $s_c(t)$ .

Figure 1 shows the PDF  $W(s_c)$  calculated for the case where  $W(U)$  adheres to the Nakagami PDF.

The graphs (Figure 1, a) show that when  $\Omega = 1$  and  $m \rightarrow 1$  the PDF curve is normalized.

At  $m > 1$  a «dip» in the probability curve  $W(s_c)$  appears at  $s_c = 0$  point and we get a twomode PDF curve with modes at symmetric points  $-s_c$  and  $+s_c$ . The variance increases and the mode is shifted from the axis with the increase in  $m$ . In this case, the PDF curve remains symmetrical with respect to the axis. If  $m < 1$  (in Figure 1, b  $m = 2,31$ ), the PDF curve becomes two-modal, and the increase in the parameter  $\Omega$  leads to the increase in the «dip» of the probability curve and its variance.

Experimental studies carried out by the radar meter (RM), measuring motion parameters of extended objects, showed a good coincidence of these mathematical models with the results of the experiments [20]. Various spatially-distributed models of motor vehicles such as road



**Figure 1.** Density of probability distribution  $W(s_c)$  for the model (2) with different parameters of the distribution

**Table 3.** Generalized PDF model and its special cases for a wide class of non-Gaussian signals

Distribution law	Analytical expression of the probability density	Numerical characteristics of the PDF
Generalized model of the PDF	$W(s_c) = \frac{(\beta/2)^\alpha}{\sqrt{\pi}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k! \Gamma(\alpha+k)} \left(\frac{\gamma}{2}\right)^{2k} \times$ $\times \exp\left(-\frac{\gamma}{2} - \frac{\beta s_c^2}{2}\right)  s_c ^{2(\alpha+k)-1} \times$ $\times \Psi\left(\frac{1}{2}, \alpha+k + \frac{1}{2}, \frac{\beta s_c^2}{2}\right),$ <p>where</p> $\Psi(a, b, z) = \frac{\pi}{\sin \pi b} \left\{ \frac{{}_1F_1(a, b, z)}{\Gamma(1+a-b)\Gamma(b)} - \right.$ $\left. -z^{1-b} \frac{{}_1F_1(1+a-b, -b, -z)}{\Gamma(a)\Gamma(2-b)} \right\}$	$m^\nu = \frac{\exp(-\gamma^2/2\beta) \left(\frac{2}{\beta}\right)^{\nu/2}}{\sqrt{\pi}} \times$ $\times \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\Gamma\left(\alpha+k + \frac{\nu}{2}\right) \Gamma\left(\frac{\nu}{2} + 0,5\right)}{k! \Gamma(\alpha+k) \Gamma\left(\frac{\nu}{2} + 1\right)} \times$ $\times \left(\frac{\gamma}{2\beta}\right)^k,$ <p>where <math>\nu = 2, 4, 6, \dots</math></p>
W(U) is the Nakagami PDF ( $\alpha = m; \beta = 2m/\Omega; \gamma = 0$ )	$W(s_c) = \frac{\left(\frac{m}{\Omega}\right)^m}{\Gamma(m)\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{ms_c^2}{\Omega}\right)  s_c ^{2m-1} \times$ $\times \Psi\left(0,5; m+0,5; ms_c^2/\Omega\right)$	—
W(U) is described by the Rayleigh PDF ( $m = 1; \Omega = 2\sigma^2$ )	$W(s_c) = \frac{1}{2\sigma^2\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{s_c^2}{2\sigma^2}\right)  s_c  \times$ $\times \Psi\left(0,5; 3/2; s_c^2/2\sigma^2\right)$	—
W(U) is described by the Gaussian PDF	$W(s_c) = \frac{1}{2\sigma^2\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{s_c^2}{2\sigma^2}\right),$ <p>where <math>\Psi(t)</math> is the function expressed through the Hermite polynomial</p>	—

tankers, heavy container trucks, prefab trailers, etc. were used as extended objects.

Statistical processing of experimental data was carried out on the basis of an automated system for experimental data processing. Testing of hypotheses obtained as a result of PDF processing was carried out according to the  $\chi^2$ -criterion [21, 22]. The methodology of experimental studies and statistical processing is presented in detail in [20] and is not given here.

Analyzing time realizations of Doppler signals received when being reflected from various models of motor vehicles, one can come to the conclusion that the reflected signal is well described by a model of a multipath signal. It is also seen that for most of them reflected signals have the form of AM oscillation, and the type of the reflected signal depends on a number of different factors [23]. The depth of AM varies within large limits and can reach 100%, i.e. complete signal fading.

In this case, it is assumed that the received signal is affected by multiplicative noise [17, 24–27], statistical characteristics of which are obtained by means of processing the envelope of the signal.

### 2. Statistical characteristics of the envelope of the signal under the influence of multiplicative (modulating) noise

Analysis of the results of statistical processing of the envelope showed that received signals can be roughly attributed to two large groups. The first group includes signals, envelopes of which are well approximated by the Nakagami PDF (3)–(5).

In this group, the expectation  $m_1$ , variance  $\sigma^2$  and standard deviation (RMS)  $\sigma$ , respectively, can vary  $0,6051 \leq m_1 \leq 8,160$ ;  $0,0075 \leq \sigma^2 \leq 0,027$ ;  $0,086 \leq \sigma \leq 0,1647$ . The variation coefficients  $K_v$ , skewness coefficient  $K_a$  and kurtosis  $K_k$  may vary:  $0,1436 \leq K_v \leq 0,3724$ ;  $-0,4721 \leq K_a \leq 0,2627$ ;  $-0,7948 \leq K_k \leq 0,1816$  [10].

The parameters of the Nakagami distribution may vary within:  $4,0559 \leq m \leq 11,1965$ ;  $0,3995 \leq \Omega \leq 11,29$ . If the number of degrees of freedom  $nf$  varies from 7 to 15,  $\chi^2$  for this group varies from 13,096 to 30,323 and the significance level  $\gamma_{sl}$  is in the range  $0,002 \leq \gamma_{sl} \leq 0,10$ .

The second group includes signals envelopes of which are well approximated by the Weibull PDF

$$W(U) = C\alpha U^{\alpha-1} \exp(-CU^\alpha), U \geq 0, C > 0, \alpha > 0,$$

where  $C$  and  $\alpha$  are parameters of distribution.

The initial moments of the Weibull PDF are defined  $m^\nu = C^{-\nu/\alpha} \Gamma(1 + \nu/\alpha)$ , if  $\alpha = 1$ , a Weibull distribution becomes exponential, if  $C = 2$  and  $C = 0,5\sigma^2$ , it turns into a Rayleigh distribution.

Statistical parameters of the distribution vary within:  $0,6377 \leq m_1 \leq 1,082$ ;  $0,0106 \leq \sigma_2 \leq 0,0427$ ;  $0,091 \leq \sigma \leq 0,2068$ ;  $0,1217 \leq K_\nu \leq 0,2651$ ;  $-0,7973 \leq K_a \leq -0,0626$ ;  $-0,7877 \leq K_k \leq 0,9330$ ;  $0,3916 \leq C \leq 1,8122$ ;  $3,72 \leq \alpha \leq 7,88$ .

If the number of degrees of freedom  $n_f$  varies from 7 to 12,  $\chi^2$  varies from 10,289 to 28,61 and the significance level  $\gamma_{sl}$  is in the range  $0,002 \leq \gamma_{sl} \leq 0,1$ .

The results of the processing show that the PDF of the envelope depends not only on the type of the extended object, but also changes in the process of its motion within the range of RM and at some time points the PDF can be well approximated by the Gaussian and logarithmic normal distribution. However, the Nakagami PDF is dominant [4, 20].

### 3. Statistical characteristics of instantaneous values of the signal

The analysis of experimental data obtained during processing of time realizations of signals shows that the PDF of instantaneous values is mainly of a pronounced bimodal nature. For different models of extended objects, the coefficients of kurtosis are within  $K_k = 2, \dots, 4$ , the coefficients of skewness are close to zero  $K_a \approx 0$ , the expectation varies within  $0 \leq M_1 \leq 0,1$ .

Increasing the depth of AM of the signal leads to the expansion of the PDF of its instantaneous values, varying its parameters (the mathematical expectation  $M_1$ , the RMS  $\sigma$ , the variance  $\sigma_2$ , the third  $M_3$  and the fourth  $M_4$  moments).

It should be noted that the analysis and generalization of the obtained results were carried out on numerous fragments of the processed signal, reaching 900...1000 for each considered model of the extended object. The signal was recorded by more than 100 radar meters. In addition, in order to obtain the most complete statistical picture obtained data, experimental

work was carried out under various climatic conditions: clear, sunny weather, rain, fog, frost and snowfall.

When considering some issues with the aim to improving the efficiency of radio systems and short-range devices, not only the statistical characteristics of the signal are of considerable interest, but also estimating the duration of statistical characteristics of emissions of processed processes, in particular the density and the distribution function of duration of emissions of the processes below the threshold level of processing [28]. As shown by the previous studies [23, 29], analyzing parameters of the spectrum of the signal reflected from an extended object and finding statistical characteristics of noise affecting the signal is important [8, 10, 30].

### Conclusion

As the result of theoretical and experimental studies that have been carried out the following conclusions can be drawn.

1. The Doppler signal reflected from extended objects, motor vehicles in particular, is well described by a mathematical model of a multipath signal; furthermore, the above mentioned Doppler signal is affected by multiplicative and additive noise at the same time;

2. As a rule, the PDF of multiplicative noise (of the envelope of the reflected Doppler signal) is well approximated by the Nakagami PDF;

3. The PDF of instantaneous values of the Doppler signal reflected from an extended object, depends not only on the type of an object, but also varies in the course of its motion within the range of measuring. Moreover, the PDF of instantaneous values is mainly of a pronounced bimodal nature;

4. Generally, the PDF differs from the Rayleigh PDF and it is well approximated by the Nakagami PDF and the Weibull PDF; however the Nakagami PDF is dominant;

5. The results of the experimental processing agree with the theoretical models of the Doppler signal reflected from an extended object.

Thus, when solving problems related to the detection of extended objects and measurement of their parameters, it is necessary to take into account the pronounced non-Gaussian nature of both the useful processed signal and the additive multiplicative noise affecting it.

## References

1. Sosulin Ju.G. *Theoretical Fundamentals of Radar and Radio Navigation: a Textbook for High Schools*. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1992. 304 p. [in Russian].
2. Finkel'shtejn M.I. *Fundamentals of Radiolocation*. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1983. 536 p. [in Russian].
3. Zhuravlev A.K., Lukoshin A.P., Poddubnyj S.S. *Processing of Signals in Adaptive Antenna Arrays*. Leningrad, LGU Publ., 1982. 240 p. [in Russian].
4. Rodimov A.P., Popovskih V.V. *Statistical Theory of Polarization-Time Signal Processing and Interference*. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1984. 272 p. [in Russian].
5. Tuchkov L.T. *Radar Characteristics of Aircraft*. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1985. 236 p. [in Russian].
6. Artjushenko V.M., Volovach V.I., Moroz A.P., Stavrovskij M.E., Pushkin N.M. Analysis Model Probability Density Reflections on the Spatial Distribution of Object. *Dual Technologies*, 2017, No. 3 (80), pp. 47–52. [in Russian].
7. Artjushenko V.M., Volovach V.I., Abbassova T.S. The Density of the Probability Distribution of Signal Exposed to Multiplicative and Additive Noises. *Dual Technologies*, 2017, No. 1 (78), pp. 30–35. [in Russian].
8. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Envelope Statistical Characteristics for Mixture of Non-Gaussian Periodically Non-Stationary Signal and Additive Noise. *Radioengineering*, 2017, No. 1, pp. 111–116. [in Russian].
9. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Modeling of Probability Density Function of Signal Mixture Exposed to Amplitude Distortion and Additive Noise. *Radioengineering*, 2017, No. 1, pp. 103–110. [in Russian].
10. Artjushenko V.M., Volovach V.I., Ivanov V.V. Statistical Characteristics of Signals and Interference in Short-Range Radio Engineering Devices. *Instrumentation*, 2014, Vol. 57, No. 7, pp. 46–50. [in Russian].
11. Volovach V.I. Investigation of the Probability Distribution Density of Object Detection with Regard to Varying Range. *Proceedings of Universities. Electronics*, 2013, No. 4, pp. 71–75. [in Russian].
12. Fal'kovich S.E., Homjakov Je.N. *Statistical Theory of Measuring Radio Systems*. Moscow, Sov. Radio Publ., 1981. 288 p. [in Russian].
13. Ostrovitjanov R.V., Basalov F.A. *Statistical Theory of the Radar of Extended Targets*. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1982. 232 p. [in Russian].
14. Fel'dman Ju.I., Mandurovskij I.A. *The Theory of Fluctuations of locational Signals Reflected by Distributed Targets*. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1988. 272 p. [in Russian].
15. Komarov I.V., Smolskiy S.M. *Fundamentals of Short-Range FM Radar*. Norwood, Artech House, 2003. 314 p.
16. Novoselov O.N., Fomin A.F. *Fundamentals of the Theory and Calculation of Information-Measuring Systems. 2nd ed.* Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 336 p. [in Russian].
17. Pozdnjak S.I., Melitickij V.A. *Introduction to the Statistical Theory of the Polarization of Radio Waves*. Moscow, Sov. Radio Publ., 1974. 514 p. [in Russian].
18. Atojanc B.A., Ezerskiy V.V. The Distribution of Elementary Phases in the Model of a Fluctuating Target. *Proceedings of Universities. Electronics*, 1977, Vol. 20, No. 4, pp. 106–108. [in Russian].
19. Atojanc B.A., Karpov A.F. Probabilistic Models of the Phase of a Radio Signal. *Proceedings of Universities. Electronics*, 1983, Vol. 26, No. 4, pp. 73–79. [in Russian].
20. Artjushenko V.M. *Research and Development of a Radar Meter for the Parameters of the Motion of Extended Objects*. Moscow, FGBOU VPO FTA, 2013. 214 p. [in Russian].
21. L'vovskij E.N. *Statistical Methods for Constructing Empirical Formulas*. Moscow, Vyssh. shkola, 1982. 224 p. [in Russian].
22. Enslein K., Relston E., Uilf G.S. *Statistical Methods for EVM: Transl. from Engl. / Transl. G.V. Martynov, A.T. Terekhin; Under Ed. of M.B. Malyutov*. Moscow, Nauka Publ., 1986. 464 p. [in Russian].
23. Artjushenko V.M., Volovach V.I. The Study of Spectrum of Doppler Signal Reflected from Moving of Extended Object. *Achievements of Modern Radioelectronics*, 2015, No. 11, pp. 58–66.
24. Kremer I.Ja., Vladimirov V.I., Karpuhin V.I. *Modulating (Multiplicative) Interference and Reception of Radio Signals*. Moscow, Sov. Radio Publ., 1972. 480 p. [in Russian].

25. Vasil'ev K.K. *Reception of Signals for Multiplicative Interference*. Saratov, Izd-vo Saratovskogo un-ta, 1983. 128 p. [in Russian].

26. Artjushenko V.M., Volovach V.I. The Estimate of Measurement Error Information of the Signal Parameters in Terms of the Impact of Multiplicative Noise. *Information Technology Bulletin*, 2016, No. 3 (09), pp. 30–47. [in Russian].

27. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Simulation of Continuous Markov Processes in Discrete-Time by the Example of Radar Signals Described by Stochastic Differential Equations. *Radioengineering*, 2016, No. 12, pp. 28–36. [in Russian].

28. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Statistical Characteristics of the Durations of Emission Envelopes Signals Reflected from Extended Objects. *Radioengineering*, 2015, No. 2, pp. 54–61. [in Russian].

29. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Analysis of the Spectrum Parameters of the Signal Reflected from an Extended Object. *Instrumentation*, 2012, No. 9, Vol. 55, pp. 62–67. [in Russian].

30. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Statistical Characteristics of Mixture of Signal and Additive-Multiplicative Noise with Non-Gaussian Distribution. *Radioengineering*, 2017, No. 1, pp. 95–102. [in Russian].

### Список литературы

1. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации: учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1992. 304 с.

2. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации. М.: Радио и связь, 1983. 536 с.

3. Журавлев А.К., Лукошин А.П., Поддубный С.С. Обработка сигналов в адаптивных антенных решетках. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 240 с.

4. Родимов А.П., Поповских В.В. Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.

5. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / Под ред. Л.Т. Тучкова. М.: Радио и связь, 1985. 236 с.

6. Артюшенко В.М., Воловач В.И., Мороз А.П., Ставровский М.Е., Пушкин Н.М. Анализ моделей плотности распределения вероятностей сигнала, отраженного от про-

странственно-распределенных объектов // Двойные технологии. 2017. № 3 (80). С. 47–52.

7. Артюшенко В.М., Воловач В.И., Аббасова Т.С. Плотность распределения вероятности сигнала, подверженного воздействию мультипликативной и аддитивной помехи // Двойные технологии. 2017. № 1 (78). С. 30–35.

8. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Статистические характеристики огибающей смеси негауссовских периодически нестационарного радио-сигнала и аддитивной помехи // Радиотехника. 2017. № 1. С. 111–116.

9. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Моделирование плотности распределения вероятности смеси сигнала, подверженного воздействию амплитудных искажений и аддитивной помехи // Радиотехника. 2017. № 1. С. 103–110.

10. Артюшенко В.М., Воловач В.И., Иванов В.В. Статистические характеристики сигналов и помех в радиотехнических устройствах ближнего действия // Приборостроение. 2014. Т. 57, № 7. С. 46–50.

11. Воловач В.И. Исследование плотности распределения вероятностей обнаружения объекта с учетом изменяющейся дальности // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2013. № 4. С. 71–75.

12. Фалькович С.Е., Хомяков Е.Н. Статистическая теория измерительных радиосистем. М.: Сов. Радио, 1981. 288 с.

13. Островитянов Р.В., Басалов Ф.А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. М.: Радио и связь, 1982. 232 с.

14. Фельдман Ю.И., Мандуровский И.А. Теория флуктуаций локационных сигналов, отраженных распределенными целями. М.: Радио и связь, 1988. 272 с.

15. Komarov I.V., Smolskiy S.M. *Fundamentals of Short-Range FM Radar*. Norwood, Artech House, 2003. 314 p.

16. Новоселов О.Н., Фомин А.Ф. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1991. 336 с.

17. Поздняк С.И., Мелитицкий В.А. Введение в статистическую теорию поляризации радиоволн. М.: Сов. Радио, 1974. 514 с.

18. Атоянц Б.А., Езерский В.В. Распределение элементарных фаз в модели флуктуирующей цели // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1977. Т. 20, № 4. С. 106–108.

19. Атоянц Б.А., Карпов А.Ф. Вероятностные модели фазы радио-сигнала // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1983. Т. 26, № 4. С. 73–79.
20. Артюшенко В.М. Исследование и разработка радиолокационного измерителя параметров движения протяженных объектов. М.: ФГБОУ ВПО ФТА, 2013. 214 с.
21. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высш. школа, 1982. 224 с.
22. Энслейн К., Рэлстон Э., Уилф Г.С. Статистические методы для ЭВМ: Пер. с англ. / Пер. Г.В. Мартынов, А.Т. Терехин; под ред. М.Б. Малютова. М.: Наука, 1986. 464 с.
23. Artjushenko V.M., Volovach V.I. The Study of Spectrum of Doppler Signal Reflected from Moving of Extended Object // Achievements of Modern Radioelectronics. 2015. No. 11. P. 58–66.
24. Кремер И.Я., Владимиров В.И., Карпунин В.И. Модулирующие (мультипликативные) помехи и прием радиосигналов / Под ред. И.Я. Кремера. М.: Сов. Радио, 1972. 480 с.
25. Васильев К.К. Прием сигналов при мультипликативных помехах. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1983. 128 с.
26. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Оценка погрешности измерения информационных параметров сигнала в условиях воздействия мультипликативных помех // Информационно-технологический вестник. 2016. № 3 (09). С. 30–47.
27. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Моделирование плотности вероятности сигнала и аддитивного шума при воздействии мультипликативных помех // Радиотехника. 2016. № 12. С. 28–36.
28. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Статистические характеристики длительностей выбросов огибающих сигналов, отраженных от протяженных объектов // Радиотехника. 2015. № 2. С. 54–61.
29. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Анализ параметров спектра сигнала, отраженного от протяженного объекта // Приборостроение. 2012. № 9, Т. 55. С. 62–67.
30. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Статистические характеристики смеси сигнала и аддитивно-мультипликативных помех с негауссовским характером распределения // Радиотехника. 2017. № 1. С. 95–102.



**Сироткин С. Л.**  
**Sirotkin S. L.**

*кандидат технических наук,  
ведущий инженер-конструктор  
Научно-конструкторского бюро  
моделирующих и управляющих систем,  
ФГАОУ ВО «Южный федеральный  
университет»,  
г. Таганрог, Российская Федерация*



**Коньков А. Н.**  
**Konkov A. N.**

*начальник сектора  
Научно-конструкторского бюро  
моделирующих и управляющих систем,  
ФГАОУ ВО «Южный федеральный  
университет»,  
г. Таганрог, Российская Федерация*

УДК 681.3

## **НЕПРЕРЫВНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ В КОД ПРОИЗВЕДЕНИЯ ДВУХ ЧАСТОТ И РАЗНОСТИ ФАЗ МЕЖДУ НИМИ**

Данная статья относится к области аналого-цифрового преобразования. Аналоговым сигналом здесь является средняя частота импульсов или другие параметры этих сигналов, например сумма и разность частот, сумма и разность периодов частот, скорость изменения частоты (первая производная), скорость изменения периода частоты (первая производная), ускорение изменения частоты (вторая производная) и т.п.

Принцип работы всех описываемых преобразователей одинаков и построен на основе способ измерения частоты, предложенного С.С. Бруфманом в 1964 г. Средняя входная частота импульсов поступает на суммирующий вход реверсивного счетчика, и она же, пройдя линию задержки, поступает на вычитающий вход реверсивного счетчика. При постоянной частоте входных импульсов показания счетчика не изменяются и равны количеству импульсов, поступивших на суммирующий вход реверсивного счетчика до начала поступления этих же импульсов на вычитающий вход. При изменении входной частоты изменяются показания реверсивного счетчика, т.е. при увеличении частоты импульсов показания увеличиваются, а при уменьшении — уменьшаются. Таким образом, осуществляется непрерывное слежение за величиной средней частоты входных импульсов.

Рассматриваются основанные на описанном способе обработки частотно-импульсных сигналов преобразователь произведения двух частот в код и преобразователь разности фаз двух частот в код.

Описанные методы построены на основе использования дискретных линий задержки (регистров сдвига) с большим числом разрядов. Реализация линий задержки с большим числом разрядов предлагается на основе программируемых логических интегральных схем.

Предложенные устройства можно использовать в измерительных системах, в системах автоматического управления, в системах стабилизации частоты, в системах фазовой или частотной автоподстройки частоты.

**Ключевые слова:** частотный датчик, реверсивный счетчик, частота импульсов, скорость изменения частоты, ускорение изменения частоты, разность частот, период, скорость изменения периода, разность периодов, дискретная линия задержки, регистр сдвига.

## CONTINUOUS TRANSFORMATION IN THE WORKS OF THE TWO FREQUENCIES AND THE PHASE DIFFERENCE BETWEEN THEM

This article relates to the field of analog-to-digital transformation. An analog signal here is the average pulse frequency or other parameters of these signals, for example, the sum and difference of frequencies, the sum and difference of frequency periods, the frequency change rate (the first derivative), the frequency change rate (the first derivative), the frequency change acceleration (the second derivative), etc.

The principle of operation of all described converters is the same and is based on the method of frequency measurement proposed by Brufman S.S. in 1964. The average input pulse frequency goes to Sumirific entrance reversible counter and it, after passing the delay line, walking on the subtractive input of the reversible counter. When the input pulses are constant, the meter readings do not change and are equal to the number of pulses received at the summing input of the reversing counter before the beginning of the receipt of the same pulses at the subtracting input. When the input frequency change readings reversible counter, i.e., with increasing pulse frequency readings increase and during decrease — reduced. Thus, a continuous reduction is carried out behind the value of the average frequency of the input pulses.

Based on the described method of processing of frequency-pulse signals, the Converter of the product of two frequencies into the code and the Converter of the phase difference of two frequencies into the code are considered.

The described methods are based on the use of disk-based delay lines (shift registers) with a large number of digits. The realization of delay lines with a large number of digits is proposed on the basis of programmable logic integrated circuits.

The proposed device can be used in measuring systems, automatic control systems, stabilization systems hour friends, in systems of phase or frequency-locked loop, rate of change of period, difference in periods, the digital delay line, a shift register.

**Key words:** power quality, quality parameters of electric voltage, the load unit, the power consumers, electricity supply, monitoring of the power quality, transmission of signals and data via communication channels, visualization, software tools, microcontrollers and microcontroller boards.

Задача обработки информации от частотных датчиков является актуальной, т.к. существует множество устройств и приборов, оснащенных частотными датчиками, у которых информационными параметрами являются средняя частота импульсов и ее производные.

В 1964 г. С.С. Бруфманом был запатентован способ измерения частоты [1]. Описание этого способа опубликовано в 1970 г. [2]. Суть способа следующая. Средняя частота входных импульсов поступает на суммирующий вход реверсивного счетчика, и она же через линию задержки поступает на вычитающий вход реверсивного счетчика. В результате выходной код реверсивного счетчика непрерывно отслеживает величину входной частоты.

На базе данного способа предложены различные преобразователи, позволяющие непрерывно отслеживать в двоичном коде

различные характеристики частотных сигналов.

В [3] описаны различные устройства, защищенные авторскими свидетельствами СССР, непрерывно преобразующие в код различные параметры частотно-импульсных сигналов, например, сумму двух частот в код, разность двух частот в код, скорость изменения частоты в код (первая производная), скорость изменения суммы и разности частот в код, ускорение изменения частоты в код (вторая производная), код периода средней частоты импульсов, разность периодов двух частот в код и скорость изменения периода частоты в код (первая производная).

В настоящей статье предложены и описаны отсутствующие в [3] преобразователи в код произведения двух частот [4] и преобразователи в код сдвига фаз между двумя близкими частотами [5].

Схема преобразователя в код произведения двух частот приведена на рисунке 1. Преобразователь работает следующим образом.

Две входные частоты  $f_1$  и  $f_2$  поступают на суммирующие входы реверсивных счетчиков «PC1» и «PC2» соответственно. Эти же частоты, пройдя линии задержки «ЛЗ1» и «ЛЗ2», поступают на вычитающие входы реверсивных счетчиков «PC1» и «PC2» соответственно.

Импульсом «СБРОС» преобразователь устанавливается в исходное состояние, т.е. обнуляются счетчики «PC1» и «PC2», линии задержки «ЛЗ1», «ЛЗ2» и управляемый делитель частоты «УДЧ».

После снятия потенциала на входе «СБРОС» преобразователь начинает работать. Счетчик «PC1» непрерывно отслеживает значение частоты  $f_1$ , а счетчик «PC2» отслеживает значение частоты  $f_2$ .

На выходе «PC1» непрерывно формируется код, прямо пропорциональный первой входной частоте  $f_1$ , а на выходе «PC2» непрерывно формируется код, прямо пропорциональный второй входной частоте  $f_2$ . Код с выхода счетчика «PC2» поступает на вход управляемого делителя частоты «УДЧ», коэффициент деления которого тем больше, чем больше код на его управляющем входе и чем меньше частота импульсов на его выходе. Частота с выхода «УДЧ» поступает на такти-

рование первой линии задержки «ЛЗ1», и в зависимости от величины частоты тактирования меняется время задержки линии «ЛЗ1».

Импульсы с «ГТИ» поступают на делитель частоты «Д» и на вход распределителя импульсов «Р». Импульсы с «ГТИ» тактируют линию задержки «ЛЗ2» с постоянной частотой от делителя частоты «Д».

Таким образом, код на выходе счетчика «PC2» прямо пропорционален частоте  $f_2$ , а код на выходе «PC1» прямо пропорционален частоте  $f_1$  и обратно пропорционален частоте  $f_2$ . Таким образом, код на выходе счетчика «PC1» прямо пропорционален произведению частот  $f_1$  и  $f_2$ .

Синхронизаторы «С» необходимы для устранения совпадения импульсов на входах реверсивных счетчиков «PC1» и «PC2» и коммутатора «К». С коммутатора «К» код произведения частот поступает на выход преобразователя.

На базе способа измерения средней частоты импульсов [1] предложен и описан непрерывный преобразователь сдвига фаз двух частот в код [5]. Структура преобразователя приведена на рисунке 2.

Преобразователь работает следующим образом. Частоты  $f_1$  и  $f_2$  через синхронизаторы «С» поступают на вход R и S триггера «Т» соответственно (частоты  $f_1$  и  $f_2$  должны быть равны или близки между собой). В

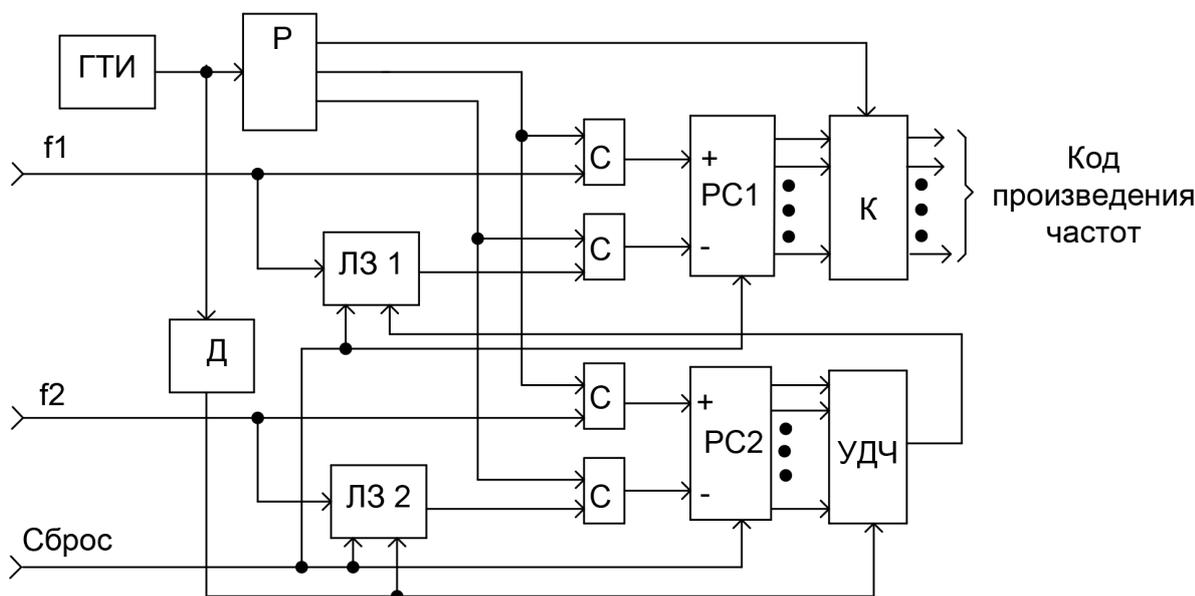


Рисунок 1. Структура преобразователя произведения двух частот в код

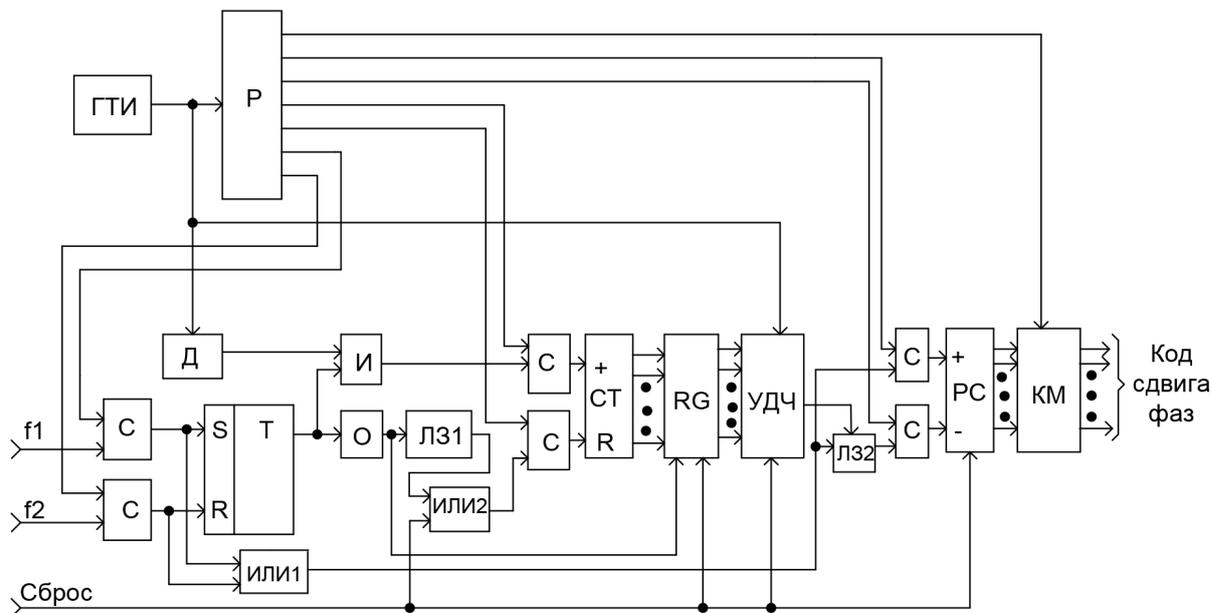


Рисунок 2. Структура преобразователя сдвига фаз в код

зависимости от сдвига фаз между частотами  $f_1$  и  $f_2$  на выходе триггера «Т» формируется импульс, длительность которого пропорциональна сдвигу фаз между частотами  $f_1$  и  $f_2$ . Этот импульс поступает на первый вход элемента «И», на второй вход которого через делитель «Д» поступают тактовые импульсы от «ГТИ». Эти пакеты импульсов в каждом цикле заполняют временной интервал, сформированный на единичном выходе триггера «Т». Число импульсов в пачке в каждом цикле преобразования соответствует сдвигу фаз между частотами  $f_1$  и  $f_2$ .

Пакеты импульсов с выхода элемента «И» поступают на суммирующий вход счетчика «СТ», на котором подсчитывается число импульсов в каждой пачке. Число импульсов в каждой пачке прямо пропорционально сдвигу фаз между частотами  $f_1$  и  $f_2$ . После окончания каждого импульса на выходе триггера «Т» с помощью одновибратора «О» формируется импульс, поступающий на вход записи регистра «RG» и записывающий в каждом периоде значение кода из счетчика «СТ» в регистр «RG». Импульс от одновибратора «О» с помощью элемента задержки «ЛЗ1» задерживается и через элемент «ИЛИ2» поступает на вход сброса счетчика «СТ». Таким образом, код в регистре «RG» следит за длительностью импульса на единичном выходе триггера «Т», т.е. следит за

разностью фаз двух частот и изменяется только при изменении разности фаз.

Далее код с выхода регистра «RG» поступает на вход управляемого делителя частоты «УДЧ», который осуществляет деление частоты следующим образом: чем больше код на его выходе, тем больше коэффициент деления. При нулевом коде деление не осуществляется, т.е. коэффициент деления равен единице. Тактовая частота на счетный вход «УДЧ» поступает с первого выхода распределителя «Р». В зависимости от сдвига фаз между входными частотами непрерывно изменяется коэффициент деления «УДЧ», причем чем больше сдвиг фаз, тем больше коэффициент деления и тем меньше частота на выходе «УДЧ». Эта частота поступает на тактирующий вход линии задержки «ЛЗ2» и управляет ее временем задержки. На вход линии задержки «ЛЗ2» через элемент «ИЛИ1» поступает суммарная частота входных частот  $f_1$  и  $f_2$ .

На вход линии задержки «ЛЗ1» поступают импульсы от «О», который формирует импульсы по переднему фронту импульса на выходе триггера «Т». Импульс с выхода одновибратора «О», пройдя линию задержки «ЛЗ1», в каждом цикле перезаписывает код из счетчика «СТ» в регистр «RG» и после этого с помощью элемента «ИЛИ2» обнуляет счетчик «СТ». Код из регистра «RG» посту-

пает на управляющий вход управляемого делителя частоты «УДЧ», импульсы с выхода которого поступают на тактирующий вход линии задержки «ЛЗ2». Частота импульсов на выходе «УДЧ» преобразуется в код по методу [1] с использованием реверсивного счетчика «РС» и линии задержки «ЛЗ2». «УДЧ» формирует импульсы с частотой, обратно пропорциональной коду управления на его входе, который, в свою очередь, прямо пропорционален коду, соответствующему сдвигу фаз.

Во время действия сигнала «СБРОС» счетчик «СТ» и регистр «RG» обнулены, на «УДЧ» поступает нулевой код, частота на его выходе максимальна, и время задержки в «ЛЗ2» минимально, реверсивный счетчик «РС» не считает, и на его выходе нулевой код. После окончания сигнала на шине «СБРОС» и при нулевой разности фаз между входными частотами на выходе элемента «И» пачка импульсов будет отсутствовать, на выходе «СТ» будет нулевой код, «УДЧ» делить частоту не будет, в линии задержки будет минимальная задержка. Эта минимальная задержка с помощью выбора частоты, подаваемой на ее тактирование, должна быть такой малой, чтобы при максимальных преобразуемых частотах за время этой задержки на суммирующий вход «РС2» до появления на его вычитающем входе поступало не больше одного импульса, т.е. чтобы в этом случае «РС2» складывал и вычитал одинаковое число импульсов, и чтобы его код сохранялся нулевым, т.к. разность фаз остается нулевой.

При одновременном изменении входных частот  $f_1$  и  $f_2$  и при неизменном сдвиге фаз между ними показания «РС2» не изменяются и соответствуют данному сдвигу фаз.

### Список литературы

1. Авторское свидетельство СССР 161417, МПК Н 03 К 13/20. Способ измерения частоты / С.С. Бруфман (СССР). БИ № 7, 1964.
2. Новицкий П.В., Кнорринг Е.Г., Гутников В.С. Цифровые приборы с частотными датчиками. Л.: Энергия, 1970. 423 с.
3. Сироткин С.Л., Коньков А.Н. Методы непрерывной обработки информации от частотных датчиков // Электротехнические и

Таким образом, в описываемом преобразователе осуществляется непрерывное преобразование сдвига фаз в код независимо от величины входных частот, которые между собой не должны отличаться на большую величину. Делитель «Д» необходим для подбора соотношения частот синхронизации и тактовой частоты заполнения счетчика «СТ».

Под разностью фаз двух частотно-импульсных сигналов понимается разность фаз двух гармонических сигналов, совпадающих по частоте с двумя частотно-импульсными сигналами.

### Выводы

1. Для полноты группы ранее описанных непрерывных преобразователей частотных сигналов в код добавлен преобразователь в код произведения двух частот, который непрерывно отслеживает в коде произведение двух частот, что расширяет функциональные возможности преобразования в код частотно-импульсных сигналов.

2. Предложен преобразователь, непрерывно преобразующий в код разность фаз двух частот в код, который позволяет применять его в системах автоматического управления, использующих автоматическую подстройку частоты или фазы.

3. Оба описанных преобразователя относятся к области обработки частотно-импульсных сигналов и характеризуются непрерывным отслеживанием параметров этих сигналов. В перспективе число преобразуемых параметров частотно-импульсных сигналов может быть расширено на основе использования описанных принципов преобразования.

информационные комплексы и системы. 2014. № 3. С. 90–97.

4. Авторское свидетельство СССР 1305857, МПК Н 03 К 1/60. Преобразователь частоты в код / С.Л. Сироткин, А.Н. Коньков, Ю.А. Куликов, В.В. Клименко (СССР). 3948669, Заявлено 01.07.1985; Оpubл. 23.04.1987. БИ 15.

5. Авторское свидетельство СССР 1515368, МПК Н 03 М 1/60, 1/64. Преобра-

зователь частота-код / А.Н. Коньков, С.Л. Сироткин, А.В. Бойченко, В.В. Клименко (СССР). 4315771, Заявлено 12.10.1987; Оpubл. 15.10.1989. БИ 38.

### References

1. Brufman S.S. *Means to Measurement of Frequency*. Certificate of Authorship USSR, No. 161417, 1964. [in Russian].
2. Novitskii P.V., Knorring E.G., Gutnikov V.S. *Digital Devices with Frequency Sensors*. Leningrad, Energiya Publ., 1970. 423 p. [in Russian].
3. Sirotkin S.L., Kon'kov A.N. Methods of continuous processing of information from frequency sensors. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2014, No. 3, pp. 90–97. [in Russian].
4. Sirotkin S.L., Kon'kov A.N., Kulikov Yu.A., Klimenko V.V. *Converter Frequency in Code*. Certificate of Authorship USSR, No. 1305857, 1987. [in Russian].
5. Kon'kov A.N., Sirotkin S.L., Boichenko A.V., Klimenko V.V. *Converter Frequency — Code*. Certificate of Authorship USSR, No. 1515368, 1989. [in Russian].



*Денисова О. А.*

**Denisova O. A.**

*доктор физико-математических наук,  
доцент, профессор кафедры «Физика»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной  
технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 535, 534

## МЕХАНИЗМ ОРИЕНТАЦИОННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРИ ФЛЕКСОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ В ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

Изучался пьезоэлектрический эффект в жидких кристаллах (ЖК) методами модуляционной спектроскопии при деформации изгиба. Использовалась ячейка-конденсатор, состоящая из двух пластин, одна из которых подвижная. Исследовались тонкие слои нематических жидких кристаллов с гомеотропной, квазигомеотропной и планарной ориентациями молекул толщиной от 20 до 100 мкм. Частота возбуждения от 20 Гц до 20 кГц. Экспериментально получены амплитудные и частотные зависимости гармоник пьезоотклика. Анализ частотных зависимостей показал, что с увеличением проводимости образца частотные характеристики гармоник  $U_{1\omega}$  и  $U_{2\omega}$  становятся более ровными, но при этом их абсолютная величина уменьшается, а частотный максимум сдвигается в область более высоких частот. Согласно теории Мейера, при неоднородном ориентационном распределении поля директора в объеме ЖК индуцируется поляризация. Такое распределение создается ориентационными волнами, распространяющимися в слое ЖК вследствие деформаций одной из его поверхностей. В объеме ЖК распространяются упруго-вязкая и вязкая волны. Возникновение первой гармоники  $U_{1\omega}$  согласуется с механизмом флексоэлектрического эффекта Мейера. Вторая гармоника  $U_{2\omega}$  возникает из-за нелинейных эффектов взаимодействия акустического поля и поля ориентации директора ЖК. Актуальность изучения рассматриваемой проблемы связана с возможностью создания ЖК-дисплеев нового поколения. Использование жидких кристаллов дает ряд преимуществ (облегчение конструкции, малая потребляемая мощность и габаритные размеры, дешевизна).

**Ключевые слова:** нематические жидкие кристаллы, пьезоэлектрический эффект, флексоэлектрическая поляризация.

## THE ORIENTATION POLARIZATION MECHANISM FOR FLEXOELECTRIC EFFECTS IN LIQUID CRYSTALS

The piezoelectric effect in liquid crystals (LC) was studied by modulation spectroscopy in the deformation of a bend. A cell was used — a capacitor consisting of two plates, one of which is movable. Thin layers of nematic liquid crystals with homeotropic, quasi-homeotropic, and planar molecular orientations with a thickness of 20 to 100  $\mu\text{m}$  were studied. Excitation frequency was from 20 Hz to 20 kHz. The amplitude and frequency dependences of the piezo-response harmonics are experimentally obtained. Analysis of the frequency dependences showed that with increasing conductivity of the sample, the frequency characteristics of the harmonics  $U_{1\omega}$  and  $U_{2\omega}$  become more even, but their absolute value decreases, and the frequency maximum shifts to higher frequencies. According to Meyer's theory, with a non-uniform orientational distribution of the director field in the LC volume, polarization is induced. Such a distribution is created by orientational waves propagating in the LC layer due to deformations of one of its surfaces. In the bulk of the LC, elastic-viscous and viscous waves propagate. The appearance of the first harmonic  $U_{1\omega}$  is consistent with the Meyer's flexoelectric effect mechanism. The second harmonic  $U_{2\omega}$  arises due to the nonlinear effects of the acoustic field interaction and the orientation field of the LC director. The relevance of

studying the problem in question is connected with the possibility of creating LC displays of a new generation. The use of liquid crystals offers a number of advantages (simplification of design, low power consumption and overall dimensions, low cost).

**Key words:** nematic liquid crystals, piezoelectric effect, flexoelectric polarization.

### Введение

Благодаря особому упорядочению молекул жидких кристаллов (ЖК) в объеме, они демонстрируют уникальные эффекты. Вследствие анизотропии физических свойств жидкие кристаллы высокочувствительны к влиянию электрических и магнитных полей, упругих напряжений и вязкого течения, к изменению температуры и концентрации примесей. Многие эффекты, наблюдаемые в жидких кристаллах и связанные с особенностями ориентационных изменений, не наблюдаются в изотропных средах и твердых телах. К таким эффектам следует отнести и пьезоэлектрический эффект. Пьезоэффект в твердых кристаллах — это образование макроскопической объемной поляризации под воздействием механических напряжений или деформаций [1]. Большинство жидких кристаллов имеют центр симметрии, поэтому в них реализовать такой случай невозможно. Тем не менее, Мейер в работе [2] показал, что в нематических жидких кристаллах (НЖК) возможно наблюдать особый пьезоэлектрический эффект, который называют флексоэлектрическим [3]. Его суть сводится к появлению электрической поляризации, которая возникает в результате деформации изгиба или закручивания линий ориентации директора в пространстве, из-за взаимодействия дипольных молекул ЖК, которые имеют анизотропную геометрическую форму.

Трудно переоценить актуальность изучения вопроса внешнего воздействия на жидкий кристалл и процессы, происходящие в его объеме (ориентационные эффекты, особенности распространения поперечных волн) [4–9]. Это связано с широкими перспективами практического применения в технике, например для создания мониторов нового поколения. Практическое использование жидких кристаллов интересно с точки зрения экономической эффективности,

простоты, удобства, небольших габаритов устройств и малых потребляемых мощностей. Поэтому в данной работе исследованы особенности флексоэлектрического эффекта в нематических жидких кристаллах.

*Методика экспериментальных исследований*

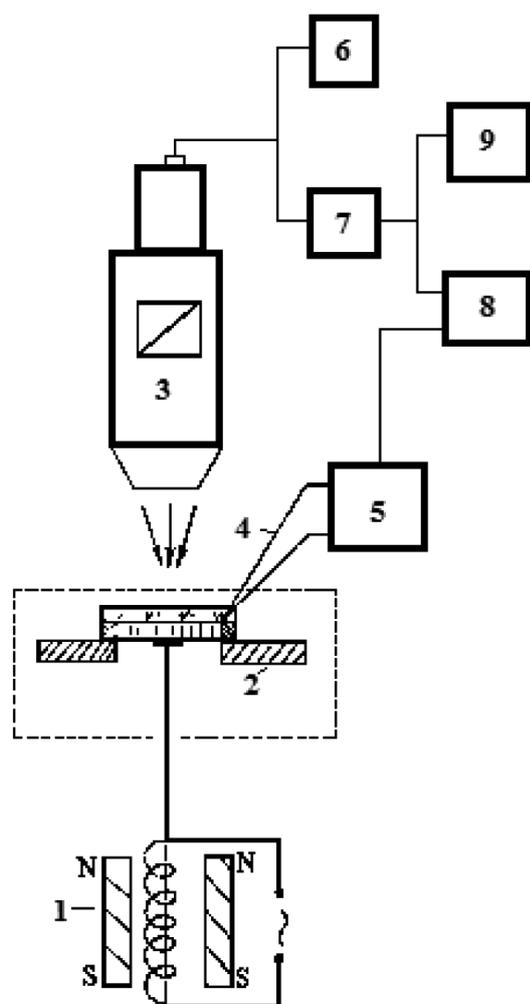
В данном случае флексоэлектрический эффект в жидких кристаллах изучался экспериментально. Для реализации этой цели использовалась установка, представленная на рисунке 1, а. Интенсивность прошедшего или отраженного света фиксировалась спектрофотометрической приставкой (СФН), постоянная компонента — милливольтметром постоянного тока. Измерения проводились в низкочастотном диапазоне (20 Гц — 20 кГц) [10–15].

Ячейка с исследуемым жидким кристаллом закреплялась на предметном столике микроскопа. Источник изгибных колебаний помещался под столик микроскопа. Мембрана источника колебаний соединялась с ЖК-ячейкой волноводом.

Ячейка собиралась из полупрозрачных стеклянных пластин с покрытием из хрома Cr (рисунок 1, б). Одна пластина приготавливалась из предметного стекла (толщина 2 мм, 20 × 30 мм), а другая — из тонкого покровного стекла (толщина 100 мкм, 24 × 24 мм). Таким образом, измерительная ячейка имела вид конденсатора, в свободное пространство которого помещался жидкий кристалл.

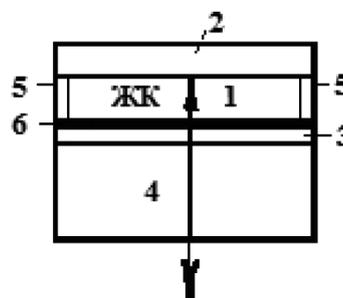
Изучались жидкие кристаллы нематического типа толщиной от 10 до 100 мкм:

- МББА-п — метоксибензилиден-п-бутиланилин;
- ЦФЭГБК — цианофениловый эфир гептилбензойной кислоты;
- НФООБ — нитрофенилоктилоксибензоат;
- ОЦБ-4 — октил-4-цианобифенил;
- БГАОБ — будетилгептаноилазоксibenзол.



а)

1 — источник звуковых колебаний; 2 — предметный столик микроскопа с термостатом, содержащим ячейку с ЖК; 3 — поляризационный микроскоп с фотометрической приставкой; 4 — дифференциальная термопара; 5, 6 — микровольтметры постоянного тока; 7 — селективный усилитель; 8 — АЦП; 9 — компьютер;



б)

1 — слой жидкого кристалла; 2 и 3 — пластины; 4 — излучатель; 5 — прокладки; 6 — отражающее свет покрытие

**Рисунок 1.** Экспериментальная техника исследования акустооптических явлений в жидких кристаллах в случае изгиба

*Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение*

Как уже упоминалось, при периодической деформации изгиба одной из пластин ЖК-ячейки с частотой  $\omega$  имеет место флексоэлектрический эффект. Рассмотрим флексоэлектрический отклик тонкого слоя жидкого кристалла с начальной однородной ориентацией молекул на внешнее возмущение. В этом случае одна из поверхностей НЖК периодически изменяет свою кривизну в центре с максимальной амплитудой отклонения от равновесного положения. В этом случае между обкладками ячейки-конденсатора регистрируется разность потенциалов  $U$ , зависимость которой отражает

сложный спектральный характер. Зафиксированы гармоники до четвертого порядка  $U_{1\omega}$ . Необходимо отметить, что четные гармоники фиксируются только при гомеотропной и квазигомеотропной ориентации директора, а гармоники первого  $U_{1\omega}$  и третьего  $U_{3\omega}$  порядка наблюдаются при любой ориентации директора. Так же отличаются зависимости гармоник от амплитуды изгиба  $a$ . При небольших амплитудах значение сигнала на частоте возбуждения  $U_{1\omega}$  зависит линейно от  $a$  и при амплитуде  $a \sim 0,7$  мкм уменьшается, это картина аналогична для всего набора рассматриваемых кристаллов (рисунок 2, а).

Амплитудные зависимости  $U_{3\omega}$  и  $U_{4\omega}$  не приводятся, т.к. они аналогичны первой  $U_{1\omega}$  и второй  $U_{2\omega}$  гармоникам. Вторая гармоника  $U_{2\omega}$  наблюдается при пороговой амплитуде  $a_n \sim 0,1$  мкм (рисунок 2, б), и ее значение существенно больше величины первой  $U_{1\omega}$  ( $a \geq a_n$ ), при последующем увеличении амплитуды воздействия она достигает максимального значения и выходит на «плато».

Рассмотрим теперь зависимости  $U_{1\omega}$  и второй  $U_{2\omega}$  гармоник от частоты (рисунок 3), которые получены при зафиксированной скорости воздействий на поверхность ЖК. Из рисунка 3 видно, что они имеют резонансный характер, который хорошо соотносится с зависимостью второй гармоники интенсивности необыкновенной компоненты отраженного поляризованного сигнала  $I_{2\omega}$  от частоты (рисунок 3, а), которая была получена при изучении акустооптических эффектов в ЖК слоях ( $I_{2\omega}$  — интенсивность, полученная на удвоенной частоте возбуждения  $2\omega$ ). Возникновение переменной разности потенциалов между пластинами ЖК-ячейки связано с изменениями ориентации молекул ЖК, а осциллирующий вид зависимости объясняется механическим резонансом мембраны, совершающей колебательные движения.

В частотных зависимостях гармоник  $U_{i\omega}$  можно выделить две основные области:  $0 < \omega \leq 1,5$  кГц и  $\omega \geq 1,5$  кГц. В первом

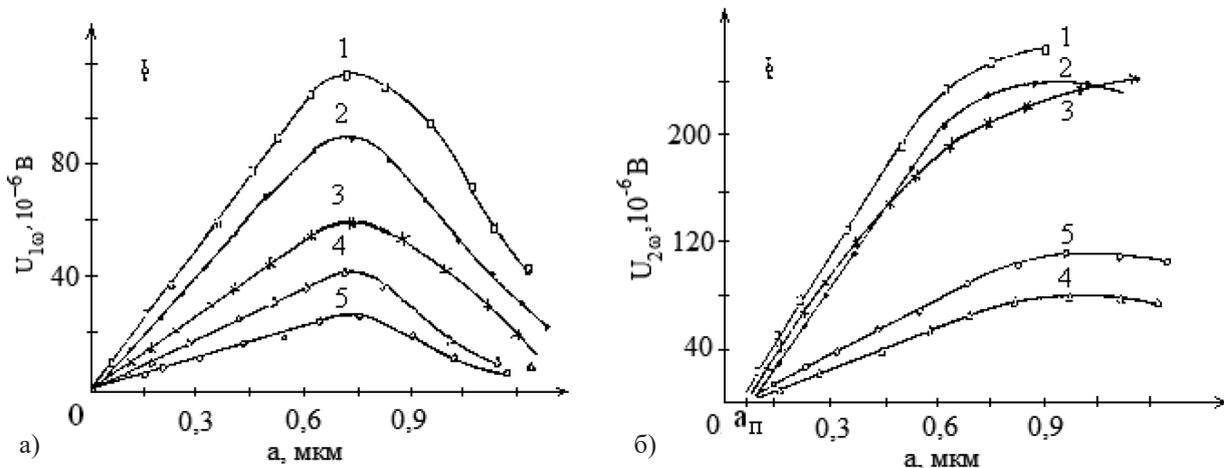
частотном поддиапазоне  $U_{i\omega}$  возрастают вплоть до  $\omega_c \sim 1,3$  кГц, а затем они уменьшаются согласно закону  $\sim \omega^{-1}$ .

Рассмотрим теперь природу индуцируемой ЭДС и гармоник, составляющих ее. Для этой цели, как показано в работе [16], необходимо проанализировать полученные сигналы, зависящие от характеристик слоев ЖК с учетом эффектов, наблюдаемых в них. Мейер в работе [2] показал, что при неоднородной ориентации директора  $\vec{n}(\vec{r})$  в объеме жидкого кристалла возникает поляризация  $\vec{P}$ . Из-за распространения ориентационных волн в слое кристалла одна из его поверхностей деформируется. Решение уравнения

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_o}{2} \left(1 - \frac{n_o^2}{n_e^2}\right) \int_{-h/2}^{h/2} \theta^2(z, t) dz \quad (1)$$

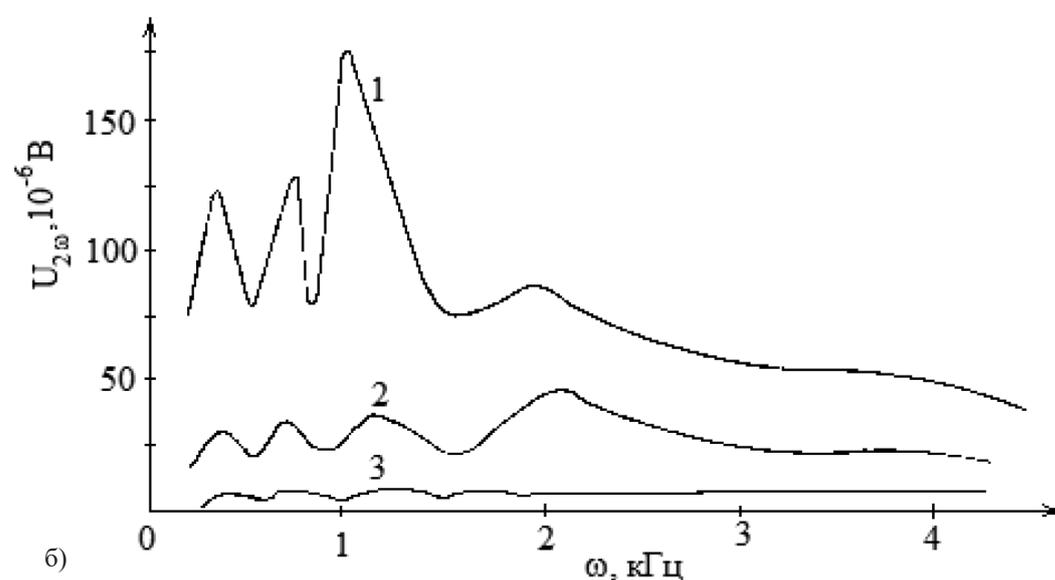
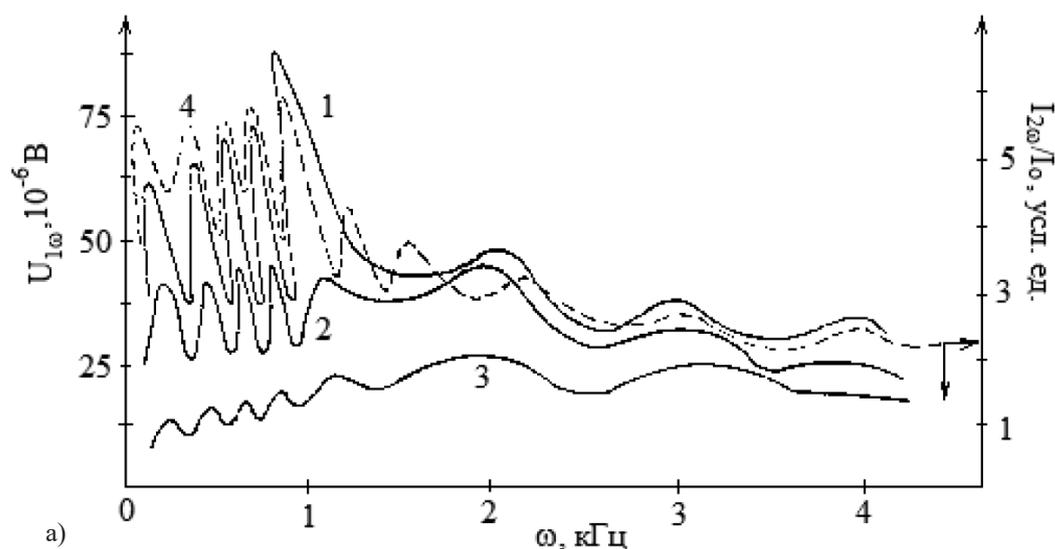
показывает, что в объеме гомеотропно ориентированного и квазигомеотропно ориентированного ( $c \theta \ll 1$ ) жидкого кристалла распространяются чисто-вязкая и упруго-вязкая волны. Угол  $\theta$  есть функция от  $r$  и  $z$  ( $r$  и  $z$  — переменные цилиндрической системы координат, плоскость ячейки перпендикулярна оси OZ).

Проведем анализ экспериментальных результатов согласно теории флексоэлектрического эффекта Мейера. Предположим, что  $\vec{n}(\vec{r}, t) = \vec{n}_o(\vec{r}) + \delta\vec{n}(\vec{r}, t)$ , где  $\vec{n}_o(\vec{r})$  — стационарное распределение директора квазигомеотропного слоя,  $\delta\vec{n}(\vec{r}, t)$  — малое возмущение ори-



1 — ОЦБ ( $T_N \sim 35$  °C); 2 — МББА ( $T_N \sim 25$  °C);  
 3 — ЦФЭГБК ( $T_N \sim 48$  °C); 4 — БГАОБ ( $T_N \sim 25$  °C); 5 — НФООБ ( $T_N \sim 63$  °C)  
 ( $T_N$  — температура НЖК, при которой были экспериментально получены зависимости,  $\omega = 1$  кГц)

**Рисунок 2.** Амплитудные зависимости первой  $U_{1\omega}$  (а) и второй  $U_{2\omega}$  (б) гармоник



1 —  $\sigma_1$ ; 2 —  $\sigma_2$ ; 3 —  $\sigma_3$ ; ( $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ );  
4 — частотная зависимость  $I_{2\omega}/I_{\omega}$ , показывающая связь с регистрируемыми сигналами  $U_{1\omega}$  и  $U_{2\omega}$

**Рисунок 3.** Частотные зависимости (а) первой  $U_{1\omega}$  и (б) второй  $U_{2\omega}$  гармоник при различной начальной проводимости ЖК-пленок  $\sigma$  (МББА,  $T_N \sim 25^\circ\text{C}$ )

ентации. Тогда для поляризации, перпендикулярной ЖК-слою, получим:

$$\vec{P}_z = e_{11}n_z \text{div} \delta \vec{n} - e_{33}[\vec{n} \times \text{rot} \delta \vec{n}]_z,$$

где  $n_z$  — проекция директора на ось Oz.

Если учесть, что  $\delta \vec{n} = \delta \vec{n}(\vec{r})e^{i\omega t}$  (это выполняется при условии  $h \leq \lambda_{3B}$ ), тогда получим:

$$P_z = \left[ \frac{e_{11} + e_{33}}{2} + \frac{e_{11} - e_{33}}{2} \cos 2(\theta_c + \theta_t) \right] \frac{\partial(\theta_c + \theta_t)}{\partial r} - \frac{e_{11} + e_{33}}{2} \sin 2(\theta_c + \theta_t) \frac{\partial(\theta_c + \theta_t)}{\partial z},$$

где  $\theta_c$  — угол, характеризующий стационарное распределение директора в объеме ячейки;  $\theta_t$  — угол, характеризующий осцилляции директора.

Для гомеотропного и квазигомеотропного случаев ( $\theta_c \approx 0$  и  $\theta_c \leq 1$ ) имеем:

$$P_z = e_{11} \frac{\partial \theta_t}{\partial r} - \frac{(e_{11} - e_{33})}{2} \theta_c \frac{\partial \theta_t^2}{\partial r} - \frac{(e_{11} + e_{33})}{2} \theta_c \frac{\partial \theta_t^2}{\partial z}. \quad (2)$$

Для случая планарной ориентации ( $\theta_c = \pi/2$ ):

$$P_z^r = e_{33} \frac{\partial \theta_t}{\partial r} + (e_{11} - e_{33}) \theta_t^2 \frac{\partial \theta_t}{\partial r}. \quad (3)$$

Так как осцилляционная компонента угла директора описывается выражением  $\theta_t = \theta_d \exp(i\omega t)$ , то с учетом выражений (2) и (3) для гомеотропной и планарной ориентаций молекул ЖК разность потенциалов  $U$ , которая возникает между проводящими подложками:

$$U^I \cong e_{11} \frac{h}{R} \bar{\theta}_d e^{i\omega t} - (e_{11} - e_{33}) \frac{h}{R} \bar{\theta}_c \bar{\theta}_d^2 e^{i2\omega t}, \quad (4)$$

$$U^{II} \cong e_{33} \frac{h}{R} \bar{\theta}_d e^{i\omega t} + (e_{11} - e_{33}) \frac{h}{R} \bar{\theta}_d^2 \frac{\partial \bar{\theta}_c}{\partial r} e^{i2\omega t}. \quad (5)$$

Здесь  $h$  — толщина ЖК-слоя;  $R$  — радиус ячейки в плоскости образца;  $\bar{\theta}_d$  — усреднение по толщине ЖК-слоя.

Анализ выражений (4) и (5) показывает, что в спектре регистрируемой ЭДС должен присутствовать целый спектр гармоник. В работе приводятся только первая  $U_{1\omega}$  и вторая  $U_{2\omega}$  гармоники. Необходимо обратить внимание на зависимость первой гармоники  $U_{1\omega}$  для гомеотропной и планарной ориентаций в (4) и (5) от величины угла осцилляций директора  $\bar{\theta}_d$ . Значение первой гармоники  $U_{1\omega}$  прямо пропорционально среднему углу  $\bar{\theta}_d$ , а его амплитудная зависимость может быть получена из результатов исследований аку-

стооптических эффектов, например, для нематического жидкого кристалла — МББА (рисунок 4).

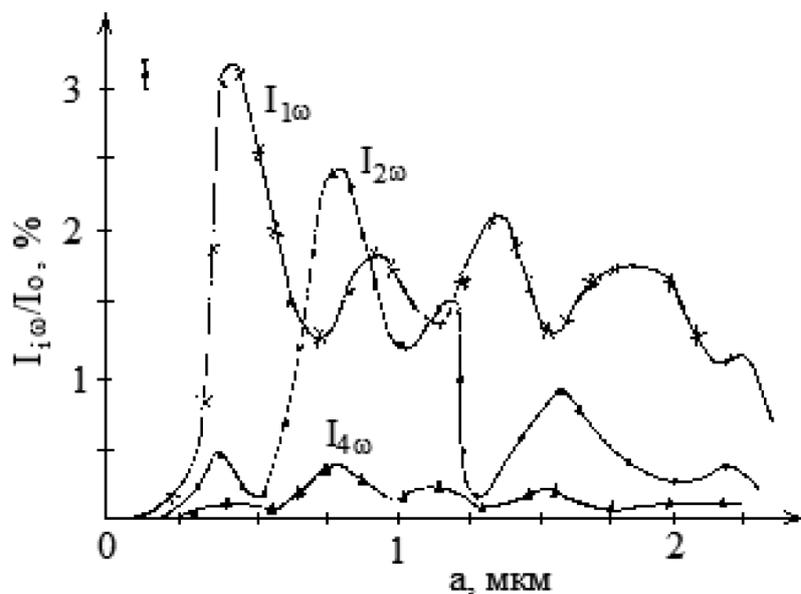
Величина квадрата среднего значения угла девиации  $\bar{\theta}_d^2$  вычислялась из выражения:

$$I_{2\omega} = \frac{I_0}{4} \bar{\theta}_d^2 \beta h \sin(\bar{\theta}_c^2 \beta h), \quad (6)$$

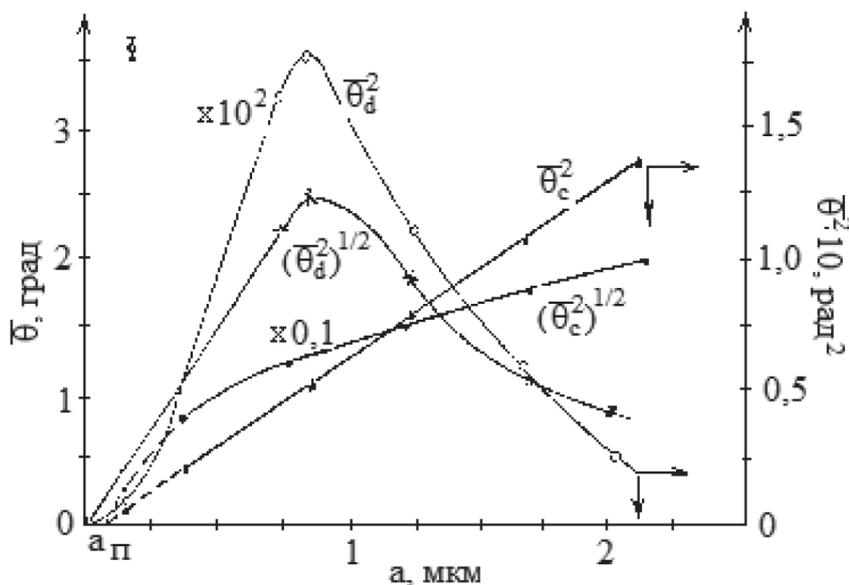
здесь  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{h_0}{2} \left(1 - \frac{n_o^2}{n_e^2}\right) \cong \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n$ .

Формула (6) была получена при предположении, что стационарное распределение директора в объеме  $\theta_c(\vec{r})$ , а  $\bar{\theta}_d^2 \ll \bar{\theta}_c^2$ . Так как полученное в эксперименте значение  $\bar{\theta}_d^2 \ll 1$ , то положим  $\bar{\theta}_d \sim (\bar{\theta}_d^2)^{1/2}$ , это позволяет построить амплитудные зависимости величин  $\bar{\theta}_d$  и  $\bar{\theta}_d^2$  (рисунок 5).

Последний факт дает возможность сделать вывод об идентичности механизмов появления первой гармоники и возникновения флексоэлектрического эффекта Мейера [2], так как из сравнительного анализа  $U_{1\omega}(a)$  и  $\bar{\theta}_d(a)$  следует, что их вид аналогичен. Функциональная зависимость гармоник  $U_{1\omega}$  и  $U_{2\omega}$  угла девиации  $\bar{\theta}_d$  и среднего квадрата угла  $\bar{\theta}_d$  директора дает нам возможность оценить значения этих величин. При подстановке в выражения (4) и (5) данных из работы [17] для флексоэлектрических коэффициентов, например, для МББА  $e_{11} = 10^{-5}$  ед. СГСЕ/см и  $e_{33} = 10^{-4}$  ед. СГСЕ/см, при сред-



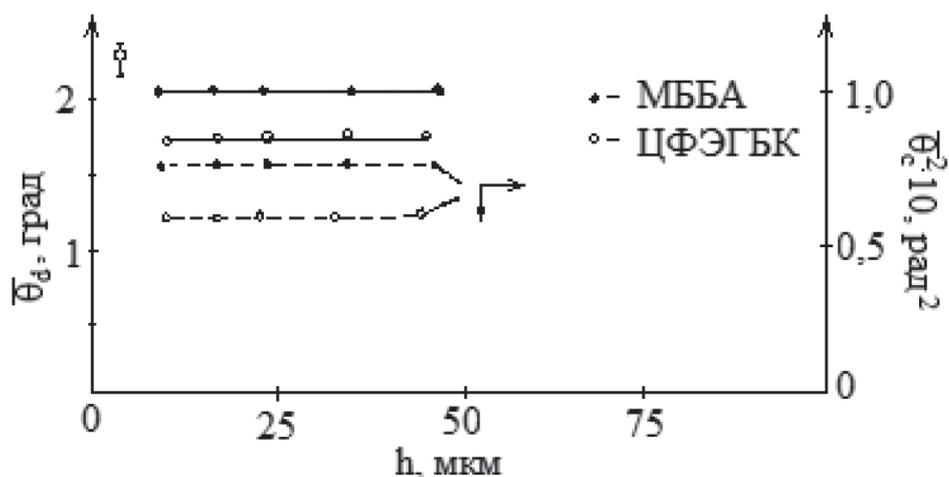
**Рисунок 4.** Амплитудные зависимости спектральных составляющих  $I_{\omega}/I_0$  интенсивности отраженного поляризованного света от ЖК-ячейки (МББА,  $T_N \sim 25$  °С,  $\omega = 1$  кГц)



**Рисунок 5.** Амплитудные зависимости угла девиации  $\bar{\theta}_d \sim (\bar{\theta}_d^2)^{1/2}$  и постоянного угла наклона директора  $\bar{\theta}_c$  в слое ЖК (МББА,  $T_N \sim 25$  °С,  $\omega = 1000$  Гц,  $h = 15$  мкм)

них углах отклонения директора от равновесного состояния  $\bar{\theta}_d \approx 2 \div 5^\circ$  (рисунок 6), получаем значения гармоник ЭДС:  $U_{1\omega} \sim 10^{-5} \div 10^{-6}$  В и  $U_{2\omega} \sim 10^{-7}$  В. Однако последние расчетные значения не соотносятся с экспериментальными данными для  $U_{2\omega} \sim 10^{-4} \div 10^{-3}$  В  $\geq U_{1\omega}$ , и это противоречит предположению о флексоэлектрической природе появления второй гармоники. Но в то же время в рамках теории флексоэлектрического эффекта вторая гармоника ЭДС может возникнуть из-за наличия нелинейных эффектов, которые имеют место при взаимодействии акустического поля с молекулярным полем жидкого кристалла. Как показано в [18], при периодическом воздействии на ЖК-слой сдвиговых колебаний

с частотой  $\omega$  в нем наблюдаются параметрические колебания директора с удвоенной частотой  $2\omega$  из-за возникновения виброгидродинамической неустойчивости. Эти колебания должны проявиться при изучении акустооптического эффекта, а именно при измерении четвертой гармоники  $I_{4\omega}$  промодулированного светового потока. Из выражений (4) и (5) следует, что гармоники  $U_{1\omega}$  и  $U_{2\omega}$  должны быть прямо пропорциональны толщине ЖК-слоя  $h$ . Это выполняется при условии, когда средний угол колебаний директора и средний квадрат не зависит от толщины ЖК-образца, и это подтверждается экспериментально (рисунок 6), а также следует из расчетов.



**Рисунок 6.** Экспериментальные зависимости угла осцилляций и постоянного угла наклона директора  $\bar{\theta}_d$  в ячейке с ЖК от толщины образца ( $a = \text{const}$ ,  $\omega = 1$  кГц)

Так для угла  $\theta_d(z)$  из выражения (1) имеем приближенное равенство:

$$\theta(z) \sim v \frac{\text{ch } qz}{\text{ch } qh/2}.$$

Так как  $q \ll h^{-1}$ , то

$$\bar{\theta}_d = \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \theta(z) dz \sim V \left[ 1 + \frac{1}{8} (qh)^2 \right]^{-1},$$

поэтому можно сделать вывод, что величина  $\bar{\theta}_d$  не зависит от толщины ЖК-слоев. Отсюда следует, что согласно теории флексоэффекта сигналы гармоник  $U_{1\omega}$  и  $U_{2\omega}$  должны зависеть линейно от толщины ЖК-образца. Но эксперимент показывает, что такая зависимость имеет место быть только для  $U_{1\omega}$ , а гармоника  $U_{2\omega}$  не зависит от толщины (рисунок 7).

Последний факт не может быть объяснен в рамках рассматриваемой теории. Независимость второй гармоники  $U_{2\omega}$  от толщины ЖК-слоя может быть связана с тем, что механизм ее появления не связан с объемными характеристиками ЖК-слоя, его толщиной  $h$ , амплитудой девиации директора  $\bar{\theta}_d$ , постоянной компонентой угла  $\bar{\theta}_c$  в объеме жидкого кристалла. Это дает возможность предполагать, что механизм появления второй гармоники  $U_{2\omega}$  связан с поверхностными эффектами, т.е. появление второй гармоники связано с возникновением ориентационной неустойчивости в слое ЖК, а именно поверх-

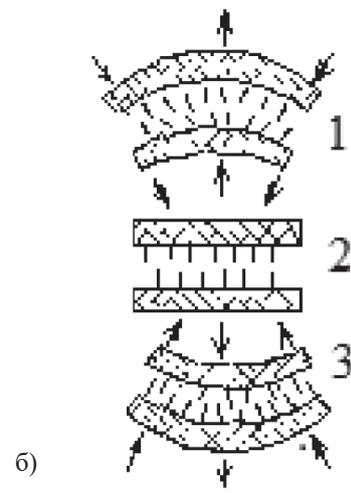
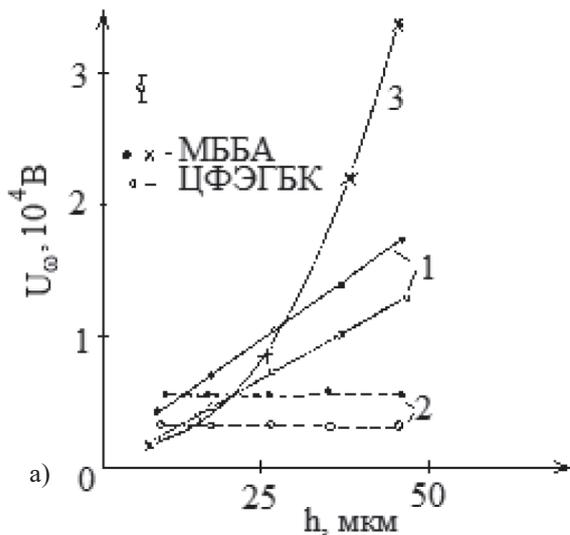
ностной поляризации из-за действия звукового поля.

Рассмотрим механизм возникновения пьезоэлектрического отражения, индуцируемого поверхностной поляризацией. Согласно решению уравнения (1), вследствие механической деформации тонкого ЖК-слоя в его объеме имеет место распространение вязкоупругой волны с волновым спектром  $q_1$  и вязкой волны с  $q_{2,3}$  ( $q_1 \gg q_{2,3}$ ). При малых амплитудах воздействия существует решение, когда угол на границах равен нулю:  $\theta_d|_{z=0, z=h} = 0$ . Но в работе [20] показано, если на границе имеется постоянный угол наклона  $\theta_c^s$ , который может появиться вследствие нелинейных процессов, наблюдаемых при взаимодействии ориентационного поля директора с акустическим полем, то в этом случае на границе ЖК угол  $\theta_c^s$  является функцией времени  $t$ .

Пусть на границе  $\theta_c^s \neq 0$ . Если учесть соотношение упругих моментов на поверхности  $kq_1 \gg kq_{2,3}$ , то на одной из границ, являющейся источником быстро затухающей вязкоупругой волны, для угла отклонения [19–21]:  $W(\theta - \theta_o^s) + k \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$ ,

отсюда  $\theta \cong \frac{W\theta_o^s}{W + ikq_1}$  и т.к.  $kq_1 \gg W$ , то окончательно для угла  $\theta_c^s$  получим:

$$\theta_d^s = \theta_o^s \frac{W}{kq_1}. \tag{7}$$



**Рисунок 7.** а) Зависимости первой  $U_{1\omega}$  и второй  $U_{2\omega}$  гармоник от толщины ЖК-слоя: 1 —  $U_{1\omega}$ , 2 —  $U_{2\omega}$  ( $T_N$  МББА = 25 °С,  $T_N$  ЦФЭГБК = 48 °С) — случай деформации одной из поверхностей, 3 (МББА) — при деформации обеих поверхностей, как показано на (б); б) 1, 2, 3 — последовательные состояния ЖК-ячейки через четверть периода

Когда граничные условия слабые, то для них характерны величины  $W \approx 10^{-3} \div 10^{-4}$  эрг/см<sup>2</sup>,  $kq_1 \sim 10^{-1} \div 10^{-2}$  эрг/см<sup>2</sup>, в этом случае угол девиации директора на поверхности принимает значения  $10^{-1} \div 10^{-2}$ .

Теперь проведем анализ экспериментальных результатов согласно предложенной модели. Рассмотрим амплитудную зависимость второй гармоники (рисунок 2, б). Возникновение второй гармоники наблюдается при определенном пороговом значении амплитуды  $a_n$ , в это же время появляется стационарный наклон директора  $\bar{\theta}_c$  относительно нормали к ячейке (рисунок 5), это приведет к искажению ориентации на границе  $\theta_c^s$  — это угол, сравнимый по величине с  $\bar{\theta}_c$  ( $\bar{\theta}_c$  наблюдается при слабых граничных условиях в объеме [21]). Появление угла  $\theta_c^s$  приводит к возникновению ориентационной неустойчивости на поверхности кристалла и, следовательно, к возрастанию значения второй гармоники, для нее можно записать выражение:

$$U_{2\omega} = \int_0^h (P^s(z)(\vec{n})) [(\bar{\theta}_d^s)^2] dz \cong \cong P^s \delta (\bar{\theta}_d^s)^2 \cos \theta_o^s = U_\delta \cos \theta_o^s (\bar{\theta}_d^s)^2,$$

здесь  $P^s$  — поверхностная поляризация,  $U_\delta = P^s \delta$  — падение напряжения на поверхности слоя жидкого кристалла.

Учитывая, что  $(\theta_o^s)^2 \sim (\bar{\theta}_c)^2$  и пропорционален амплитуде воздействия  $a$  (рисунок б), т.е.  $(\bar{\theta}_c)^2 \sim ba$ , получаем амплитудную зависимость  $U_{2\omega}$ :

$$U_{2\omega} \sim U_\delta a (1 - ba).$$

При малых амплитудах воздействия вторая гармоника  $U_{2\omega}$  имеет линейный вид, при возрастании амплитуды стремится к насыщению, это хорошо согласуется с результатами эксперимента (рисунок 5, б).

### Список литературы

1. Желудев И.С. Физика кристаллических диэлектриков. М.: Наука, 1968. 461 с.
2. Meyer R.V. Piezoelectric Effects in Liquid Crystals // Phys. Rev. Lett. 1969. Т. 22(18). Р. 918–921.
3. Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977. 377 с.

Для планарной ориентации молекул выражение (7) дает нулевое значение второй гармоники  $U_{2\omega}$ , этот факт также подтверждается на практике. В данном случае, как было продемонстрировано в работе [22], поверхностная поляризация не образуется. Необходимо отметить, что существенным фактом в пользу модели поверхностной поляризации являются зависимости второй гармоники от толщины ЖК-слоя  $U_{2\omega}(h)$  (рисунок 7, а), полученные при деформации изгиба всей ячейки целиком (рисунок 7, б), как было показано Де Женом в [3]. Для случая гомеотропной ориентации молекул ЖК зависимость разности потенциалов на частоте возбуждения от толщины слоя  $h$  можно описать эмпирическим выражением:  $U_{1\omega} = A(ah + bh^2)$ .

Здесь линейное слагаемое отвечает за флексоэлектрическую составляющую в механизме появления поляризации. Квадратичное слагаемое характеризует возникновение зарядов  $Q$ , индуцированных поверхностной поляризацией  $Q \sim |P^s| \Delta s$ , здесь  $\Delta s = s_2 - s_1$  — приращение площади, ограничивающей поверхность ячейки с ЖК (элемент шарового слоя), относительно равновесного состояния  $s_2 = s_1$ , приращение площади  $\Delta s \sim h^2$ , а т.к. возмущение симметрично, то наблюдаемая разность потенциалов будет регистрироваться на частоте возмущения  $\omega$ .

### Выводы

Резюмируя изложенное выше, делаем вывод: в тонких слоях жидких кристаллов с однородной ориентацией молекул имеют место два не зависящих друг от друга механизма ориентационной поляризации молекул — флексоэлектрической поляризации и модуляции слоя поверхностной поляризации.

4. Скалдин О.А., Баймакова О.А., Чувывров А.Н. Эффект памяти в жидкокристаллических слоях нематического типа // Письма в Журнал технической физики. 1994. Т. 20, № 24. С. 87–90.
5. Баймакова О.А., Скалдин О.А., Чувывров А.Н. Генерация ориентационных волн в нематических жидких кристаллах под дей-

ствием сдвигового импульса // Кристаллография. 1999. Т. 44, № 3. С. 544–547.

6. Чувывров А.Н., Денисова О.А. Волнообразная неустойчивость смектических жидких кристаллов типа «С» в электрических полях // Письма в Журнал технической физики. 2001. Т. 27, № 22. С. 89–94.

7. Денисова О.А., Чувывров А.Н. Релаксация директора при азимутальной неустойчивости жидких кристаллов // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2012. № 1. С. 52–58.

8. Денисова О.А., Чувывров А.Н. Возможный механизм возникновения эффекта азимутальной неустойчивости жидких кристаллов // Челябинский физико-математический журнал. 2011. № 15. С. 42–44.

9. Денисова О.А., Чувывров А.Н. Эффекты электрогидродинамической неустойчивости в смектических жидких кристаллах типа С // Кристаллография. 2013. Т. 58, № 2. С. 307–310.

10. Денисова О.А. Пьезоэлектрический эффект в жидких кристаллах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9, № 4. С. 145–153.

11. Денисова О.А., Скалдин О.А. Прямой флексоэффект в нематике в окрестности фазового перехода // Письма о материалах. 2016. Т. 6, № 3 (23). С. 168–172.

12. Денисова О.А. Один из методов экспериментальных исследований жидких кристаллов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9, № 2. С. 107–113.

13. Денисова О.А. Распространение ультразвуковых волн в твист-структурах жидких кристаллов // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2011. Вып. 2. С. 62–65.

14. Денисова О.А., Чувывров А.Н. Резонансное изменение скорости поперечных акустических волн в твист-структурах жидких кристаллов // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2011. Вып. 3(37). С. 25–29.

15. Денисова О.А. Флексополяризация вблизи фазового перехода нематическая мезофаза — изотропная жидкость // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2017. Т. 17, № 2. С. 14–20.

16. Капустин А.Н., Капустина О.А. Акустика жидких кристаллов. М.: Наука, 1986. 247 с.

17. Deuling H.J. On the Method to Measure the Flexo-Electric Coefficients of Nematic Liquid Crystals // Sol. State Comm. 1974. Vol. 14. P. 1074.

18. Чабан И.А. Виброгидродинамическая неустойчивость жидких кристаллов // Акустический журнал. 1978. Т. 24. Вып. 2. С. 260–271.

19. Чувывров А.Н., Лачинов А.Н. Исследование спонтанной поверхностной поляризации методами пьезо-, магнито- и пироэлектротражения света // Кристаллография. 1980. Т. 26, Вып. 4. С. 795–805.

20. Решетов В.Н. Акустически-индуцируемые ориентационные явления в нематических жидких кристаллах: автореф. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1986. 28 с.

21. Пикин С.А. Структурные превращения в жидких кристаллах. М.: Наука, 1981. 336 с.

22. Лачинов А.Н., Чувывров А.Н. Исследование поверхностной поляризации нематических жидких кристаллов методом электроотражения в системе жидкий кристалл — полупроводник // Поверхность. Физика, химия, механика. 1986. Т. 5. С. 74–79.

## References

1. Zeludev I.S. *The Physics of Crystalline Dielectrics*. Moscow, Nauka Publ., 1968, 461 p. [in Russian].

2. Meyer R.B. Piezoelectric Effects in Liquid Crystals. *Phys. Rev. Lett.*, 1969, Vol. 22 (18), pp. 918–921. [in Russian].

3. De Zen P. *Physics of Liquid Crystals*. Moscow, Mir Publ., 1977. 377 p. [in Russian].

4. Skaldin O.A., Baimakova O.A., Chuvyrov A.N. The Memory Effect in Liquid-Crystal Layers of a Nematic Type. *Letters to the Journal of Technical Physics*, 1994, Vol. 20, No. 24, pp. 87–90. [in Russian].

5. Baimakova O.A., Skaldin O.A., Chuvyrov A.N. Generation of Orientational Waves in Nematic Liquid Crystals under the Action of a Shear Pulse. *Crystallography*, 1999, Vol. 44, No. 3, pp. 544–547. [in Russian].

6. Chuvyrov A.N., Denisova O.A. Wave-Like Instability of Smectic Liquid Crystals of the «C» Type in Electric Fields. *Letters to the Journal of Technical Physics*, 2001, Vol. 27, No. 22, pp. 89–94. [in Russian].
7. Denisova O.A., Chuvyrov A.N. Relaxation of the Director under the Azimuthal Instability of Liquid Crystals. *Liquid Crystals and Their Practical Use*, 2012, No. 1, pp. 52–58. [in Russian].
8. Denisova O.A., Chuvyrov A.N. Possible Mechanism for the Appearance of the Azimuthal Instability of Liquid Crystals. *Chelyabinsk Physics and Mathematics Journal*, 2011, No. 15, pp. 42–44. [in Russian].
9. Denisova O.A., Chuvyrov A.N. Effects of Electrohydrodynamic Instability in Smectic Liquid Crystals of Type C. *Crystallography*, 2013, Vol. 58, No. 2, pp. 307–310. [in Russian].
10. Denisova O.A. Piezoelectric Effect in Liquid Crystals. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2013, Vol. 9, No. 4, pp. 145–153. [in Russian].
11. Denisova O.A., Skaldin O.A. Direct Flexo Effect in Nematic in the Vicinity of a Phase Transition. *Materials Letters*, 2016, Vol. 6, No. 3 (23), pp. 168–172. [in Russian].
12. Denisova O.A. One of the Methods of Experimental Research Liquid Crystals. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2013, Vol. 9, No. 2, pp. 107–113. [in Russian].
13. Denisova O.A. Propagation of Ultrasonic Waves in Twist Structures of Liquid Crystals. *Liquid Crystals and Their Practical Use*, 2011, Vol. 2, pp. 62–65. [in Russian].
14. Denisova O.A., Chuvyrov A.N. Resonant Change in the Velocity of Transverse Acoustic Waves in Twist Structures of Liquid Crystals. *Liquid Crystals and Their Practical Use*, 2011, Vol. 3 (37), pp. 25–29. [in Russian].
15. Denisova O.A. Flexopolarization Near the Phase Transition Nematic Mesophase — Isotropic Liquid. *Liquid Crystals and Their Practical Use*, 2017, Vol. 17, No. 2, pp. 14–20. [in Russian].
16. Kapustin A.N., Kapustina O.A. *Acoustics of Liquid Crystals*. Moscow, Nauka Publ., 1986. 247 p. [in Russian].
17. Deuling H.J. *On the Method to Measure the Flexo-Elektric Coefficients of Nematic Liquid Crystals*. Sol. State Comm., 1974, Vol. 14, pp. 1074.
18. Chaban I.A. Vibrohydrodynamic Instability of Liquid Crystals. *Acoustic Journal*, 1978, Vol. 24, Issue 2, pp. 260–271. [in Russian].
19. Chuvyrov A.N., Lachinov A.N. Investigation of Spontaneous Surface Polarization by Piezo-, Magneto-, and Pyroelectrodeflection of Light Methods. *Crystallography*, 1980, Vol. 26, Issue 4, pp. 795–805. [in Russian].
20. Reshetov V.N. *Acoustically-Induced Orientation Phenomena in Nematic Liquid Crystals: Avtoref. Cand. Phys.-Math. Sci. Moscow*, 1986. 28 p. [in Russian].
21. Pikin S.A. *Structural Transformations in Liquid Crystals*. Moscow, Nauka Publ., 1981. 336 p. [in Russian].
22. Lachinov A.N., Chuvyrov A.N. Investigation of Surface Polarization of Nematic Liquid Crystals by the Method of Electroreflection in a Liquid Crystal-Semiconductor System. *Surface. Physics, Chemistry, Mechanics*, 1986, Vol. 5, pp. 74–79. [in Russian].



**Шарипов Т. И.**  
**Sharipov T. I.**

кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры «Физическая  
электроника и нанофизика»,  
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный  
университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация



**Акбутин Г. Д.**  
**Akbutin G. D.**

магистрант кафедры  
физической электроники и нанофизики,  
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный  
университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация



**Доломатов М. Ю.**  
**Dolomatov M. Yu.**

доктор химических наук, профессор,  
профессор кафедры «Технология  
нефти и газа», ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет»,  
профессор кафедры «Физическая  
электроника и нанофизика»,  
ФГБОУ ВО «Башкирский  
государственный университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация



**Бахтизин Р. З.**  
**Bakhtizin R. Z.**

доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
«Физическая электроника и нанофизика»,  
ФГБОУ ВО «Башкирский  
государственный университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация

УДК 53.087.22

## ОСОБЕННОСТИ НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ АСФАЛЬТЕНОВ, ВЫДЕЛЕННЫХ ИЗ ОСТАТКОВ ТЕРМОКРЕКИНГА

Статья посвящена актуальной на сегодняшний день проблеме исследования надмолекулярной структуры нефтяных асфальтенов. Они являются перспективными конструкционными материалами для молекулярной электроники и нанотехнологий. На данный момент свойства асфальтенов на надмолекулярном уровне изучаются различными физическими, физико-химическими методами и методами математического моделирования.

Цели работы — исследование надмолекулярной структуры асфальтенов методом атомно-силовой микроскопии, сравнение экспериментальных данных с расчетами компьютерного моделирования, визуализация с высоким разрешением кристаллитов асфальтенов.

Объекты исследования — асфальтены, выделенные из остатка термокрекинга. С помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) в условиях атмосферного воздуха были исследованы два образца. Под образцом понимается тонкая пленка асфальтенов, нанесенная на слюдяную подложку методом Ленгмюра-Блоджетт. В результате проведенных исследований получены АСМ-изображения, на которых наблюдается топография мономолекулярного слоя асфальтенов. Отчетливо видны отдельные объекты дискообразной формы — кристаллиты, полученные в результате ассоциации отдельных молекул асфальтенов. Кроме того, выполнен расчет некоторых структурных параметров.

**Ключевые слова:** асфальтены, атомно-силовая микроскопия, образец, подложка, молекула, кристаллиты, структура, метод Ленгмюра-Блоджетт, профиль сечения.

## FEATURES OF THE SUPRAMOLECULAR STRUCTURES OF ASPHALTENES ISOLATED FROM THERMAL CRACKING RESIDUES

The article is devoted to the actual problem of studying the supramolecular structure of oil asphaltenes. They are the prospective structural materials for molecular electronics and nanotechnology. At present, the properties of asphaltenes at the supramolecular level are studied by various physical, physicochemical methods and methods of mathematical modeling.

The aim of the work is research of asphaltenes supramolecular structure by atomic force microscopy (AFM), comparison of experimental data with the calculations of computer simulation, and high resolution visualization of asphaltene crystallites.

Two samples were investigated in air atmosphere using an atomic force microscope. A sample is a thin film of asphaltenes deposited on a mica substrate by Langmuir-Blodgett method. As a result of the performed research, AFM images were obtained, on which we can see the topography of asphaltenes monomolecular layer. Separate objects of disc-shaped form — crystallites obtained as a result of the association of individual molecules of asphaltenes are clearly visible. In addition, some structural parameters are calculated.

**Key words:** asphaltenes, atomic force microscopy, sample, substrate, molecule, crystallites, structure, Langmuir-Blodgett method, cross-section profile.

В последнее время большое внимание уделяется работам, в которых в качестве материалов для электроники используют органические вещества. Это связано с уникальными свойствами элементов органической электроники, которые проявляют полупроводниковые и даже металлические свойства, и размеры этих элементов могут быть сопоставимы с размерами органической молекулы [1–4]. Перспективными конструкционными материалами в молекулярной электронике являются асфальтены. Известно, что асфальтены в нефтяных дисперсных системах находятся в виде надмолекулярных структур размерами от 1 до 1000 нм, что позволяет рассматривать асфальтены в качестве перспективного объекта нанотехнологий. На данный момент свойства асфальтенов на надмолекулярном уровне изучаются различными физическими, физико-химическими методами и методами математического моделирования [5–9].

Асфальтены — высокомолекулярный компонент нефти, состоящий на 90–95 % из углеводорода. В молекулу асфальтена, кроме углерода, водорода, кислорода и азота, входит и сера [10]. Было проведено большое количество экспериментов по определению структуры и свойств асфальтенов. Асфальтены имеют повышенную склонность к ассоциации и образованию жидкокристаллических или надмолекулярных структур. В 1961 году Т. Йен предложил так называемую пачечную модель строения асфальтенов типа «plate to plate» [11]. На сегодняшний день общепризнаны две модели агрегации асфальтенов — модели «континентального» типа и структуры типа «архипелаг» [12, 13]. Для асфальтенов, выделенных из остатка термокрекинга, структура типа «архипелаг» маловероятна, так как в процессе крекинга разрушаются химические связи, связывающие полициклические фрагменты молекулы. Возникает вопрос: учитывая склонность

полициклических молекул к ассоциации, важным вопросом является выяснение степени ассоциации молекул в растворе. Также асфальтены были исследованы методами масс-спектрометрии и полевой ионизации [14], масс-спектрометрии с фотоионизацией [15], методом масс-спектрометрии лазерной десорбции [16]. С применением физических методов установлены концентрации, при которых происходят изменения структуры асфальтенов в растворе [17, 18].

Шнейдером, Эндрюсом и др. [19] с применением метода флуоресцентной корреляционной спектроскопии установлено, что растворы нефтяных асфальтенов в толуоле при концентрации до  $10^{-4}$  мас. (0,1 г/л) проявляют себя как истинные растворы. Маллинсом, Эндрюсом и др. [20], а также Фридом [21] установлено, что с ростом концентрации свыше  $10^{-4}$  мас. образуются устойчивые наноагрегаты из 8–10 молекул. При массовой доле больше  $5 \cdot 10^{-3}$  мас. (5 г/л) происходит дальнейшее образование кластеров из наноагрегатов. При концентрации свыше  $5 \cdot 10^{-2}$  мас. (50 г/л) формируется гелеподобная сетка. Таким образом, по мере концентрирования раствора степень ассоциации молекул возрастает, что важно учитывать в условиях микроскопии.

Целями данной работы являются исследование надмолекулярной структуры асфальтенов методом атомно-силовой микроскопии, сравнение экспериментальных данных с расчетами компьютерного моделирования, визуализация с высоким разрешением кластеров асфальтенов.

В качестве объектов исследования использовались асфальтены, выделенные из остатка термокрекинга по элюэнтному способу И.Р. Хайрутдинова на аппарате Сокслета. Среднечисловая молярная масса асфальтенов по данным оптической спектроскопии равна 1200 а.е.м. Концентрация раствора для приготовления пленок составляет 0,1 г/л. В этих условиях следует ожидать слабую ассоциацию молекул в растворе.

Подложкой была выбрана слюда благодаря тому, что она имеет атомарно гладкую поверхность. Визуализация с высоким разрешением, получение топографии поверхно-

сти и расчет структурных параметров молекул асфальтенов осуществлялись методами атомно-силовой микроскопии на воздухе с помощью сканирующего зондового микроскопа Ntegra (компания NT-MDT, Россия). Реально контролируемая разрешающая способность микроскопа в плоскости XY равна 2 нм, по оси Z — 0,118 нм. Сканирование образца проводилось кантилеверами HA\_NC (компания TipsNano, Россия), которые имеют радиус закругления острия равный 10 нм, угол схождения острия равный  $30^\circ$  и жесткость равную 12 Н/м. Согласно закону Гука, чем с меньшей силой кантилевер воздействует на молекулу, тем меньше она деформируется и получаемое АСМ-изображение является более реалистичным. Преимущество АСМ заключается в возможности получения реального рельефа поверхности образца. При правильно выбранных концентрации раствора, условиях окружающей среды и режиме работы микроскопа можно визуализировать отдельную молекулу асфальтена.

Первоначальной задачей ставился подбор оптимальной концентрации асфальтенов в толуоле — рабочего раствора для последующего приготовления образцов, пригодных к АСМ-исследованиям. Теоретически рассчитав соотношение массы асфальтена в объеме толуола, приготавливались рабочие растворы с концентрацией 0,1 г/л. Для получения мономолекулярной пленки асфальтена использовался метод Ленгмюра-Блоджетт. Этот метод отличается простотой, не требует создания вакуума, высоких давлений либо высоких температур. Испробовав каждый из четырех стандартных методов Ленгмюра-Блоджетт, мы использовали вертикальное вытягивание вверх слюдяной подложки сквозь пленку, при котором у нас получались наиболее качественные АСМ-изображения. Нанесенная на подложку тонкая пленка асфальтена высушивалась в чашке Петри в течение 60 мин при температуре  $24^\circ\text{C}$ . Готовый образец исследовался в полуконтактном режиме атомно-силового микроскопа.

Были просканированы два образца, приготовленные по одному методу. Как результат исследований на АСМ-изображениях (на рисунке 1 — образец 1 и на рисунке 3 —

образец 2) приведена топография мономолекулярного слоя асфальтенов. На них видны отдельные объекты дискообразной формы.

Для детального анализа выполняли сечения вдоль линий, показанных на рисунках 1 и 2. Каждое сечение выполнено по трем отдельным объектам. По первому профилю сечения (рисунок 2) можно подсчитать, что первый объект имеет высоту 1,3 нм, ширину 30 нм. Высота второго объекта равна 1,35 нм, ширина 30 нм. Третий объект имеет высоту 1,2 нм и ширину 30 нм.

По второму профилю сечения (рисунок 4) можно подсчитать, что первый объект имеет высоту 1,5 нм, ширину 30 нм. Высота второго объекта равна 1,25 нм, ширина 40 нм. Третий объект имеет высоту 1,2 нм и ширину 35 нм.

Таким образом, результаты АСМ исследований свидетельствуют о дискообразных структурах, построенных из ассоциатов молекул асфальтенов. Проанализировав и сравнив размеры объектов и их расположение на

поверхности с результатами работ других исследователей [20, 21], мы пришли к выводу, что отдельные объекты дискообразной формы являются кластерами асфальтенов, и их размещение на поверхности в наноагрегатном состоянии можно описать моделью агрегации дискообразного типа. При сравнении результатов наших экспериментов с результатами исследований и моделирования Эсе и др. [22] и Коржова и др. [23], можно предположить, что исследованные нами кластеры имеют дискообразную структуру и являются структурами, аналогичными дискообразным жидким кристаллам.

Согласно результатам ранее выполненных работ по моделированию молекул асфальтенов, высота одной молекулы приблизительно равна 0,1 нм, а длина — около 1 нм [24]. Следовательно, зная высоту и длину одной молекулы, можно подсчитать некоторые параметры, которые для наглядности представлены в таблице 1.

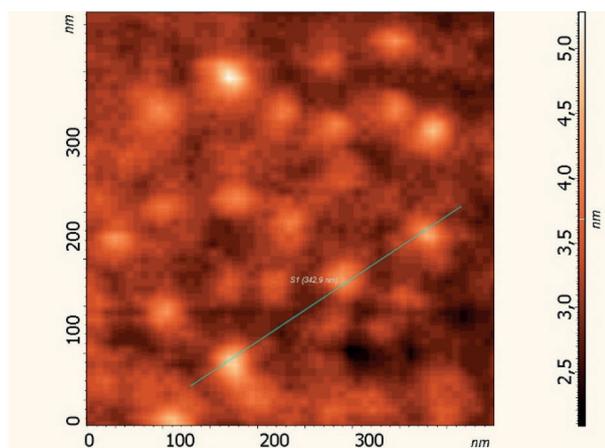


Рисунок 1. АСМ-изображение пленки асфальтенов

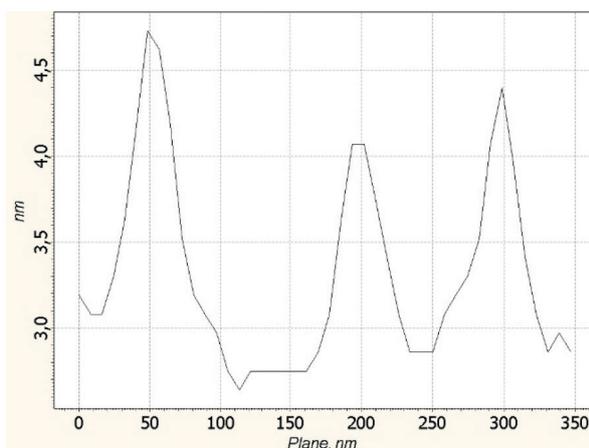


Рисунок 2. Профиль сечения, выполненного по линии, проведенной на рисунке 1

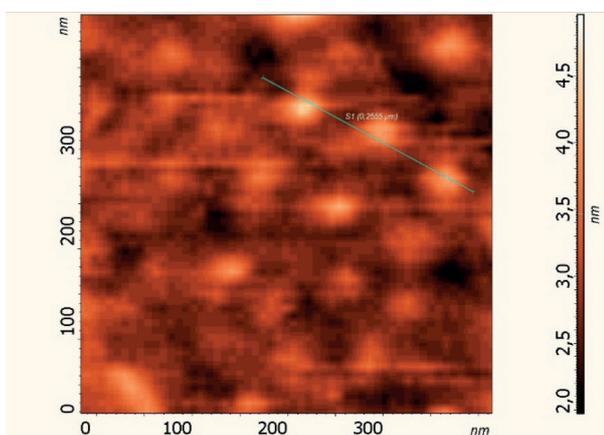


Рисунок 3. АСМ-изображение пленки асфальтенов

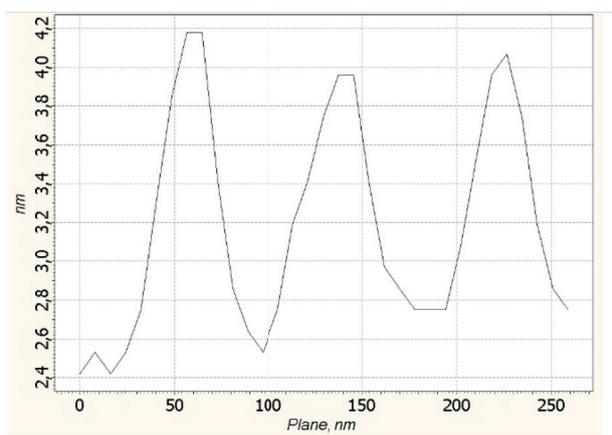


Рисунок 4. Профиль сечения, выполненного по линии, проведенной на рисунке 3.

**Таблица 1.** Структурные характеристики образцов 1 и 2

Структурные характеристики	Образец 1	Образец 2
Средняя высота кристаллита, нм	1,53	1,31
Средняя ширина кристаллита, нм	33,3	35
Межслоевое расстояние*, нм	0,35	0,35
Среднее число слоев в кристаллите, шт.	4	4
Среднее число молекул в слое, шт.	76	81
Среднее число молекул в кристаллите, шт.	304	324
Молярная масса, а.е.м.	364800	388800
Примечание. * — рассчитано методом моделирования.		

Из анализа данных таблицы 1 следует, что параметры кристаллитов в образце 1 и в образце 2 имеют примерно одинаковые количественные значения.

### Выводы

Результаты интерпретации АСМ исследований свидетельствуют о существовании надмолекулярных структур дискотического типа образованных ассоциированными молекулами асфальтенов. Нами установлено, что отдельные объекты дискообразной формы представляют собой кристаллиты асфальтенов, и их размещение на поверхности подложки можно описать моделью агрегации дискообразного типа. Среднее число молекулярных структур в кристаллите 304–324.

### Список литературы

1. Рамбиди Н.Г. Нанотехнологии и молекулярные компьютеры. М.: Физматлит, 2007. 256 с.
2. Ratner M. A Brief History of Molecular Electronics // Nature Nanotechnology. 2013. No. 8. P. 378–381.
3. Sharipov T.I., Bakhtizin R.Z. The Estimation of Quantitative Parameters of Oligonucleotides Immobilization on Mica Surface // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. No. 195. 012002.
4. Акбутин Г.Д., Шарипов Т.И. Исследование электропроводности олигонуклеотидов // Scanning Probe Microscopy: Тез. докл. Междунар. конф. (Екатеринбург, 28–30 августа 2017 г.). Екатеринбург: Уральский Федеральный университет, 2017. С. 214.
5. Унгер Ф.Г., Андреева Л.Н. Фундаментальные аспекты химии нефти. Природа смол и асфальтенов / Институт химии нефти Сибирского отделения РАН. Новосибирск:

Среднее число слоев в кристаллите равно 4. В пределах каждого слоя находятся 76–81 молекула. Была найдена молярная масса кристаллита асфальтена. Она составляет 364800–388800 а.е.м. Полученные результаты соответствуют данным исследований, выполненных другими физическими методами.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-42-020616 и проекта № АР05132165 «Разработка технологии получения асфальтенов из нефтяного сырья в качестве органических полупроводников для нанoeлектроники» Республики Казахстан.*

Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. 192 с.

6. Ганеева Ю.М., Юсупова Т.Н., Романов Г.В. Асфальтеновые наноагрегаты: структура, фазовые превращения, влияние на свойства нефтяных систем // Успехи химии. 2011. Т. 80. No 10. С. 1034–1050.
7. Шуткова С.А., Доломатов М.Ю., Бахтизин Р.З., Телин А.Г., Шуляковская Д.О., Харисов Б.Р., Дезорцев С.В. Исследование надмолекулярной структуры наночастиц нефтяных асфальтенов // Башкирский химический журнал. 2012. Т. 19. № 4. С. 220.
8. Шарипов Т.И., Доломатов М.Ю., Бахтизин Р.З. Исследование молекул смолоасфальтеновых веществ методами атомно-силовой микроскопии // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тез. докл. XII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2017. С. 316–317.
9. Бахтизин Р.З., Шарипов Т.И., Нурахметов Т.Н., Кутербеков К.А., Салиходжа Ж.М., Доломатов М.Ю., Кайнарбай А.Ж. Атомно-

силовая микроскопия молекул смоло-асфальтеновых веществ // *Физика*. 2017. № 1. С. 79–84.

10. Сергиенко С.Р., Таимова Б.А., Талаев Е.И. Высокомолекулярные неуглеводородные соединения нефти. М.: Наука 1979. 17 с.

11. Yen T.F., Erdman J.G., Pollack S.S. Investigation of the Structure of Petroleum Asphaltene by X-Ray Diffraction // *Analytical Chemistry*. 1961. No. 33, Issue 11. P. 1587–1594.

12. Sabbah H., Morrow A.L., Pomerantz A.E., Zare R.N. Evidence for Island Structures as the Dominant Architecture of Asphaltenes // *Energy Fuels*. 2011. Vol. 25. No. 4. P. 1597–1604.

13. Dmitriev D.E., Golovko A.K. Modeling the Molecular Structure of Petroleum Resins and Asphaltenes and Their Thermodynamic Stability Calculations // *Chemistry for Sustainable Development*. 2010. No. 18. P. 171–180.

14. Boduszynski M.W. Asphaltenes in Petroleum Asphalts: Composition and Formation' in Bunger 3W and Li NC (eds) // *Chemistry of Asphaltenes*. Washington, DC: American Chemical Society. 1981. P. 119–135.

15. <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-struktury-nanochastits-neftyanyh-asfaltenov>.

16. Merdrignac I., Desmazières B., Terrier P., Delobel A., Laprèvote O. Analysis of Raw and Hydrotreated Asphaltenes Using Off-Line and On-Line SEC/MS Coupling // Presented at the International Conference on Heavy Organics Deposition, Los Cabos, Baja California, Mexico, November 14–19, 2004. P. 265.

17. Hortal A.R., Martínez-Haya B., Lobato M.D., Pedrosa J.M., Lago S. On the Determination of Molecular Weight Distributions of Asphaltenes and Their Aggregates in Laser Desorption Ionization Experiments // *Journal of Mass Spectrometry*. 2006. Vol. 41, No. 7, pp. 960–968.

18. Andreatta G., Bostrom N., Mullins O.C. Ultrasonic Spectroscopy of Asphaltene Aggregation // *Asphaltenes, Heavy Oils, and Petroleomics*. 2007. 2. P. 231–258.

19. Schneider M., Andrews B., Mitra-Kirtley S., Mullins D. Asphaltene Molecular Size by Fluorescence Correlation Spectroscopy // *Energy & Fuels*. 2007. Vol. 21, No. 5. P. 2375–2832.

20. Mullins O., Betancourt S., Cribbs M., Creek J., Dubost F., Andrews A., Venkatarmanan L. The Colloidal Structure of Crude Oil and the Structure of Oil Reservoirs // *Energy & Fuels*. 2007. Vol. 21, No. 5. P. 2785–2794.

21. Freed D., Lisitza N., Sen P., Song Y-Q. Molecular Composition and Dynamics of Oils from Diffusion Measurements // *Asphaltenes, Heavy Oils, and Petroleomics*. 2007. P. 279–299.

22. Eise M.-H., Sjoblom J., Djuve J., Pugh R. An Atomic Force Microscopy Study of Asphaltenes on Mica Surfaces // *Colloid Polym Sci*. 2000. Vol. 278. No 6. P. 532–538.

23. Коржов Ю.В., Орлов С.А. Агрегирование и коагуляция асфальтенов в пленке нефти: физические характеристики продуктов поверхностных отложений // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2016. Т. 327. № 12. С. 62–74.

24. Доломатов М.Ю., Шуткова С.А., Дезорцев С.В. Структурно-химические характеристики модельных молекулярных фрагментов нефтяных асфальтенов // *Нефтехимия*. 2012. Т. 52. № 4. С. 299–303.

## References

1. Rambidi N.G. *Nanotechnology and Molecular Computers*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 256 p.

2. Ratner M. A Brief History of Molecular Electronics. *Nature Nanotechnology*, 2013, No. 8, pp. 378–381.

3. Sharipov T.I., Bakhtizin R.Z. The Estimation of Quantitative Parameters of Oligonucleotides Immobilization on Mica Surface. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, No. 195, 012002. [in Russian].

4. Akbutin G.D., Sharipov T.I. Investigation of the Electrical Conductivity of Oligonucleotides. Scanning Probe Microscopy. Abstract Book of International Conference (Ekaterinburg, August 28–30, 2017). Ekaterinburg, Ural Federal University, 2017, p. 214. [in Russian].

5. Unger F.G., Andreeva L.N. *Fundamental Aspects of Petroleum Chemistry. Nature of Resins and Asphaltenes* (Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences). Novosibirsk, Nauka. Sibirskaja izdatel'skaja firma RAN, 1995. 192 p. [in Russian].

6. Ganeeva Ju.M., Jusupova T.N., Romanov G.V. Asphaltene Nano-Aggregates: Structure, Phase Transitions and Effect on Petroleum Systems. *Russian Chemical Reviews*, 2011, Vol. 80, No. 10, pp. 1034–1050. [in Russian].
7. Shutkova S.A., Dolomatov M.Ju., Bah-tizin R.Z., Telin A.G., Shuljakovskaja D.O., Harisov B.R., Dezorcev S.V. Investigation of Supramolecular Structure of Oil Asphaltenes Nanoparticles. *Bashkir Chemical Journal*, 2012, Vol. 19, No. 4, pp. 220. [in Russian].
8. Sharipov T.I., Dolomatov M.Ju., Bah-tizin R.Z. Investigation of Molecules of Resin-Asphaltene Substances Using Atomic Force Microscopy. *Abstracts of Articles of XII All-Russian Conference of Young Scientists «Nanoelectronics, Nanophotonics and Nonlinear Physics»*. Saratov, Tehno-Dekor Publ., 2017, pp. 316–317. [in Russian].
9. Bahtizin R.Z., Sharipov T.I., Nurahmetov T.N., Kuterbekov K.A., Salihodzha Zh.M., Dolomatov M.Ju., Kajnarbaj A.Zh. Atomic Force Microscopy of Molecules of Resin-Asphaltene Substances. *Physics*, 2017, No. 1, pp. 79–84. [in Russian].
10. Sergienko S.R., Taimova B.A., Talaev E.I. *High-Molecular Non-Hydrocarbon Compounds of Oil*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 17 p. [in Russian].
11. Yen T.F., Erdman J.G., Pollack S.S. Investigation of the Structure of Petroleum Asphaltenes by X-Ray Diffraction. *Analytical Chemistry*, 1961, No. 33, Issue 11, pp. 1587–1594.
12. Sabbah H., Morrow A.L., Pomerantz A.E., Zare R.N. Evidence for Island Structures as the Dominant Architecture of Asphaltenes. *Energy Fuels*, 2011, Vol. 25, No.4, pp.1597–1604.
13. Dmitriev D.E., Golovko A.K. Modeling the Molecular Structure of Petroleum Resins and Asphaltenes and Their Thermodynamic Stability Calculations. *Chemistry for Sustainable Development*, 2010, No. 18, pp. 171–180.
14. Boduszynski M.W. Asphaltenes in Petroleum Asphalts: Composition and Formation' in Bunger 3W and Li NC (eds). *Chemistry of Asphaltenes*, Washington, DC: American Chemical Society, 1981, pp. 119–135.
15. <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-struktury-nanochastits-neftyanyh-asfaltenov>.
16. Merdrignac I., Desmazières B., Terrier P., Delobel A., Laprévotte O. Analysis of Raw and Hydrotreated Asphaltenes Using Off-Line and On-Line SEC/MS Coupling. *International Conference on Heavy Organics Deposition*, Los Cabos, Baja California, Mexico, November 14–19, 2004, pp. 265.
17. Hortal A.R., Martínez-Haya B., Lobato M.D., Pedrosa J.M., Lago S. On the Determination of Molecular Weight Distributions of Asphaltenes and Their Aggregates in Laser Desorption Ionization Experiments. *Journal of Mass Spectrometry*, 2006, Vol. 41, No. 7, pp. 960–968.
18. Andreatta G., Bostrom N., Mullins O.C. Ultrasonic Spectroscopy of Asphaltene Aggregation. *Asphaltenes, Heavy Oils, and Petroleomics*, 2007, 2, pp. 231–258.
19. Schneider M., Andrews B., Mitra-Kirtley S., Mullins D. Asphaltene Molecular Size by Fluorescence Correlation Spectroscopy. *Energy & Fuels*, 2007, Vol. 21, No. 5, pp. 2375–2832.
20. Mullins O., Betancourt S., Cribbs M., Creek J., Dubost F., Andrews A., Venkatarmann L. The Colloidal Structure of Crude Oil and the Structure of Oil Reservoirs. *Energy & Fuels*, 2007, Vol. 21, No. 5, pp. 2785–2794.
21. Freed D., Lisitza N., Sen P., Song Y-Q. Molecular Composition and Dynamics of Oils from Diffusion Measurements. *Asphaltenes, Heavy Oils, and Petroleomics*, 2007, P. 279–299.
22. Ese M.-H., Sjoblom J., Djuve J., Pugh R. An Atomic Force Microscopy Study of Asphaltenes on Mica Surfaces. *Colloid Polym Sci.*, 2000, Vol. 278, No. 6, pp. 532–538.
23. Korzhov Ju.V., Orlov S.A. Aggregation and Coagulation of Asphaltenes in an Oil Film: Physical Characteristics of Products of Surface Deposits. *Izvestiya of Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources*, 2016, Vol. 327, No. 12, pp. 62–74. [in Russian].
24. Dolomatov M.Ju., Shutkova S.A., Dezorcev S.V. Structural and Chemical Characteristics of Model Molecular Fragments of Petroleum Asphaltenes. *Petrochemistry*, 2012, Vol. 52, No. 4, pp. 299–303. [in Russian].

---

## ОБ АВТОРАХ

### **Акбутин Газиз Давлетбаевич**

магистрант кафедры «Физическая электроника и нанофизика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: sha-t@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Артюшенко Владимир Михайлович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и управляющие системы», Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет», e-mail: artuschenko@mail.ru, г. Королев, Российская Федерация

### **Ахметшин Рустам Ильясович**

старший преподаватель, аспирант кафедры «Основы конструирования машин и механизмов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: zelev7@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Бахтизин Рауф Загидович**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физическая электроника и нанофизика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: sha-t@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Бондарев Андрей Владимирович**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», Кумертауский филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет», e-mail: bondarevav@kfosu.edu.ru, г. Кумертау, Российская Федерация

### **Бурдыгина Екатерина Валерьевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: e.a.fedoseeva@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Виноградова Ирина Леонидовна**

доктор технических наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: vil-4@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Воловач Владимир Иванович**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет сервиса», e-mail: ssunrise@mail.ru, г. Тольятти, Российская Федерация

### **Гизатуллин Фарит Абдулганеевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: elaint@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

---

**Денисова Ольга Аркадьевна**

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Физика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: denisovaolga@bk.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Доломатов Михаил Юрьевич**

доктор химических наук, профессор, профессор кафедры «Технология нефти и газа», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», профессор кафедры «Физическая электроника и нанофизика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: dolomatov@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

**Зелев Анатолий Павлович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и сервис в технических системах», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: zelev7@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Зиятдинов Рушан Анурович**

кандидат физико-математических наук, преподаватель кафедры «Промышленная инженерия», Университет Кемён, e-mail: zelev7@mail.ru, г. Тэгю, Южная Корея

**Иванова Ольга Владимировна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Управление и сервис в технических системах», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

**Конесев Сергей Геннадьевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: KonesevSG@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Коньков Александр Николаевич**

начальник сектора Научно-конструкторского бюро моделирующих и управляющих систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», e-mail: ssirotkin1950@mail.ru, г. Таганрог, Российская Федерация

**Короткова Людмила Николаевна**

кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: olgachemist@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Марданов Альберт Ринатович**

инженер кафедры «Основы конструирования машин и механизмов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: zelev7@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

---

**Мустафаев Валех Азад оглы**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информатика», Сумгаитский государственный университет, e-mail: malaxat\_70@mail.ru, г. Сумгаит, Азербайджанская Республика

**Муфтеев Валериян Гайнизаманович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: muftejev@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Набиев Рифкат Ильшатович**

кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин и механизмов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: zelev7@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Салихов Азат Рузалинович**

студент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: e.a.fedoseeva@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Салманова Малахат Насиман кызы**

аспирант кафедры «Информатика», Сумгаитский государственный университет, e-mail: malaxat\_70@mail.ru, г. Сумгаит, Азербайджанская Республика

**Сироткин Сергей Леонидович**

кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор Научно-конструкторского бюро моделирующих и управляющих систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», e-mail: ssirotkin1950@mail.ru, г. Таганрог, Российская Федерация

**Султанов Альберт Ханович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: kleo-bai@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Талыпов Марат Артурович**

ассистент кафедры «Механика и инженерная графика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: marih999@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

**Татаринев Алексей Игоревич**

аспирант кафедры «Информационные технологии и управляющие системы», Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет», инженер, Акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной техники», г. Королев, Российская Федерация

**Уразаева Диана Филусовна**

студент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: e.a.fedoseeva@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

---

**Федосеева Евгения Александровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: e.a.fedoseeva@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Хазиева Регина Тагировна**

аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: khazievart@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Хакимьянов Марат Ильгизович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: hakimyanovmi@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

**Халиков Рауф Музагитович**

кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры «Управление и сервис в технических системах», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: olgachemist@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Шарипов Талгат Ишмухамедович**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физическая электроника и нанофизика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: sha-t@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Янтилина Лилия Зуфаровна**

аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: kleo-bai@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

---

## ABOUT THE AUTHORS

### **Akbutin Gaziz D.**

Undergraduate Student of Physical Electronics and Nanophysics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», e-mail: sha-t@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

### **Akhmetshin Rustam I.**

Senior Lecturer, Post-Graduate Student of Basics of Designing Machines and Mechanisms Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: zelev7@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Artyushenko Vladimir M.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Department «Information Technology and Control Systems», State Budgetary Educational Institution of Higher Education of Moscow Region «University of Technology», e-mail: artuschenko@mail.ru, Korolev, Russian Federation

### **Bakhtizin Rauf Z.**

Dr. Sci. Phys.-Math., Professor, Head of Physical Electronics and Nanophysics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», e-mail: sha-t@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

### **Bondarev Andrey V.**

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Head of Power Supply of Industrial Enterprises Chair, Kumertau Affiliate of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orenburg State University», e-mail: bondarevav@kfosu.edu.ru, Ufa, Russian Federation

### **Burdygina Ekaterina V.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Industrial Heat Powering Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: e.a.fedoseeva@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Denisova Olga A.**

Dr. Sci. Phys.-Math., Associate Professor, Professor of Physics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: denisovaolga@bk.ru, Ufa, Russian Federation

### **Dolomatov Mikhail Yu.**

Dr. Sci. Chem., Professor, Professor of Oil and Gas Technology Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Professor of Physical Electronics and Nanophysics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», e-mail: dolomatov@gmail.com, Ufa, Russian Federation

### **Fedoseeva Evgenia A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Industrial Heat Powering Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: e.a.fedoseeva@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Gizatullin Farit A.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Professor of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: elaint@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

### **Ivanova Olga V.**

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Management and Service in Technical Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: olgachemist@mail.ru, Ufa, Russian Federation

---

**Khakimyanov Marat I.**

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: hakimyanovmi@gmail.com, Ufa, Russian Federation

**Khalikov Rauf M.**

Cand. Sci. Chem., Associate Professor, Assistant Professor of Management and Service in Technical Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: olgachemist@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Khazieva Regina T.**

Post-Graduate Student of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: khazievart@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Konesev Sergey G.**

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: KonesevSG@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

**Konkov Aleksandr N.**

Head of Sector «Scientific Design Bureau Modeling and Control Systems», Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», e-mail: ssirotkin1950@mail.ru, Taganrog, Russian Federation

**Korotkova Lyudmila N.**

Cand. Sci. Chem., Associate Professor, Assistant Professor of Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: olgachemist@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Mardanov Albert R.**

Engineer of Basics of Designing Machines and Mechanisms Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: zelev7@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Mufteev Valeriy G.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Mechanics and Engineering Graphics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», e-mail: muftejev@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Mustafaev Valeh A.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Informatics Chair, Sumgait State University, e-mail: malaxat\_70@mail.ru, Sumgait, Azerbaijan Republic

**Nabiev Rifkat I.**

Cand. Sci. Ped., Assistant Professor of Basics of Designing Machines and Mechanisms Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: zelev7@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Salikhov Azat R.**

Student of Industrial Heat Powering Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: e.a.fedoseeva@mail.ru, Ufa, Russian Federation

---

**Salmanova Malahat N.**

Post-Graduate Student of Informatics Chair, Sumgait State University, malaxat\_70@mail.ru, Sumgait, Azerbaijan Republic

**Sharipov Talgat I.**

Cand. Sci. Phys.-Math., Assistant Professor of Physical Electronics and Nanophysics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», e-mail: sha-t@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

**Sirotkin Sergey L.**

Cand. Sci. Tech., Leading Design Engineer of Scientific Design Bureau Modeling and Control Systems, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», e-mail: ssirotkin1950@mail.ru, Taganrog, Russian Federation

**Sultanov Albert Kh.**

Dr. Sci. Tech., Prof., Head of Telecommunication Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: kleo-bai@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Talypov Marat A.**

Assistant of Mechanics and Engineering Graphics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», e-mail: marih999@gmail.com, Ufa, Russian Federation

**Tatarinov Aleksey I.**

Post-Graduate Student of Information Technology and Control Systems Chair, State Budgetary Educational Institution of Higher Education of Moscow Region «University of Technology», Engineer, Joint-Stock Company «Scientific-Production Association of Measuring Equipment», e-mail: ktifysx@mail.ru, Korolev, Russian Federation

**Urzaeva Diana F.**

Student of Industrial Heat Powering Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: e.a.fedoseeva@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Vinogradova Irina L.**

Dr. Sci. Tech., Professor of Telecommunication Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: vil-4@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Volovach Vladimir I.**

Dr. Sci. Tech., Associate Professor, Head of Department «Information and Electronic Service», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volga Region State University of Service», e-mail: ssunrise@mail.ru, Togliatti, Russian Federation

**Yantilina Liliya Z.**

Post-Graduate Student of Telecommunication Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: kleo-bai@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Zelev Anatoly P.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Management and Service in Technical Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: zelev7@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Ziatdinov Rushan A.**

Cand. Sci. Phys.-Math., Lecturer of Industrial Engineering Chair, Keimyung University, e-mail: zelev7@mail.ru, Taegu, South Korea

## 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 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: uor-ugaes@mail.ru.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельными файлами.
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 ВО «УГНТУ» 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, be new, be interesting for 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 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 of 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 color photos of the authors in separate files (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 FSBEI HE «USPTU» electronic version of his article published in the journal «Electrical and data processing facilities and systems».
10. Graphical and table 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 should be 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:

- NOT TO use the tab key (Tab);
- NOT TO place your paragraph styles (other than the defaults);
- NOT TO set automatic lists (with line numbers and paragraphs);
- NOT TO 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 hyphens and dashes. Dash is exhibited by 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.**