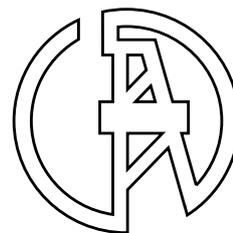


# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УГНТУ

№ 1, т. 15, 2019

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 сериальный номер ISSN 1999-5458.

## Редакционная коллегия:

### И.о. главного редактора:

Ш.З. Валиев — канд. техн. наук, д-р экон. 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. Артюшенко — д-р техн. наук, проф. ГБОУ ВО МО «Технологический университет» (г. Москва, Российская Федерация)



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



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



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



М.Ю. Долوماتов — д-р хим. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной 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)



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



Ф.Ф. Хизбуллин — д-р хим. 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)



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



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



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



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



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



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



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



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



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.ugues.ru](http://www.ugues.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, 2019.

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 19.04.2019 г. Формат 60×84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16.04

Тираж 1000 экз. Заказ № 65.

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



№ 1, v. 15, 2019

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 these 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:

Sh.Z. Valiev — Cand. Sci.Tech., Dr. Sci. Econ., 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)

### Members of an editorial board:

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



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



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



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



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



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



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



F.F. Hizbullin — Dr. Sci.Chem., 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)



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



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



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



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



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



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



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



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



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 ПИ № 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, 2019.

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 19.04.2019. Paper format 60×84/8. Offset printing. 16.04 publication base sheets.

Volume 1000 copies. Order № 65.

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

<i>Андреева Е.Г., Семина И.А.</i> 3D-моделирование электротехнических устройств с гибридной магнитной системой	5
<i>Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Уразбахтин Р.Р., Веселов А.М., Минияров А.Х.</i> Синхронный сферический электродвигатель	13
<i>Дмитриев А.А., Герасимов В.Е., Плосков А.Н.</i> Применение современных программных возможностей в процессе проектирования систем электроснабжения	20
<i>Шабанов В.А. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н.</i> Способ подхвата электропривода вентиляционных и насосных установок при обратном вращении рабочего колеса	26
<i>Линенко А.В., Сираев Ш.Ф., Азнагулов А.И., Лукьянов В.В.</i> Мехатронная система для автоматического управления машинно-тракторным агрегатом с бесколлекторным электродвигателем	33
<i>Саттаров Р.Р., Зиганшин Т.Р.</i> Анализ режима холостого хода в экранированном торцевом синхронном генераторе с высококоэрцитивными постоянными магнитами	41
<i>Копытов С.М., Ульянов А.В.</i> Контроллер для управления светодиодными осветительными сетями по линии электроснабжения	52

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Ахмеджанов Ф.М., Крымский В.Г.</i> Алгоритм оценки надежности человека-оператора на основе модифицированной методики HEART	60
<i>Муфтахов Т.И., Гиниятуллин В.М.</i> Симуляция входных данных нейронной сети на примере заболеваемости вирусным гепатитом	70
<i>Коледин С.Н., Коледина К.Ф., Губайдуллин И.М., Муллаянова А.Ф., Габитов С.А.</i> Информационная система последовательного анализа каталитических реакций математическими методами	79
<i>Осипов В.П., Посадский А.И., Сивакова Т.В., Судаков В.А.</i> Комбинированная методика нечеткого ранжирования альтернатив на основе функций предпочтений	87

## МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

<i>Тимофеев А.О., Ясовеев В.Х.</i> Беспроводной бесконтактный датчик положения штока скважинной штанговой глубиннонасосной установки	94
<i>Лихачев Е.А., Зайцева А.А.</i> Математическая модель САУ частоты вращения несущего винта вертолета	100
<i>Ярославкина Е.Е., Мельникова Д.А., Муратова В.В.</i> Автоматизированный стенд приемо-сдаточных испытаний погружных электродвигателей	106
<i>Грахов П.А., Федин А.В.</i> Устройства угловых перемещений на основе магнитострикционных пластин	112
<i>Мухамадиев А.А., Шайхутдинов И.И., Ясовеев В.Х.</i> Анализ приборной базы для проведения исследований флюидов	122
<b>Об авторах</b>	128

# CONTENT

## ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Andreeva E.G., Semina I.A.</i> 3D-modeling of electrotechnical devices with a hybrid magnetic system	5
<i>Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Urazbakhtin R.R., Veselov A.M., Miniyarov A.Kh.</i> Synchronous spherical electric motor	13
<i>Dmitriev A.A., Gerasimov V.E., Ploskov A.N.</i> Application of modern software capabilities in the design of power supply systems	20
<i>Shabanov V.A. Pashkin V.V., Ivashkin O.N.</i> Method of pick up of electric drives fans and pumps units with backspin impeller	26
<i>Linenko A.V., Siraev Sh.F., Aznagulov A.I., Lukyanov V.V.</i> Mechatronic system for automatic control of a machine-tractor unit with a screw-free electric motor	33
<i>Sattarov R.R., Ziganshin T.R.</i> Analysis of the no-load steady mode in a shielded face synchronous generator with high-coercive permanent magnets	41
<i>Kopytov S.M., Ulyanov A.V.</i> Controller for control of led lighting networks on electric power supply line	52

## DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Akhmedzhanov F.M., Krymsky V.G.</i> Algorithm for assessment of human operator reliability based on modified HEART methodology	60
<i>Muftakhov T.I., Giniyatullin V.M.</i> Simulation input data of neural network on the example of the incidence of viral hepatitis	70
<i>Koledin S.N., Koledina K.F., Gubaidullin I.M., Mullayanova A.F., Gabitov S.A.</i> Information system of consistent analysis of catalytic reactions by mathematical methods	79
<i>Osipov V.P., Posadsky A.I., Sivakova T.V., Sudakov V.A.</i> Combined method of fuzzy range alternatives based on preference functions	87

## METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES

<i>Timofeev A.O., Yasoveev V.Kh.</i> Wireless contactless sensor stock palaces well rod deep-pump installation	94
<i>Likhachev E.A., Zaitseva A.A.</i> Amathematical model of the acs frequency of rotation of the rotor of the helicopter	100
<i>Yaroslavkina E.E., Melnikova D.A., Muratova V.V.</i> Stand of receiving-continuous tests of submersible electric motors	106
<i>Grakhov P.A., Fedin A.V.</i> The devices of angular displacements based on magnetostrictive plates	112
<i>Mukhamadiev A.A., Shaikhutdinov I.I., Yasoveev V.Kh.</i> Analysis of the instrumentation base for the study of fluids	122
<b>About the authors</b>	128



**Андреева Е.Г.**  
**Andreeva E.G.**

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



**Семина И.А.**  
**Semina I.A.**

*кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Электрическая техника»  
ФГБОУ ВО «Омский государственный  
технический университет»,  
г. Омск  
Российская Федерация*

УДК 621.318.3:004.94

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-5-12

## **3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ГИБРИДНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ**

В работе исследовались разработанные и имитационно смоделированные трехмерные модели конструкций электротехнических устройств (ЭУ) с незамкнутыми гибридными магнитными системами. Они представляют совокупность магнитных систем открытого типа (концентратор) различного количества и конструктивного исполнения и магнитных систем разомкнутого типа (железоотделитель).

Эти устройства используются и могут быть использованы в электроэнергетике и теплоэнергетике для очистки угольных смесей и мазута; в сельском хозяйстве и сельхозпереработке – для очистки зерна, пшеничной муки, солода, костной муки; в сфере ЖКХ – для очистки воды; улучшения качества углеводородных топлив; в физических и медицинских приборах – для повышения магнитной индукции и напряженности внешнего магнитного поля (устройства АЛМАГ, системы МРТ).

Цель исследования: разработка и имитационное 3D-моделирование магнитных полей статических ЭУ с незамкнутыми гибридными магнитными системами для улучшения технико-экономических и массогабаритных показателей (энергоэффективности). Методы исследования: численное решение уравнений магнитного поля методом конечных элементов (МКЭ) и имитационное моделирование с помощью программных продуктов ANSOFT Maxwell/ANSYS Maxwell и SolidWorks.

Результаты: проведенные исследования на трехмерных моделях гибридной магнитной системы определили хорошую эффективность от применения концентраторов. Такая система позволяет охватить больший объем очищаемого материала магнитным полем, а наличие концентраторов ножевидной формы позволяет усилить и локализовать магнитное поле гибридной магнитной системы в заданной области пространства.

Выводы: имитационное 3D-моделирование ЭУ с незамкнутым гибридным магнитопроводом показало, что за счет конструктивного исполнения и конфигурации магнитного поля улучшаются силовые характеристики магнитного поля, в том числе, пондеромоторные силы, технико-экономические и массогабаритные показатели этих ЭУ.

**Ключевые слова:** концентратор, железоотделитель, гибридная магнитная система, электротехническое устройство, силовые характеристики, математическая модель, магнитное

поле, магнитная индукция, численный метод, программный продукт.

### 3D-MODELING OF ELECTROTECHNICAL DEVICES WITH A HYBRID MAGNETIC SYSTEM

The paper investigates the developed and simulated three-dimensional models of designs of electrotechnical devices with unclosed hybrid magnetic systems. They represent a set of magnetic systems of open-type (concentrator) of different quantity and design and magnetic systems of open-loop (iron separator).

These devices are used and can be used in power and heat power engineering for cleaning of coal mixes and fuel oil; in agriculture and agricultural processing for cleaning of grain, wheat flour, malt, bone meal; in the sphere of housing and communal services for water purification; for improvement of quality of hydrocarbon fuels; in physical and medical devices for increase of magnetic induction and intensity of an external magnetic field (almag devices, MRI systems).

Purpose of the study: development and 3D-simulation of magnetic fields of static electrotechnical devices with unclosed hybrid magnetic systems to improve the technical, economic and weight and size indicators (energy efficiency). Research methods: numerical solution of magnetic field equations by finite element method (FEM) and simulation using software products ANSOFT Maxwell/ANSYS Maxwell and SolidWorks.

Results: the studies conducted on three-dimensional models of the hybrid magnetic system determined the good efficiency of the concentrators. Such a system allows to cover a larger volume of the cleaned material with a magnetic field, and the presence of knife-shaped concentrators allows to strengthen and localize the magnetic field of the hybrid magnetic system in a given area of space.

Conclusion: 3D-simulation of a electrotechnical device with unclosed hybrid magnetic core has shown that due to the design and configuration of the magnetic field will improve the power characteristics of the magnetic field, including the ponderomotive force, economic and mass-dimensional characteristics of these electrotechnical devices.

**Key words:** concentrator, iron separator, hybrid magnet system, electrotechnical device, power characteristics, mathematical model, magnetic field, magnetic induction, numerical method, software program.

Новые, инновационные потребности людей и производства, их техническая и технологическая реализация требуют разработки и исследования энергоэффективных, экологических, качественных, простых и имеющих новые функциональные возможности технических устройств, в том числе и электротехнических. К таким устройствам можно отнести электротехнические устройства с незамкнутой магнитной системой (магнитопроводом) различного конструктивного исполнения и функционального назначения [1, 2]. ЭУ с незамкнутым магнитопроводом могут иметь подвижные части – это линейные индукционные машины [3, 4] и линейные асинхронные двигатели линейных транспортных средств [5]. У ЭУ с незамкну-

тым магнитопроводом также могут и отсутствовать движущиеся части, это статические ЭУ. Основной частью их являются электромагниты постоянного и переменного тока или же постоянные магниты [1].

Они могут быть также использованы в рудопроизводстве и на обогатительных фабриках, на предприятиях промышленности строительных материалов, коксохимических заводах – для защиты рабочих органов от поломок ферромагнитными предметами; на металлургических комбинатах в литейных цехах – для очистки формовочной смеси от ферромагнитных включений; в рудопроизводстве и металлургии – для сепарации на фракции твердых металлических проводящих частиц [6].

### Гибридная магнитная система

В работе исследуются трехмерные имитационные модели электротехнических устройств с незамкнутой гибридной (комбинированной) магнитной системой (магнитопроводом), состоящей из П-образного железозотделителя и концентраторов с различными насадками переменного поперечного сечения. Рассматривается 3D-модель П-образного железозотделителя с одной, тремя и четырьмя концентрирующими насадками ножевидной формы. Гибридные магнитные системы усиливают магнитное поле в межполюсном зазоре, под полюсами и на уровне транспортера с очищаемой сухой смесью, а также меняют конфигурацию магнитного поля, что приводит к увеличению пондеромоторных сил, действующих на ферромагнитные частицы, извлекаемые из очищаемого веще-

ства. При этом охватывается большой объем очищаемого материала магнитным полем [7].

### Исследование магнитного поля и его силовых характеристик ЭУ с гибридной магнитной системой на 3D-моделях различной конфигурации

При построении имитационных моделей гибридных магнитных систем (данные для расчета приведены в виде табл. 1) заданы основные допущения, граничные условия, определен тип задачи, построена геометрия модели гибридной магнитной системы (рис. 1), задана намагничивающая сила обмотки и определены свойства сред при моделировании. Поскольку конструкция железозотделителя существенно трехмерна, то рассматривается его 3D-модель в Декартовой системе координат.

Таблица 1. Параметры задачи

№ п/п	Наименование параметра задачи	Значение параметра
1	Задача	Гибридная магнитная система
2	Тип задачи	Задача магнитостатики
3	Геометрия модели	Рис. 1
4	Относительная магнитная проницаемость: – воздуха – обмотки	$\mu_{\text{в}} = 1$ $\mu_{\text{об}} = 1$
5	Намагничивающая сила обмотки, А	$I_w = 2600$

При моделировании магнитного поля приняты основные допущения:

– магнитные свойства модели (П-образный магнитопровод 1, концентратор 3, рис. 1) задаются кривой намагничивания стали 1045 (программно);

– относительная магнитная проницаемость воздуха и медной обмотки равна единице;

– плотность тока в сечении обмотки распределяется равномерно, ток обмотки постоянный;

– расчет магнитного поля гибридной магнитной системы рассматривается как задача магнитостатики;

– на границе расчетной области приняты нулевые граничные условия.

Трехмерные задачи исследования магнитного поля и его характеристик решались в программном продукте ANSOFT Maxwell/ ANSYS Maxwell [8, 9]. Исходные уравнения магнитостатического поля:

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

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

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

где  $\vec{B}$  – вектор магнитной индукции;  $\vec{H}$  – вектор напряженности магнитного поля;  $\vec{J}$  – вектор плотности тока,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала,  $\mu_0$  – магнитная постоянная [4, 10].

### Гибридная магнитная система с одним концентратором под полюсом железотделителя

На рисунке 1 представлена геометрическая модель для электромагнитных исследо-

ваний гибридной магнитной системы с одним концентратором под полюсом [1, 7].

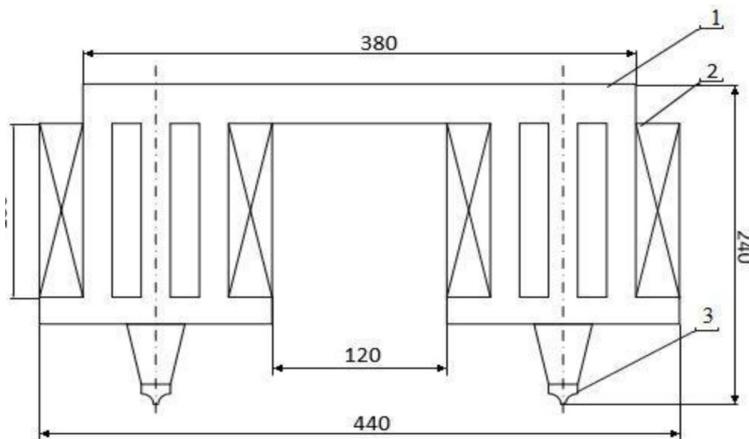


Рисунок 1. Внешний вид и размеры гибридной системы в плоскости X0Y:  
1 – магнитопровод, 2 – обмотка, 3 – концентратор ножевидной формы

### Построение 3D-модели железотделителя с концентратором магнитного поля ножевидной формы в программе SolidWorks

Принцип построения состоит в том, что 3D-модель устройства создается из несколь-

ких частей в различных файлах и потом собирается в единую сборку. Для начала нужно нарисовать чертеж стального сердечника в 2D (рис. 2).

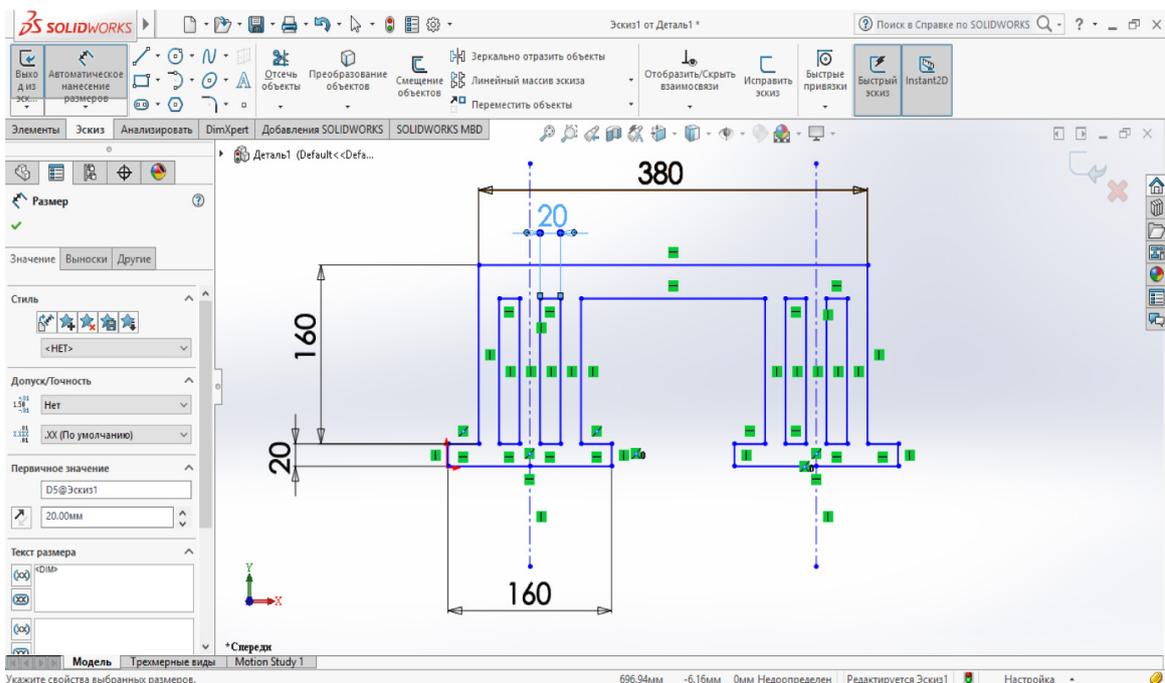


Рисунок 2. Чертеж стального сердечника в программном продукте SolidWorks

Далее создается файл с 3D-моделью стального сердечника П-образного железотделителя (рис. 3), а затем – файлы с медной обмот-

кой сердечника и концентратором в виде усеченного конуса с наконечником в виде ножа (рис. 4).

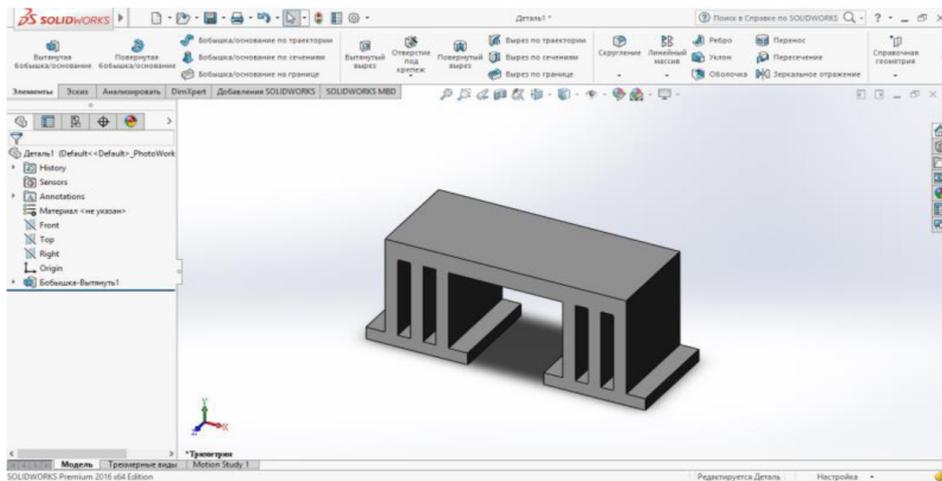


Рисунок 3. 3D-модель стального сердечника П-образного железотделителя

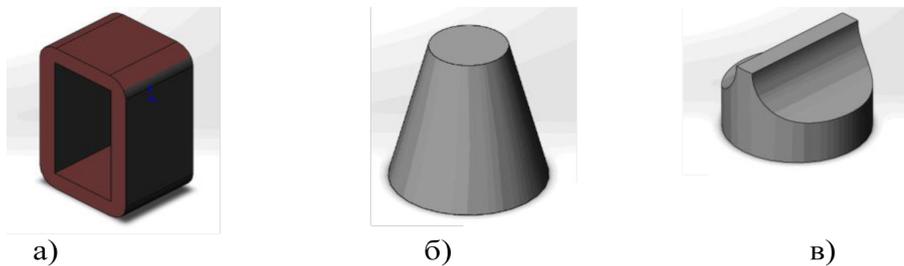


Рисунок 4. Составные части в отдельных файлах для гибридной магнитной системы: медная обмотка (а), концентратор в виде усеченного конуса (б), наконечник в виде ножа (в)

Создаем файл «сборка», открываем все файлы, из которых будет состоять будущая сборка. Переместим мышью в файл «сборка» стальной сердечник. Файл «сердечника» закроем. Аналогичным способом переместим обмотку меди два раза и сопряжем

катушки с магнитопроводом. Перенесем в сборку сначала насадки в виде усеченного конуса, а затем концентраторы в виде ножа, получаем 3D-модель П-образного железотделителя с гибридной магнитной системой (рис. 5).

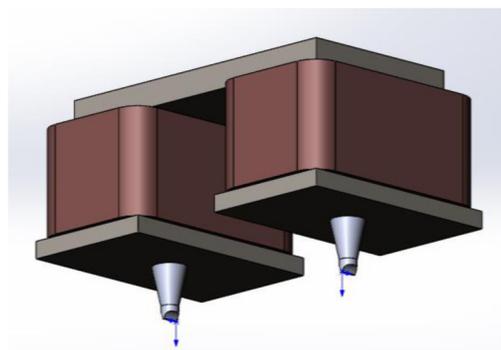
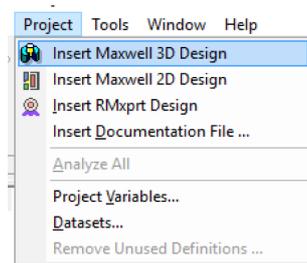


Рисунок 5. 3D-модель П-образного железотделителя с гибридной магнитной системой, построенная в программном продукте SolidWorks

### Расчет 3D-модели железотделителя с концентратором магнитного поля ножевидной формы в программе ANSOFT Maxwell/ ANSYS Maxwell

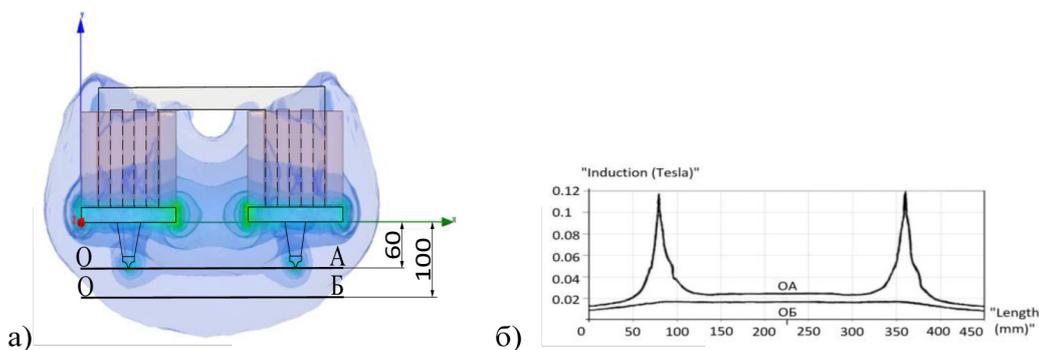
Создадим проект, который необходимо решить и исследовать, для чего находим вкладку project→Insert Maxwell 3D Design.



В рабочее пространство трехмерного моделирования импортируется построенная 3D-модель с помощью опции Modeler→Import, это файл, сохраненный в программе SolidWorks в формате \*.SAT. Затем задаются материалы и их свойства для элементов модели: медь, сталь и воздух; ток в катушке, область решения задачи, граничные условия. Решение задачи проводится по команде «AnalyzeAll». После решения задачи на экран компьютера выводятся различные параметры,

например, картина магнитного поля или значения векторов индукции и напряженности магнитного поля.

Имитационное моделирование гибридной магнитной системы с одним концентратором ножевидной формы [7] позволило получить следующие результаты (рис. 6).

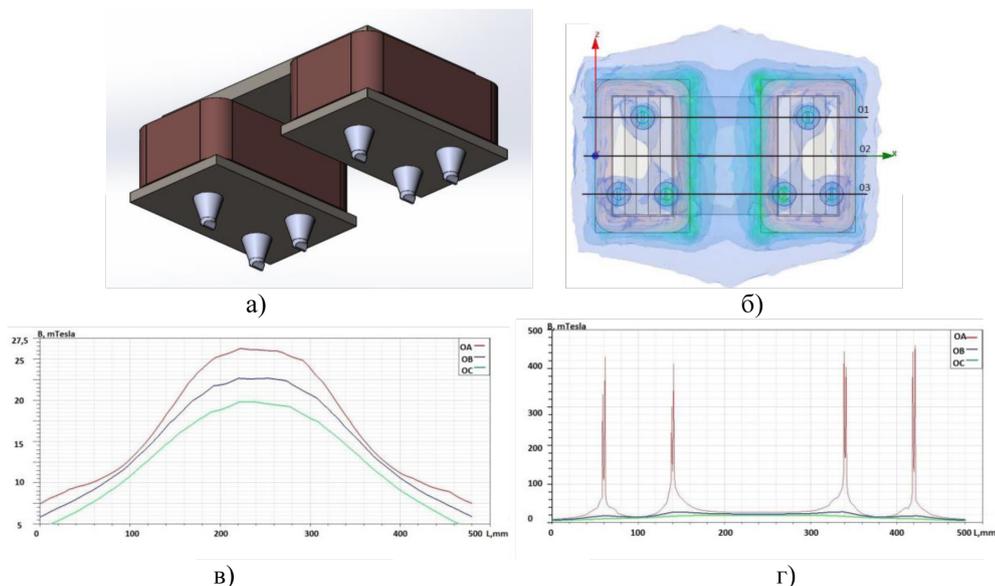


**Рисунок 6.** Картина магнитного поля (а) и график векторов индукции (б) магнитного поля гибридной магнитной системы в направлениях ОА (транспортёр с сухой смесью находится на расстоянии 60 мм от полюса) и ОБ (на расстоянии 100 мм)

Под полюсными наконечниками (концентраторами) гибридной магнитной системы формируется неоднородное магнитное поле, поэтому при длинах  $L = 80$  мм и при  $L = 365$  мм в направлении ОА магнитная индукция возрастает до значения 0,120 Тл (рис. 6, б), что обусловлено формой концентраторов.

#### Гибридная магнитная система с тремя концентраторами под полюсом железоотделителя [2]

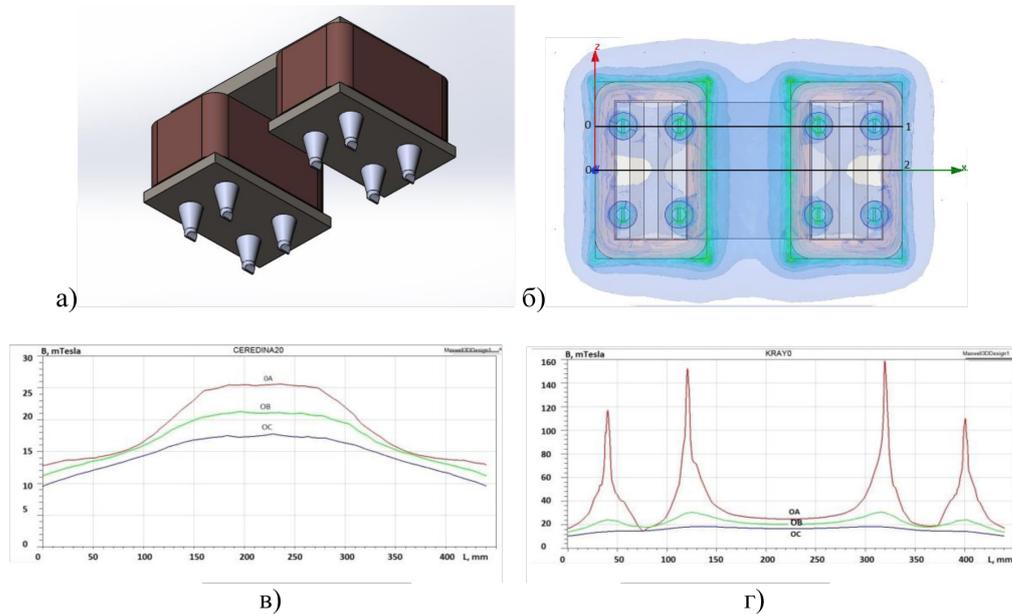
На рисунке 7 показаны картина магнитного поля железоотделителя с тремя концентраторами ножевидной формы и графики магнитной индукции по соответствующим контурам (по линиям 0-2 и 0-3, ОА – расстояние до транспортера с сухой смесью 60 мм, ОВ – 80 мм ОС – 100 мм).



**Рисунок 7.** Трехмерная модель гибридной магнитной системы с тремя насадками ножевидной формы (а); картина магнитного поля (вид снизу вверх) (б); зависимость вектора магнитной индукции (В) от длины (L) ленты транспортера под П-образным железоотделителем с тремя концентраторами по контуру 0-2 (в) и контуру 0-3 (г)

**Гибридная магнитная система с четырьмя концентраторами ножевидной формы на каждом полюсе железотделителя**

На рисунке 8 показаны картины магнитного поля железотделителя с четырьмя концентраторами ножевидной формы и зависимости магнитной индукции по соответствующим контурам.



**Рисунок 8.** Трехмерная модель гибридной магнитной системы с четырьмя насадками ножевидной формы (а); картина магнитного поля (вид снизу вверх) (б); зависимость вектора магнитной индукции (В) от длины (L) ленты транспортера под П-образным железотделителем с четырьмя концентраторами по контуру 0-2 (в) и контуру 0-1 (г)

**Таблица 2.** Результаты 3D-моделирования незамкнутой гибридной системы

Расстояние от середины полюса до транспортера	Базовая конструкция (без концентраторов)	П-образный железотделитель с одним концентратором в виде ножа	П-образный железотделитель с тремя концентраторами в виде ножа	П-образный железотделитель с четырьмя концентраторами в виде ножа
Наибольшее значение магнитной индукции, Тл				
60 мм	0,024	0,12	0,46	0,16
100 мм	0,0155	0,018	0,025	0,0155

Результаты 3D-моделирования электротехнического устройства с гибридной магнитной системой базовой конструкции П-образного железотделителя (без концентраторов) с одним, тремя и четырьмя концентраторами в виде ножа показали, что максимальные искажение магнитного поля и значение магнитной индукции (0,46 Тл) достигаются при трех ножевидных концентраторах (табл. 2).

**Выводы**

Приведенные в статье исследования с помощью программного продукта ANSOFT Maxwell/ANSYS Maxwell трехмерных имитационных моделей незамкнутых гибридных

магнитных систем «железотделитель – концентратор» позволяют рассматривать различные конструкции базового 10 железотделителя, концентраторов, изменять их количество на полюсах, т.е. решать задачи инженерной оптимизации базовой конструкции железотделителей и гибридных магнитных систем с целью улучшения их энергоэффективности и качества, т.е. силовых параметров и характеристик, изменять и увеличивать их функциональные и технологические возможности.

Таким образом, улучшать характеристики и свойства исследуемых незамкнутых гибридных магнитных систем можно тремя способами: конструктивными – изменять

габаритные размеры железотделителя, конструкцию концентратора, использовать на полюсе не один концентратор, а несколько; электрическими – изменять параметры питающей сети и обмотки железотделителя; программным – перейти на трехмерные модели, увеличить точность расчета (увеличить количество конечных элементов, область моделирования), в связи с этим улучшить программно-аппаратное обеспечение решения задачи.

#### Список литературы

1. Андреева Е.Г. Моделирование электротехнических устройств с незамкнутым магнитопроводом // Промышленная энергетика. – 2017. – № 3. – С. 19–24.

2. Андреева Е.Г., Плеханова В.С. Исследование магнитного поля, его силовых характеристик, свойств материалов электротехнических устройств с незамкнутой магнитной системой // Омский научный вестник. – 2018. – № 4 (160). – С. 31–37.

3. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970. – 272 с.

4. Андреева Е.Г., Ковалев В.З. Математическое моделирование электротехнических комплексов: монография; под общ. ред. Ю.З. Ковалева. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 1999. – 172 с.

5. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей; Пер. с англ. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 180 с.

6. Сумцов В.Ф. Электромагнитные железотделители. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.

7. Andreeva Y.G., Semina I.A., Orlov A.S. The research of three-dimensional magnetic field of the hybrid magnetic system in the ANSYS Maxwell program // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85013644442&partnerID=MN8TOARS>

8. ANSOFT Maxwell [Электронный ресурс] / URL: <http://www.ansoft-maxwell.narod.ru/maxwell/MagnetostaticFieldCalculation.htm>

9. Руководство ANSOFT Maxwell 3D [Электронный ресурс]. – URL: [http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D\\_V11.pdf](http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D_V11.pdf)

10. Тамм И.Е. Основы теории электричества: учеб. пособие для вузов. – М.: Наука, 1989. – 504 с.

Имитационное моделирование электромагнитных процессов с помощью программного продукта ANSOFT Maxwell/ANSYS Maxwell показало, что наиболее энергоэффективной конструкцией является гибридная магнитная система с тремя концентраторами ножевидной формы на полюсе, поскольку дает максимальное изменение конфигурации магнитного поля и увеличивает концентрацию магнитного поля под полюсами до 0,46 Тл.

#### References

1. Andreeva E.G. Modelirovanie elektrotehnicheskikh ustrojstv s nezamknutym magnitoprovodom // Promyshlennaja energetika. – 2017. – № 3. – P. 19-24.

2. Andreeva E.G., Plehanova V.S. Issledovanie magnitnogo polja, ego silovyh karakteristik, svojstv materialov elektrotehnicheskikh ustrojstv s nezamknutoj magnitnoj sistemoj // Omskij nauchnyj vestnik. – 2018. – № 4 (160). – P. 31-37.

3. Vol'dek A.I. Indukcionnye magnitogidrodinamicheskie mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom. – L.: Jenergija, 1970. – 272 p.

4. Andreeva E.G., Kovalev V.Z. Matematicheskoe modelirovanie elektrotehnicheskikh kompleksov: monografija; pod obshh. red. Ju.Z. Kovaleva. – Omsk: Izd-vo OmGTU, 1999. – 172 p.

5. Jamamura S. Teorija linejnyh asinhronnyh dvigatelej / Per. s angl. – L.: Energoatomizdat, 1983. – 180 p.

6. Sumcov V.F. Elektromagnitnye zhelezotdeliteli. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 174 p.

7. Andreeva Y.G., Semina I.A., Orlov A.S. The research of three-dimensional magnetic field of the hybrid magnetic system in the ANSYS Maxwell program // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85013644442&partnerID=MN8TOARS>

8. ANSOFT Maxwell [Elektronnyj resurs] / URL: <http://www.ansoft-maxwell.narod.ru/maxwell/MagnetostaticFieldCalculation.htm>

9. Rukovodstvo ANSOFT Maxwell 3D [Elektronnyj resurs]. – URL: [http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D\\_V11.pdf](http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D_V11.pdf)

10. Tamm I.E. Osnovy teorii elektrichestva: ucheb. posobie dlja vuzov. – M.: Nauka, 1989. – 504 p.



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

доктор технических наук,  
заведующий кафедрой  
электромеханики,  
ФГБОУ ВО «УГАТУ»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Вавилов В.Е.**  
**Vavilov V.E.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
электромеханики,  
ФГБОУ ВО «УГАТУ»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Уразбахтин Р.Р.**  
**Urazbakhtin R.R.**

студент кафедры  
электромеханики,  
ФГБОУ ВО «УГАТУ»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Веселов А.М.**  
**Veselov A.M.**

магистрант кафедры электромеханики,  
ФГБОУ ВО «УГАТУ»,  
г. Уфа, Российская Федерация



**Минияров А.Х.**  
**Miniyarov A.Kh.**

аспирант кафедры электромеханики,  
ФГБОУ ВО «УГАТУ»,  
г. Уфа, Российская Федерация

УДК 621.313.323

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-13-19

## СИНХРОННЫЙ СФЕРИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

В настоящее время в мире актуальна проблема проектирования манипуляторов нового поколения в связи с повышением требований относительно их подвижности. Данная проблема решается, если создать электромеханическую систему, обеспечивающую управление движением манипулятора по трем степеням свободы с использованием одного привода. Сейчас в мире не существует конкретных принципов изготовления и разработки подобных систем. В качестве такой электромеханической системы может выступать сферический электродвигатель. Основное требование к конструкции сферического электродвигателя – обеспечение полностью управляемого перемещения ротора с тремя степенями свободы и достижение при этом достаточной точности позиционирования. В статье авторами описан процесс проектирования собственного сферического электродвигателя – разработка статора сферического электродвигателя, стабилизация ротора сферического электродвигателя и придание вращения ротору сферического электродвигателя. Предложено два варианта статора для синхронного сферического электродвигателя; проведено моделирование распределения магнитного поля в программе Ansys Maxwell для каждой из предлагаемых конструкций статора

сферического синхронного электродвигателя. Проведен анализ предлагаемых конструкций статора сферического синхронного электродвигателя, и выявлена разница в распределении магнитного поля для каждой из предлагаемых конструкций статора сферического синхронного электродвигателя. В результате моделирования были получены численные значения магнитного потока около электромагнитов предлагаемых конструкций статоров синхронного сферического электродвигателя. Также в статье подробно описаны математические модели синхронного сферического электродвигателя в статике и в динамике. Решена проблема стабилизации ротора синхронного сферического электродвигателя. Проведен расчет усилий, которые должны быть созданы каждым из электромагнитов статора синхронного сферического электродвигателя для обеспечения стабилизации ротора синхронного сферического электродвигателя на заданной высоте. Описана динамика вращения ротора синхронного сферического электродвигателя посредством математических уравнений. В статье авторами приведена поэтапная методика расчета и проектирования для предлагаемого синхронного сферического электродвигателя.

**Ключевые слова:** синхронный электродвигатель, сферический электродвигатель, распределение магнитного поля, стабилизация ротора сферического электродвигателя, вращение ротора сферического электродвигателя.

## SYNCHRONOUS SPHERICAL ELECTRIC MOTOR

At present, the problem of designing new-generation manipulators is urgent in cause of the increase in requirements regarding their mobility. This problem is solved if we create an electromechanical system that provides control of the movement of the manipulator in three degrees of freedom using a single drive. Now in the world there are no specific principles for the manufacture and development of such systems. As such an electromechanical system can be a spherical electric motor. The main requirement for the design of a spherical electric motor is the provision of a fully controlled displacement of the rotor with three degrees of freedom and at the same time achieving sufficient positioning accuracy. In the article the authors describe the process of designing their own spherical electric motor – development of a stator of a spherical electric motor, stabilization of the rotor of a spherical electric motor and imparting a rotation of the rotor of a spherical electric motor. Two variants of a stator for a synchronous spherical electric motor are proposed; simulation of the magnetic field distribution in the Ansys Maxwell for each of the proposed stator designs of a spherical synchronous motor is performed. The analysis of the proposed stator designs of a spherical synchronous electric motor is carried out and the difference in the magnetic field distribution for each of the proposed stator designs of a spherical synchronous electric motor is revealed. As a result of the simulation, numerical values of the magnetic flux near the electromagnets of the proposed stator designs of a synchronous spherical electric motor were obtained. Also in the article are described in detail the mathematical models of a synchronous spherical electric motor in statics and in dynamics. The problem of stabilizing the rotor of a synchronous spherical electric motor is solved. The calculation of the forces that must be created by each of the stator electromagnets of a synchronous spherical electric motor is made to ensure stabilization of the rotor of a synchronous spherical electric motor at a given altitude. The dynamics of rotor rotation of a synchronous spherical electric motor is described by means of mathematical equations. In the article the authors show a step-by-step calculation and design method for the proposed synchronous spherical electric motor.

**Key words:** synchronous motor, spherical electric motor, magnetic field distribution, stabilization of the rotor of a spherical electric motor, rotation of the rotor of a spherical electric motor.

В настоящее время в мире актуальна проблема проектирования манипуляторов нового поколения в связи с повышением требований относительно их подвижности. Сервоприводы существующих манипулято-

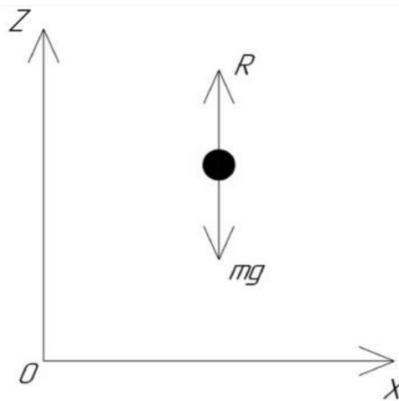
ров обладают только одной степенью свободы движений, что обуславливает ограниченную подвижность систем, в которых они используются. Для обеспечения движения по каждой дополнительной степени свободы

требуется установка отдельного сервопривода, что влечет за собой усложнение конструкции системы управления и механизма, в котором применяется этот привод, к увеличению массы конструкции и понижению ее надежности. Данная проблема решается, если создать электромеханическую систему, обеспечивающую управление движением манипулятора по трем степеням свободы с использованием одного привода. Сейчас в мире не существует конкретных принципов изготовления и разработки подобных систем [1].

В качестве такой электромеханической системы может выступать сферический электродвигатель. Основное требование к конструкции сферического электродвигателя –

обеспечение полностью управляемого перемещения ротора с тремя степенями свободы и достижение при этом достаточной точности позиционирования. В статье авторами описан процесс проектирования собственного сферического электродвигателя – разработка статора сферического электродвигателя, стабилизация ротора сферического электродвигателя и придание вращения ротору сферического электродвигателя.

Сначала рассмотрим условие равновесия ротора, представляющего собой постоянный магнит сферической формы, в магнитном поле, создаваемом электромагнитами статора (рис. 1).



**Рисунок 1.** Расчетная схема для ротора сферического электродвигателя при условии, что он находится в равновесии, где  $R$  – результирующая сила, действующая со стороны электромагнитов статора;  $mg$  – сила тяжести, действующая на ротор сферического электродвигателя

Из классических представлений физики условие равновесия ротора запишется следующим образом:

$$R = mg. \tag{1}$$

Выразим условие равновесия ротора через вертикальную составляющую вектора напряженности магнитного поля:

$$H_z = f(z). \tag{2}$$

Согласно формуле (2) вертикальная составляющая магнитного поля является функцией от координаты ротора по вертикали. В свою очередь вертикальная составляющая вектора напряженности магнитного поля выражается через координату по вертикальной оси, и напряженность магнитного поля на высоте левитации выглядит следующим образом:

$$H_z = H_l \sqrt{1 - \frac{z - z_l}{1,5r_{ш}}}, \tag{3}$$

где  $r_{ш}$  – радиус ротора сферического электродвигателя.

Результирующая сила, действующая со стороны электромагнитов статора на ротор, выражается через напряженность магнитного поля на высоте левитации:

$$R = \frac{3}{8} \pi \chi_k \mu_0 H_l^2 r_{ш}^2, \tag{4}$$

где  $\chi_k$  – кажущаяся магнитная проницаемость;  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Кажущаяся магнитная проницаемость – величина магнитной проницаемости, заниженная по сравнению с истинной величиной магнитной проницаемости из-за влияния размагничивающего фактора.

Из уравнений (1), (3) и (4) получим окончательное условие левитации:

$$r_{ш} = \frac{9}{32} \frac{\chi_k \mu_0}{\rho g} H_l^2, \quad (5)$$

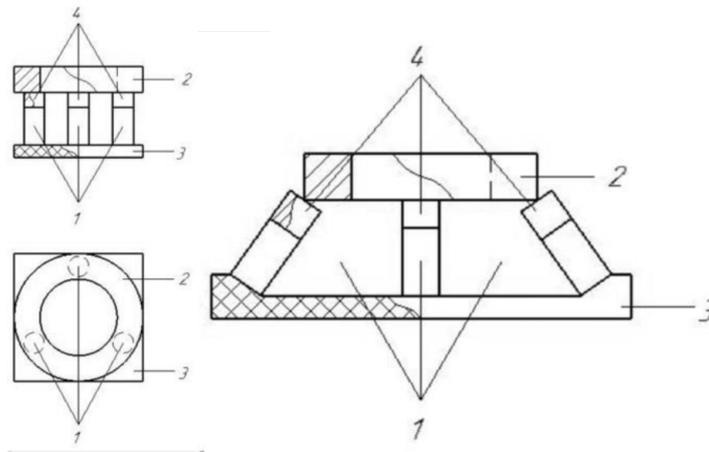
где  $\rho$  – плотность материала, из которого изготовлен ротор;  $g$  – ускорение свободного падения [2].

Для дальнейшего проектирования статора сферического электродвигателя установим связь между напряженностью магнитного поля на высоте левитации и вектором магнитной индукции в этой же точке:

$$B_l = \mu H_l. \quad (6)$$

Таким образом, установлена связь между вектором магнитной индукции на высоте левитации  $B_l$  и результирующей силой, действующей со стороны электромагнитов статора на ротор. В дальнейшем полученная зависимость будет нужна для реализации системы управления сферическим электродвигателем и для расчетов его параметров [3].

Предлагаемые конструкции статоров представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Конструкция статора № 1 (слева) и конструкция статора № 2 (справа), где 1 – электромагниты статора; 2 – постоянный кольцевой магнит; 3 – каркас статора; 4 – крепления для постоянного кольцевого магнита

В предлагаемых конструкциях ротора электромагниты статора находятся в вершинах правильного треугольника. Электромагниты статора выполняются одинаковыми, с целью обеспечения равномерного распределения сил, действующих на ротор со стороны электромагнитов статора. Угол между электромагнитами статора равен  $120^\circ$ . Каркас статора и крепления для кольцевого магнита выполняются из немагнитного материала.

В приведенной конструкции синхронного сферического электродвигателя магнитное поле постоянного кольцевого магнита существенно влияет на ротор. Это влияние проявляется в возникновении сил отталкивания между постоянным кольцевым магнитом и ротором, представляющим собой постоянный магнит сферической формы. Однако применение одного лишь постоянного кольцевого магнита не позволяет устойчиво удерживать электромеханическую систему в рав-

новесном состоянии. Поэтому для обеспечения устойчивости дополнительно применяются электромагниты статора, по которым протекают изменяющиеся с течением времени токи. Закон изменения токов во времени формирует автоматизированная система управления на основании сигналов отрицательной обратной связи по положению ротора синхронного сферического электродвигателя в пространстве. Применение предлагаемого конструктивного решения позволяет снизить токи, протекающие по электромагнитам статора, за счет того, что по электромагнитам статора протекает только переменная составляющая токов и, как следствие, снижается мощность, потребляемая системой автоматического управления для формирования управляющего воздействия.

Далее смоделируем распределение магнитного поля в предлагаемых конструкциях статора (рис. 3). Постоянный кольцевой

магнит выполнен из материала SmCo, провод в обмотке электромагнитов статора медный.

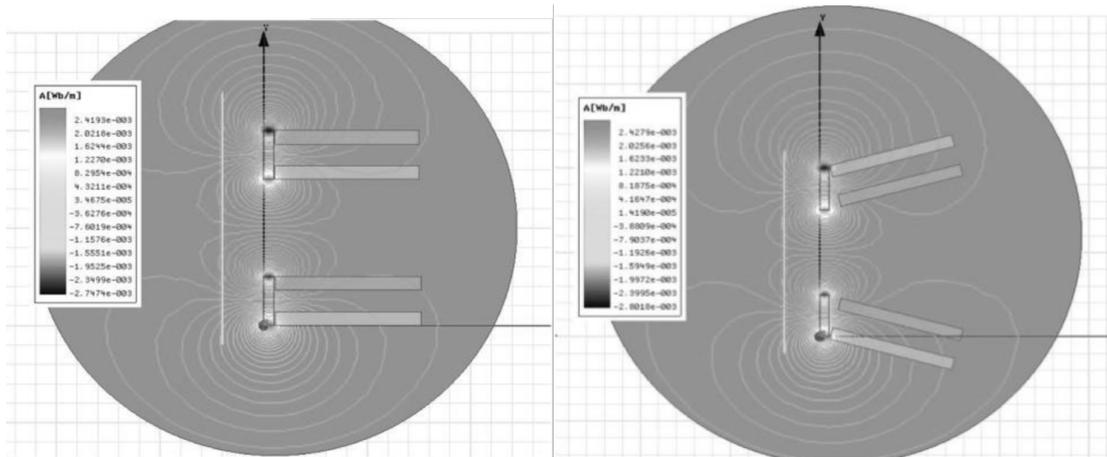


Рисунок 3. Распределение магнитного поля в конструкции статора № 1 (слева) и конструкции статора № 2 (справа)

Изготовление статора сферического электродвигателя возможно при применении обеих конструкций статора. Стоит отметить, что конструкция статора № 1 проще в изготовлении, чем конструкция статора № 2. Однако при применении конструкции статора № 2 возможно осуществить позициони-

рование ротора на меньшей высоте по отношению к постоянному кольцевому магниту.

Найдем усилие, которое создается каждым из электромагнитов статора, при условии, что ротор неподвижен. Расчетная схема с расстановкой сил, действующих на ротор, представлена на рисунке 4.

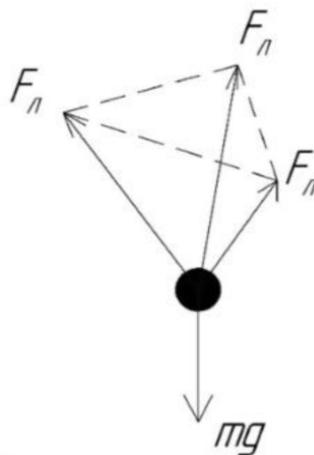


Рисунок 4. Расчетная схема с расстановкой сил, действующих на ротор, где  $F_n$  – сила, действующая на ротор сферического электродвигателя со стороны каждого электромагнита статора

Введем Декартову трехмерную прямоугольную систему координат и спроецируем действующие на ротор силы на вертикальную и горизонтальную плоскости. Заметим, что в силу симметричности системы условие равновесия ротора в горизонтальной плоскости (4) будет выполняться при любых значе-

ния сил. Проведя математические преобразования, получим:

$$F_n = \frac{mg}{3\cos\alpha} \quad (7)$$

В формуле (7) угол  $\alpha$  будет определяться исходя из распределения магнитных полей статора и ротора сферического электродвигателя на заданной высоте левитации.

Опишем динамику ротора сферического электродвигателя при условии, что ротор неподвижен в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При этом ротор может вращаться в каждой из трех плоскостей Декартовой прямоугольной системы координат. В данном случае вращение ротора в направлении, не совпадающем с направлением ни одной из плоскостей прямоугольных Декартовых координат, будет являться комбинацией из вращений ротора в каждой из плоскостей прямоугольной Декартовой трехмерной системы координат [4, 5].

Уравнения перемещения будут определяться исходя из изменений углов в трех плоскостях прямоугольной Декартовой системы координат  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$ . Запишем уравнения для изменения угловых скоростей  $\omega_i$  ротора по трем рассматриваемым плоскостям:

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{d\varphi_1}{dt} \\ \omega_2 = \frac{d\varphi_2}{dt} \\ \omega_3 = \frac{d\varphi_3}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

### Список литературы

1. Липин А.В. Разработка и исследование трехкоординатного электропривода для манипуляторов [Электронный ресурс]. URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Autoreferats/LipinAV.pdf>, pdf (Дата обращения: 09.04.2018)
2. Альтман А.Б., Верниковский Э.Е., Герберг А.Н. и др. Постоянные магниты. Справочник. – М.: Энергия, 1980. – 487 с.
3. Ankit B., Masaaki K., Ralph H. Six-Stator Spherical Induction Motor for Balancing Mobile Robots // Proc. of the International Conference on Robotics and Automation, (Seattle, May 26-30 2015).
4. Bo L., Manabu A., Takehiro T., Hideki T. Sandwich-type Multi-degree-of-freedom Spherical Ultrasonic Motor [Jelektronnyj resurs]. URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2009A/0/2009A\\_0\\_855/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2009A/0/2009A_0_855/_pdf) (Data obrashhenija: 09.04.2018).

Тогда уравнения движения для ротора сферического двигателя запишутся в следующем виде:

$$\begin{cases} I \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} = (mg + \sum F_1)L \\ I \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = (mg + \sum F_2)L \\ I \frac{d^2\varphi_3}{dt^2} = (mg + \sum F_3)L \end{cases} \quad (9)$$

где  $I$  – момент инерции ротора сферического электродвигателя;  $F_i$  – сила, действующая на ротор со стороны электромагнитов статора в рассматриваемой плоскости вращения ротора.

Уравнениями (8) – (9) полностью описывается динамика ротора синхронного сферического электродвигателя [1, 6].

Итак, в статье авторами предложен новый вариант реализации сферического электродвигателя. Рассмотрены две возможные конструкции статора сферического электродвигателя. Предложена новая методика расчета предлагаемого сферического электродвигателя.

5. Wang J., Mitchell K., Jewell G.W., D. Howe Multi-Degree-of-Freedom Spherical Permanent Magnet Motors [Электронный ресурс]. URL: [http://www.ent.mrt.ac.lk/iml/paperbase/ICRA\\_CDs/ICRA2001/PDFFILES/PAPERS/ICRA\\_PAPERS/I1050.pdf](http://www.ent.mrt.ac.lk/iml/paperbase/ICRA_CDs/ICRA2001/PDFFILES/PAPERS/ICRA_PAPERS/I1050.pdf) (Дата обращения: 09.04.2018).

6. Кислицын А.Л. Синхронные машины. – Ульяновск: УЛИГТУ, 2000. – 108 с.

### References

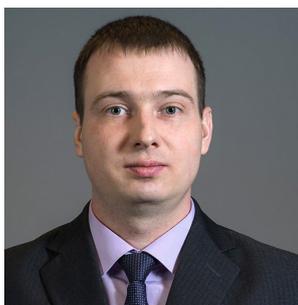
1. Lipin A.V. Razrabotka i issledovanie trehkoordinatnogo jelektroprivoda dlja manipuljatorov [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Autoreferats/LipinAV.pdf>, pdf (Data obrashhenija: 09.04.2018).
2. Al'tman A.B., Vernikovskij Je.E., Gerberg A.N. i dr. Postojannye magnity. Spravochnik. – М.: Jenergija, 1980, 487 p.

3. Ankit B., Masaaki K., Ralph H. Six-Stator Spherical Induction Motor for Balancing Mobile Robots // Proc. of the International Conference on Robotics and Automation, (Seattle, May 26-30 2015).

4. Bo L., Manabu A., Takehiro T., Hideki T. Sandwich-type Multi-degree-of-freedom Spherical Ultrasonic Motor [Elektronnyj resurs]. URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2009A/0/2009A\\_0\\_855/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2009A/0/2009A_0_855/_pdf) (Data obrashhenija: 09.04.2018).

5. Wang J., Mitchell K., Jewell G.W., D. Howe Multi-Degree-of-Freedom Spherical Permanent Magnet Motors [Elektronnyj resurs]. URL: [http://www.ent.mrt.ac.lk/iml/paperbase/ICRA\\_CDs/ICRA2001/PDFFILES/PAPERS/ICRA\\_PAPERS/I1050.pdf](http://www.ent.mrt.ac.lk/iml/paperbase/ICRA_CDs/ICRA2001/PDFFILES/PAPERS/ICRA_PAPERS/I1050.pdf) (Дата обращения: 09.04.2018).

6. Kislicyn A.L. Sinhronnye mashiny. – Ul'janovsk: UIGTU, 2000. – 108 p.



**Дмитриев А.А.**  
**Dmitriyev A.A.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Автомобильного транспорта,  
строительных и дорожных машин»,  
ФГБОУ ВО «Тюменский  
индустриальный университет»,  
г. Тюмень  
Российская Федерация



**Герасимов В.Е.**  
**Gerasimov V.E.**

аспирант кафедры  
«Электроэнергетика»  
ФГБОУ ВО «Тюменский  
индустриальный университет»,  
г. Тюмень  
Российская Федерация



**Плосков А.Н.**  
**Ploskov A.N.**

инженер-проектировщик  
I категории,  
электротехнический отдел,  
АО «НИПИГАЗ»,  
г. Тюмень  
Российская Федерация

УДК 621.311.1

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-20-25

## **ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

В данной статье описан вариант использования программного обеспечения для оптимизации рабочего процесса инженера-проектировщика систем электроснабжения, позволяющий сократить трудозатраты на разработку рабочей документации, снизить количество ошибок. Максимальный эффект при использовании данного подхода к проектированию заметен при корректировках ранее разработанной документации и связан с изменениями исходных данных. Наиболее экономичным считается подход, при котором обработка данных и получение максимального количества выходных документов, включающихся в состав разрабатываемой рабочей документации, формируется в одном программном комплексе, исключая промежуточную передачу данных из одного расчетного модуля в другой посредством инженера-проектировщика. В статье приведены уже используемые в работе возможности программного обеспечения, такие как составление принципиальной электрической схемы с указанием всех электроприемников, входящих в проектируемый электротехнический комплекс, трассировка кабельных линий на плане, на которых по ключевым точкам происходит привязка и автотрассировка линий. Автоматическое формирование выходных таблиц внешних соединений, кабельных журналов, спецификаций оборудования сокращает время на разработку инженером-проектировщиком, а также на проверку его руководителем данных документов – достаточно проверить правильность составления исходной схемы и плана. Не возникает сложностей с прохождением нормоконтроля, т.к. все документы сформированы автоматическим способом по заранее предустановленному и согласованному шаблону. Данные инструменты позволяют существенно снизить временные затраты на создание электротехнической части проекта, еще больший потенциал скрыт в экономии времени на проведение различных корректировок проектной документации (вследствие изменения исход-

ных данных от заказчика проекта, технологической части объекта и смежных разделов проекта), объем которых заранее не представляется известным. Кроме того, в данной статье обозначены направления по расширению существующего функционала (расчет тепловыделений от оборудования, пиковых пусковых токов, выбор резервных источников питания и т.д.).

**Ключевые слова:** проектирование, электроснабжение, чертежи, схемы, спецификации, Eplan.

## APPLICATION OF MODERN SOFTWARE CAPABILITIES IN THE DESIGN OF POWER SUPPLY SYSTEMS

This article describes the use of software to optimize the workflow of an engineer-designer of power supply systems, which allows to reduce labor costs for the development of working documentation, reduce the number of errors. The maximum effect when using this approach to design is noticeable when adjusting the previously developed documentation associated with changes in the original data. The most economical approach is considered, in which data processing and obtaining the maximum number of output documents, included in the developed working documentation, is formed in one software package, excluding intermediate data transfer from one calculation module to another by the design engineer. In the article already used in the software features, such as making an electrical circuit showing all electrical equipment included in the electrical design of the complex tracing of cable lines on the plan, which at key points is reference and the autotrace lines. Automatic creation of output tables, external connections, cable journals, specifications of the equipment reduces the time to design engineer and checking his head of these documents is sufficient to verify the correctness of the original scheme and plan. There are no difficulties with the passage of regulatory control, because all documents are generated automatically by a pre-defined and agreed template. These tools can significantly reduce the time spent on the creation of the electrical part of the project, even more potential is hidden in saving time for various adjustments to the project documentation (due to changes in the source data from The customer of the project, the technological part of the object and related sections of the project), the amount of which is not known in advance. In addition, this article identifies areas to expand the existing functionality (calculation of heat dissipation from the equipment, peak starting currents, the choice of backup power sources, etc.).

**Key word:** design, power supply, drawings, diagrams, specifications, Eplan.

Процесс проектирования, за исключением предпроектного исследования, сбора исходных данных, выработки и принятия технического подхода, решения, большей частью представляет собой рутинный труд инженеров-проектировщиков, заключающийся в разработке электрических схем, планов электроснабжения оборудования, планов прокладки кабелей, опросных листов, различных ведомостей и спецификаций. Для облегчения процесса проектирования, снижения затрат на разработку проектной документации применяются различные расчетные и графические программы. Эффект от применения средств автоматизации значительный, но зачастую выходные данные из одной программы/расчетного модуля являются одно-

временно входными данными для другой программы, что при изменении внешних условий приводит к необходимости повторения тех же расчетных операций, что проводились изначально: выгрузка данных (например, план или схема), занесение в другую программу с адаптацией всего чертежа под новый необходимый формат и так далее. Идеальным решением была бы программа, которая автоматически внутри себя могла бы строить схемы, проводить в них электротехнические расчеты кабелей, коммутационной аппаратуры, производить подбор необходимого оборудования, выдавать для него спецификацию и карту заказа, прорисовывать планы прокладки кабелей, считывать с них всю необходимую информацию и проводить

необходимые расчеты. Таким образом, при изменении исходных данных (количество, расположение и мощность электроприемников, условия их прокладки, требования к надежности электроснабжения) в одной программе проводились бы все необходимые перерасчеты, что позволило бы максимально сократить механический труд, повысить производительность труда, снизить количество ошибок.

В части автоматизации схемных электротехнических решений объекта предлагается использование программного комплекса Eplan, представляющего собой программное решение для проектирования, составления документации и управления электротехническими проектами. Структура возможностей данной программы приведена на рисунке 1.

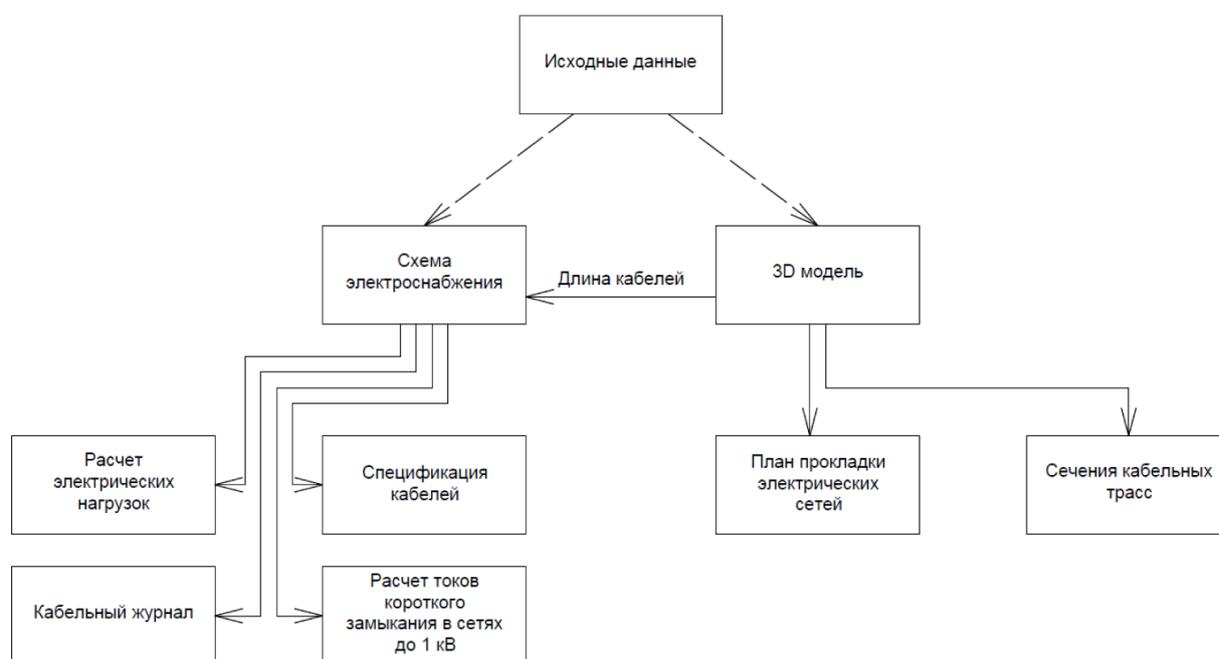


Рисунок 1. Возможности программы Eplan

Первичным при разработке электротехнического раздела проекта является составление принципиальной электрической схемы, на которой отображаются все подключаемые электроприемники, производится распределение нагрузок по щитам, трансформаторным подстанциям, распределительным пунктам и т.д. (рис. 2).

Далее выполняется трассировка кабелей на плане прокладки с привязкой к графическому редактору. Для чертежей в 2D используется программа AutoCad, для выполнения модели в 3D используется программа AVEVA. За счет того, что каждая кабельная линия имеет свое уникальное название, данной линии на плане можно задать ключевые точки (прямые участки, углы, спуски, повороты), к которым эта линия всегда будет иметь привязку. При изменении трассы про-

кладки кабельной линии ввиду изменения внешних условий (необходимость обхода какого-то предмета, изменения расстояния до параллельно прокладываемых коммуникаций) в графическом редакторе проектировщику необходимо изменить только саму трассу, все привязки проложенных по ней кабельных линий изменятся автоматически. При этом формируются обновленные отчетные данные, такие как кабельный журнал (рис. 3), ведомость внешних проводок, спецификация оборудования.

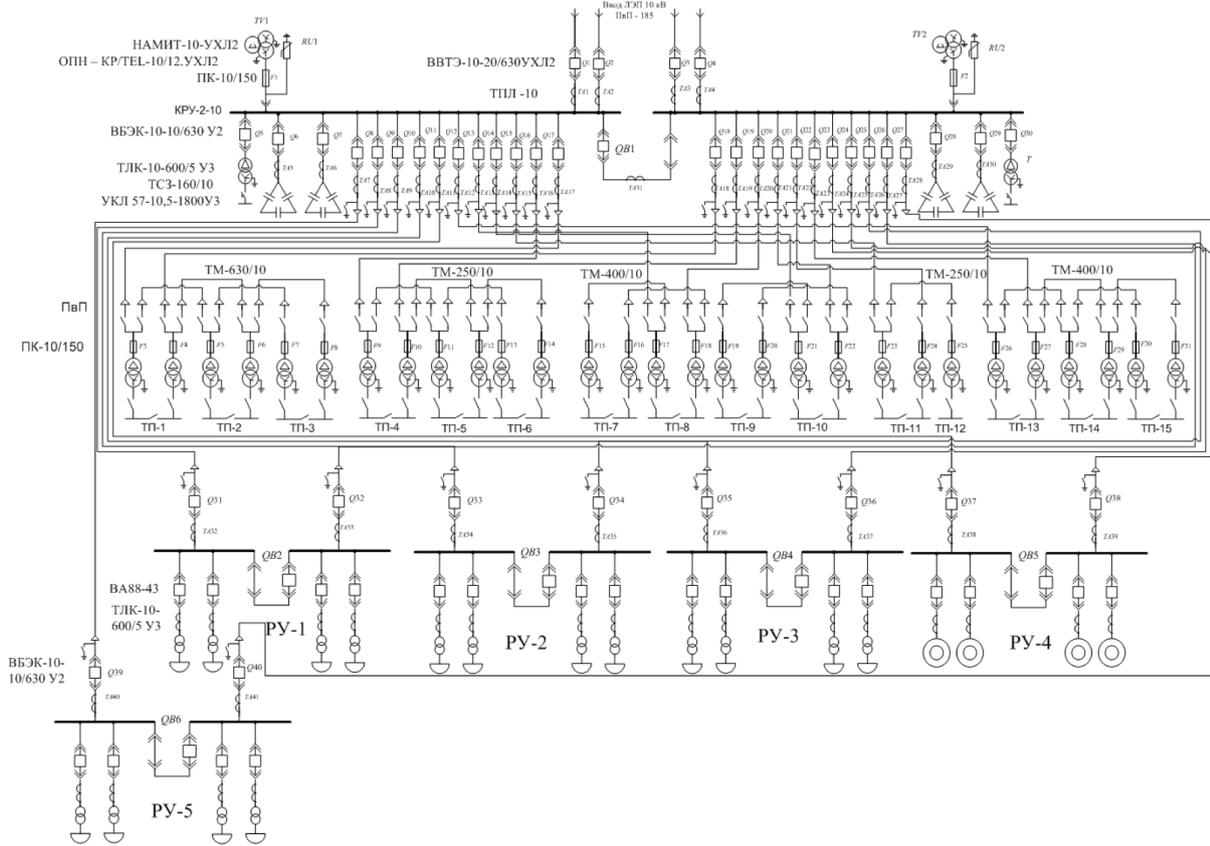


Рисунок 2. Принципиальная электрическая схема

Обозначение кабеля, провода	Трасса		Участок трассы кабеля, провода	Кабель, провод					
	Начало	Конец		по проекту			проложен		
				Марка	Кол. число и сечение жил	Длина, м	Марка	Кол. число и сечение жил	Длина, м
1M1.1	ГРЩ1 секция 1	ККУ	в хранилище	ВВГнг	5x30	15			
1M1.2	ГРЩ1 секция 1	ЩЩМРО сек1	в хранилище	ВВГнг + ПВС	2x(4x120 + 1x70)	15			
1M1.3	ГРЩ1 секция 1	ЩЩМР9	в хранилище	ВВГнг	5x25	63			
1M1.4.1	ГРЩ1 секция 1	ЩЩРО1	в хранилище	ВВГнг	5x10	55			
1M1.4.2	ГРЩ1 секция 1	ЩЩРО2	в хранилище	ВВГнг	5x10	65			
1M1.6	ГРЩ1 секция 1	ЩЩРО3	в хранилище	ВВГнг	5x6	55			
1M1.7	ГРЩ1 секция 1	ЩЩР3	в хранилище	ВВГнг	5x4	55			
1M1.8	ГРЩ1 секция 1	ЩЩС1	в хранилище	ВВГнг	5x10	62			
2M1.11	ГРЩ1 секция 1	ЩЩО4	в хранилище	ВВГнг	5x4	45			
1M1.10	ГРЩ1 секция 1	ЩЩВД	в хранилище	ВВГнг	5x4	43			
1M1.11	ГРЩ1 секция 1	ЩЩМР4	в хранилище	ВВГнг	5x25	52			
1M2.1	ГРЩ1 секция 2	ККУ	в хранилище	ВВГнг	5x30	15			
1M2.2	ГРЩ1 секция 2	ЩЩМРО сек2	в хранилище	ВВГнг	2x(4x120 + 1x70)	15			
1M2.3	ГРЩ1 секция 2	ЩЩМР1	в хранилище	ВВГнг	5x25	53			
1M2.4.1	ГРЩ1 секция 2	ЩЩАО	в хранилище	ВВГнг	5x4	55			
1M2.4.2	ГРЩ1 секция 2	ЩЩАО3	в хранилище	ВВГнг	5x4	52			
1M2.6	ГРЩ1 секция 2	ЩЩМР2	в хранилище	ВВГнг	5x25	46			
1M2.7	ГРЩ1 секция 2	ЩЩСС	в хранилище	ВВГнг	5x4	48			
1M2.8	ГРЩ1 секция 2	ЩЩБК	в хранилище	ВВГнг	5x70	72			
1M2.10	ГРЩ1 секция 2	ЩЩВД	в хранилище	ВВГнг	5x4	48			
1M2.11	ГРЩ1 секция 2	ЩЩНО	в хранилище	ВВГнг	5x4	15			
2M1.1	ГРЩ1 секция 1	ККУ	в хранилище	ВВГнг	5x35	15			
2M1.2	ГРЩ1 секция 1	ЩЩР9	в хранилище	ВВГнг	5x25	89			
2M1.3	ГРЩ1 секция 1	ЩЩМР1	в хранилище	ВВГнг	5x35	75			
2M1.4.1	ГРЩ1 секция 1	ЩЩРО1	в хранилище	ВВГнг	5x6	32			
2M1.4.2	ГРЩ1 секция 1	ЩЩРО2	в хранилище	ВВГнг	5x6	45			
2M1.6	ГРЩ1 секция 1	ЩЩС1	в хранилище	ВВГнг	5x16	70			
2M1.7	ГРЩ1 секция 1	ЩЩЛ	в хранилище	ВВГнг	5x6	80			
2M1.8	ГРЩ1 секция 1	ЩЩМР2	в хранилище	ВВГнг	5x25	40			
2M1.9	ГРЩ1 секция 1	ЩЩПН	в хранилище	ВВГнг	5x16	15			
2M1.10	ГРЩ1 секция 1	ЩЩНО	в хранилище	ВВГнг	5x4	15			
2M2.1	ГРЩ1 секция 2	ККУ	в хранилище	ВВГнг	5x35	15			

Рисунок 3. Кабельный журнал

Использование шаблонов выходных исходных данных позволяет сократить время на оформление результатов, все формируется в формате, пригодном для выпуска документации в печать. При этом происходит автоматическое заполнение основной надписи чер-

тежей, формирование обложки и титульного листа, формирование листа общих данных.

Расчетный модуль Eplan позволяет выполнять для сетей напряжением до 1 кВ:

- расчеты электрических нагрузок с использованием методик института

«Тяжпромэлектропроект», института «Теплоэлектропроект», по коэффициенту спроса, по коэффициенту одновременности и коэффициенту загрузок, по методу токов мгновенного среза;

- расчет токов во всех фазах и в нулевом проводе четырехпроводной сети по заданным нагрузкам;

- расчет фазных и линейных напряжений в каждой точке сети, а также определение наибольших отклонений напряжения в установившемся режиме;

- расчет потоков мощности и потерь мощности во всех элементах сети в установившемся режиме работы;

- расчет пиковых (пусковых) токов, напряжений в каждой точке при протекании пиковых токов;

- определение для каждого элемента сети (переменного и постоянного тока) максимальных значений токов в начальный момент времени при трехфазном и однофазном

коротком замыкании (КЗ) и наибольшего значения ударного тока КЗ, с учетом подпитки от синхронных и асинхронных двигателей с учетом и параметров установившегося режима, предшествующего КЗ;

- определение для каждого элемента сети минимальных токов при однофазном, двухфазном и трехфазном КЗ с учетом сопротивления дуги и с учетом нагревания токоведущих частей рабочим током и током КЗ (учет теплового спада);

- проверку селективности срабатывания защитных аппаратов с зависимой или независимой от тока характеристикой времени срабатывания, а также построение карт селективности;

- автоматизированный выбор уставок автоматов и номинальных токов плавких вставок предохранителей.

Пример результатов расчета приведен на рисунке 4.

Таблица подсчета электрических нагрузок (форма Ф636-92)

N, п.п.	Исходные данные						Расчетные величины			Эффективное число ЭП $N_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}^2}{\sum P_{i1}^2}$	Коэффициент расчетной нагрузки, $K_p$	Расчетная мощность			Расчетный ток, А $I = S_p \cdot I_3 \cdot U_n$
	По заданию технологов				По справочным данным		$K_{\Sigma} \cdot P_{\Sigma}$	$K_{\Sigma} \cdot P_{\Sigma} \cdot \text{tg}\phi$	$P_{\Sigma}^2$			активная, кВт $P_p = K_p \cdot K_{\Sigma} \cdot P_{\Sigma}$	расчетная авар. $S_p = K_p \cdot K_{\Sigma} \cdot P_{\Sigma} \cdot \text{tg}\phi$	полная $S_p = \sqrt{(P_p^2 + S_p^2)}$ / кВтА	
	Наименование характерных категорий ЭП, подключаемых к узлу питания	Кол-во ЭП, шт. n	Номинальная (установленная) мощность, кВт		Кэф. использования, $K_n$	Кэф. реактивной мощности cosф/тгф									
		Одного ЭП, $P_n$	Общая $P_{\Sigma} = P_n \cdot n$												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
<b>Группа I: Технологическая площадка.</b>															
1.1	Бортовой насос заправка	1	22,0	22,0	0,8	0,8/0,75	17,6	13,2	484		18,6	13,9	23,2	35,3	
1.2	Электроподогреватель ЕНТ60	1	2,0	2,0	0,7	1/0	1,4	0	4,0		1,5	0	1,5	2,2	
1.3	Рабочее освещение	1	0,42	0,42	0,85	0,85/0,62	0,357	0,221	0,2		0,377	0,23	0,444	0,7	
1.4	Электроинструмент	1	2,0	2,0	0,3	0,7/1,02	0,6	0,612	4,0		0,634	0,6	0,905	2,4	
1.5	Дистанционный телеметрический блок	1	0,1	0,1	0,25	1/0	0,025	0	0,01		0,026	0	0,026	0,1	
	По группе	5	-	26,52	0,75	0,83/0,67	20,0	14,0	492	1	1,056	22,0	14,8	26,5	40,3

Рисунок 4. Результаты расчета электрических нагрузок

Преимуществом данного программного продукта являются:

- гибкость в настройках;

- возможность интеграции с другими программами;

- минимизация ошибок и сокращение сроков проектирования за счет единообразия оформления чертежей, автоматизированного формирования сводной документации (перечни, спецификации).

Открытость программы для внесения изменений позволяет адаптировать ее под конкретные выполняемые задачи. В перспективе необходима ее доработка и внедрение возможности использования следующего функционала:

- расчет величины тепловыделений в электрооборудовании в заданных помещениях для подготовки и выдачи задания на проекти-

рование систем отопления, вентиляции и кондиционирования;

- расчет времени протекания пиковых (пусковых) токов во всех элементах сети, оценка наибольших отклонений напряжений от номинальных значений при протекании пиковых токов;

- оценка времени работы аккумуляторной батареи;

- определение для каждой точки короткого замыкания времени его отключения основными и резервными защитами по заданным характеристикам срабатывания защитных аппаратов;

- оценка температуры жил проводов и кабелей при рабочих токах и на моменты отключения токов КЗ основными и резервными защитами для проверки кабелей на термическую стойкость и невозгорание;

- автоматический выбор из встроенной базы данных сечений проводов и кабелей, коммутационных и защитных аппаратов;

- автоматизированный выбор аккумуляторной батареи.

Использование Eplan для выполнения схем электроснабжения позволяет значительно снизить количество трудозатрат на проектирование, сократить количество ошибок в проектной документации. По опыту проектирования снижение затрат времени на разработки отдельных документов в Eplan по сравнению с выполнением их при помощи AutoCAD составляет экспертно:

- для схемы электроснабжения – 20 %;

- для расчета токов короткого замыкания (в сетях до 1 кВ) – 40 %;

- для кабельного журнала – 90 %;

- для разработки спецификации оборудования, изделий и материалов – 40 %.

При реализации в программе всего требуемого для проектировщика функционала эти показатели, скорее всего, будут увеличены.

### Список литературы

1. Гишель Б. EPLAN Electric P8. Практическое руководство пользователя. Перевод и адаптация под русскую версию EPLAN Electric P8. – 2009. – 502 с.

2. EPLAN Electric P8. Руководство для начинающих. 2014. 164 с.

3. Климов Д.А. Платформа EPLAN – революция в программном обеспечении для автоматизированного проектирования // Автоматизация проектирования. – 2008. - № 3. – С. 57-60.

4. ГОСТ 2.702-2011 «Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Правила выполнения электрических схем».

5. ГОСТ 21128-83 «Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приёмники электрической энергии. Номинальные напряжения до 1000 В».

### References

1. Gishel' B. EPLAN Electric P8. Prakticheskoe rukovodstvo pol'zovatelja. Pervod i adaptacija pod russkuju versiju EPLAN Electric P8. – 2009. – 502 p.

2. EPLAN Electric P8. Rukovodstvo dlja nachinajushhih. – 2014. – 164 p.

3. KlimovD.A. Platforma EPLAN – revoljucija v programnom obespechenii dlja avtomatizirovannogo proektirovanija // Avtomatizacija proektirovanija. – 2008. - № 3. – P. 57-60.

4. GOST 2.702-2011 «Jedinaja sistema konstruktorskoj dokumentacii (ESKD). Pravila vypolnenija elektricheskikh shem».

5. GOST 21128-83 «Sistemy jelektrosnabzhenija, seti, istochniki, preobrazovateli i prijomniki elektricheskoj energii. Nominal'nye naprjazhenija do 1000 V».



**Шабанов В.А.**  
**Shabanov V.A.**

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



**Пашкин В.В.**  
**Pashkin V.V.**

*инженер-энергетик  
I категории  
ООО «Газпром  
добыча Ямбург»,  
Газпромышленное  
управление,  
г. Новый Уренгой,  
Российская Федерация*



**Ивашкин О.Н.**  
**Ivashkin O.N.**

*электромонтёр по ремонту  
и обслуживанию  
электрооборудования  
V разряда, ООО «Газпром  
добыча Ямбург»,  
Газпромышленное  
управление,  
г. Новый Уренгой,  
Российская Федерация*

УДК 621.31

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-26-32

## **СПОСОБ ПОДХВАТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ И НАСОСНЫХ УСТАНОВОК ПРИ ОБРАТНОМ ВРАЩЕНИИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА**

Электроприводы вентиляционных и насосных установок занимают основную долю в парке производственных электроприводных механизмов нефтегазопромышленных объектов. При эксплуатации вентиляторных и насосных установок в случае отключения электродвигателя от электрической сети нередко встречается вращение рабочего колеса вентилятора или насоса в направлении, обратном направлению вращения в рабочем режиме. Данное явление возникает при наличии противодействия в сети (в трубопроводе, вентиляционном канале, теплообменном оборудовании и т.п.), под действием которого через отключенный и находящийся в технологическом резерве вентилятор или насос происходит движение потока рабочей среды в направлении, противоположном направлению потока в рабочем режиме. Возникающий при этом вращающий момент потока рабочей среды приводит рабочее колесо во вращение в противоположном направлении. В теории гидравлических машин такое обратное вращение вала называется «турбинным вращением» («backspin» – англ.), в аэродинамике вентиляции данный режим принято называть авторотацией. Примером турбинного вращения может служить вращение рабочего колеса погружного электроцентробежного насоса, отключенного от электрической сети, под действием обратного потока скважинной жидкости при неисправности или несрабатывании обратного клапана. Другим примером авторотации является вращение рабочего колеса, находящегося в технологическом резерве вентилятора аппарата воздушного охлаждения (АВО) газа, под действием рециркулирующих потоков воздуха от работающих вентиляторов.

В статье рассматриваются способы подхвата электроприводов вентиляционных и насосных установок при обратном вращении рабочего колеса. Показано, что существующие методы определения начальной скорости и подхвата ротора ориентированы на самозапуск электродвигателя при потере питания, при котором ротор вращается в штатном направлении.

Предложен и исследован на имитационной модели способ подхвата преобразователя частоты, позволяющий определить частоту и направление вращения ротора, и тем самым обеспечить подхват и успешный пуск электродвигателя при обратном направлении вращения.

**Ключевые слова:** частотное регулирование, электропривод, преобразователь частоты, подхват, электродвигатель, авторотация, турбинное вращение, вентилятор, насос, энергосбережение, ресурс.

## METHOD OF PICK UP OF ELECTRIC DRIVES FANS AND PUMPS UNITS WITH BACKSPIN IMPELLER

Electric drives fans and pumps units occupy the main share in the fleet of industrial electric drive mechanisms of oil and gas facilities. During operation of fan and pump installations, there is often a specific problem of rotation of the impeller, disconnected from the electrical network of the fan or pump, in the direction opposite to the direction of rotation in the operating mode. This phenomenon occurs when the back pressure in the network (in the pipeline, ventilation duct, heat exchange equipment, etc.), under the action of which the flow of working medium flows through a fan or pump in the technological reserve in the direction opposite to the direction of flow in operating mode. The resulting torque causes the impeller to rotate in the opposite direction of the operating mode. In the theory of hydraulic machines, the reverse rotation of the shaft is called backspin, in aerodynamics of ventilation this mode is called autorotation.

An example of a turbine rotation is the rotation of the impeller of an electric submersible pump that is disconnected from the electrical network in the event of a power outage under the action of the reverse flow of the well fluid in the event of a malfunction or failure of the check valve. An another example of autorotation is the rotation of the high inertial impeller of the gas in the process reserve of the fan of the air-cooled of gas, under the effect of air flow recirculating from operating fans.

The article discusses ways of picking up electric drives of ventilation and pumping installations during reverse rotation of the impeller. It is shown that the existing methods for determining the initial speed and the pickup of the rotor are focused on the self-starting of the electric motor when power is lost, at which the rotor rotates in the normal direction. A method of picking up a frequency converter was proposed and investigated on a simulation model, which allows determining the frequency and direction of rotation of the rotor, thereby ensuring that the electric motor is picked up and successfully started in the opposite direction of rotation.

**Key words:** frequency regulation, electric drive, frequency converter, rotor pickup, electric motor, autorotation, backspin, fan, pump, energy saving, resource.

При отключении электродвигателя вентиляторной или насосной установки возможно вращение ротора электродвигателя и рабочего колеса приводимого им механизма в направлении, обратном направлению вращения в рабочем режиме. Происходит это под действием вращающего момента, создаваемого обратным потоком рабочей среды. Момент, создаваемый обратным потоком жидкости насоса или рециркулирующим потоком воздуха вентилятора, определяется только энергией потока рабочей среды. Частота вращения рабочего колеса в обратном направлении достигает установившегося значения, при котором момент сопротивле-

ния механизма уравнивает создаваемый обратный вращающий момент. Режим обратного режима может быть длительным и существует, пока присутствует обратный поток рабочей среды [1].

При пуске механизма, вращающегося в обратном направлении, происходит сначала торможение рабочего колеса и затем его последующий разгон до номинальной частоты вращения. В процессе торможения и разгона обратный поток рабочей среды вытесняется возрастающим потоком рабочей среды. В рабочем режиме через механизм весь поток рабочей среды проходит в направлении, соответствующем рабочему режиму,

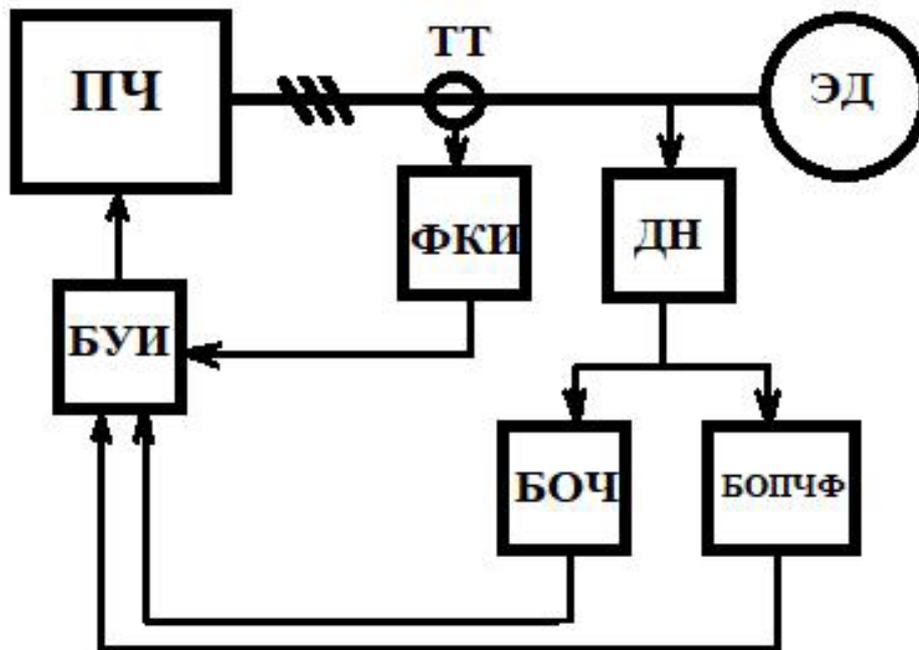
и нагрузка на валу электродвигателя создаётся только моментом сопротивления механизма [2-4].

Существенное количество электроприводов, находящихся на данный момент в эксплуатации, является нерегулируемыми. Для них возможен только прямой пуск. Прямой пуск электродвигателя, рабочее колесо которого имеет обратное вращение, приводит к тому, что электродвигатель оказывается в режиме торможения противовключением, что сопровождается рядом негативных последствий [4, 5]: увеличением пускового тока, увеличением времени протекания пускового тока, увеличением потерь электроэнергии за время пуска и, как следствие, более интенсивным нагревом, возникновением динамических ударов в механической системе. Момент, развиваемый электродвигателем в режиме противовключения, может оказаться недостаточным для преодоления тормозного момента, и пуск может оказаться неуспешным.

Решить проблему вращения рабочего колеса в режиме авторотации можно установкой дополнительных противоревверсных устройств. Но установка дополнительных устройств приводит к снижению надёжности механизма, требует дополнительного обслуживания, а в случае погружного электроцентробежного насоса технически сложна из-за ограниченного диаметра обсадной колонны скважины. Поэтому желательно применять такие решения, которые не снижают надёжность механизма и не приводят к усложнению обслуживания и эксплуатации механизма. Таким решением может быть использование электрического способа торможения, с оптимизацией по критерию минимальных потерь мощности в процессе торможения. В [6] исследовано изменение величины тока электродвигателя и времени торможения в процессе пуска электропривода вентилятора АВО газа в режиме авторотации. В результате моделирования показано, что применение частотного останова позволяет осуществлять торможение с минимальным временем и минимальными потерями мощности.

В целях определения начальной частоты питаемого напряжения при подхвате рабо-

чего колеса необходимо измерение начальной скорости вращения. В технических устройствах [7-9] для измерения скорости вращения устанавливаются дополнительные устройства: тахогенераторы, магниты с радиально намагниченными разнополярными зонами. Установка дополнительных устройств для измерения скорости вращения снижает надёжность АВО газа и не нашла применение на практике. Для определения скорости вращения электродвигателя в [10] предложено прикладывать к статору высокочастотное напряжение, под действием которого по обмоткам статора протекает высокочастотный ток, величина которого пропорциональна частоте вращения ротора. Наиболее интересным является определение частоты вращения ротора путём подачи постоянного тока в две или три фазы обмотки статора, которое реализуется способом подхвата преобразователя частоты [11]. Частота наводимой электродвижущей силы (ЭДС) в обмотке статора электродвигателя при этом равна частоте вращения ротора электродвигателя. Однако при таком способе не определяется направление вращения ротора и не возможно выявить режим авторотации. Для выявления режима авторотации в [12-14] предложено дополнительно к определению наводимой в обмотке статора ЭДС определять последовательность чередования фаз наведенной ЭДС. На рисунке 1 приведена схема устройства, позволяющая определять и частоту, и направление вращения. Если при потере питания направление вращения ротора электродвигателя совпадает с направлением вращения в рабочем режиме, то есть механизм находится в режиме выбега, то происходит подхват и частотный пуск не из состояния покоя, а с той частоты вращения, с которой вращается ротор. При обратном направлении вращения рабочего колеса, т.е. когда механизм вращается в режиме авторотации, происходит подхват и частотное торможение и остановка механизма, после которого производится частотный пуск.



**Рисунок 1.** Структурная схема частотного пуска с определением направления вращения ротора:

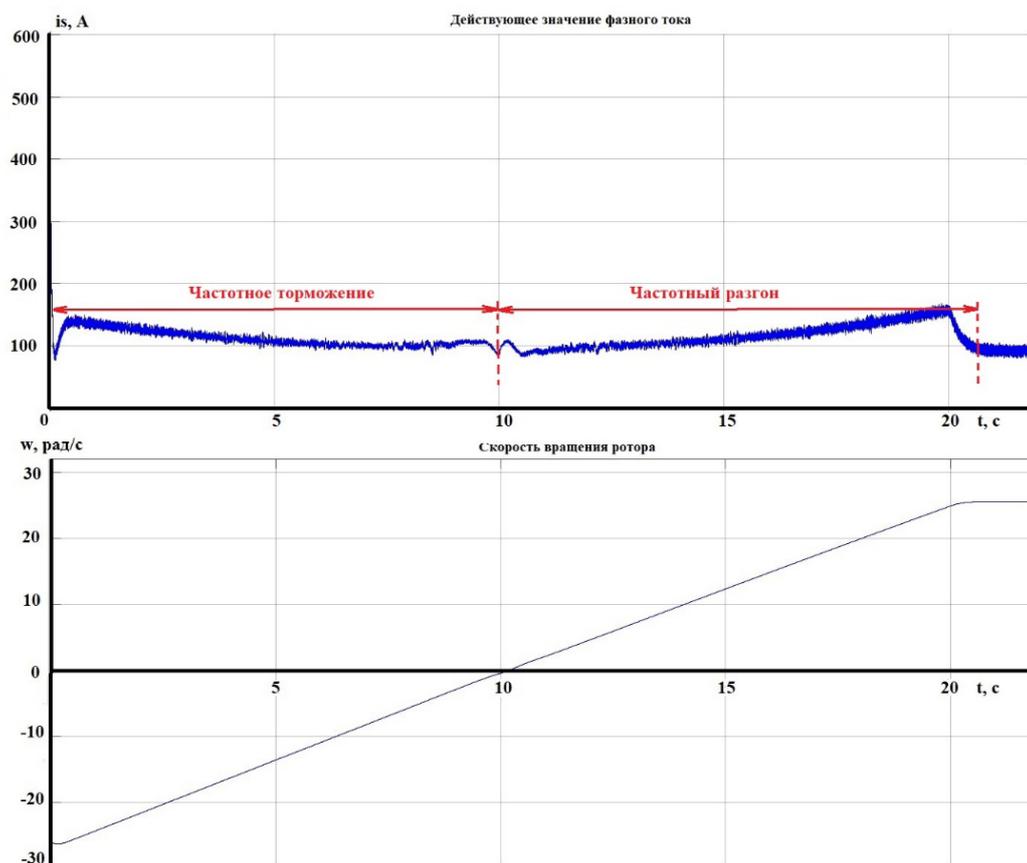
ПЧ – преобразователь частоты, ЭД – электродвигатель, ТТ – трансформатор тока, БУИ – блок управления инвертором, ФКИ – формирователь коротких импульсов, ДН – датчик напряжения, БОЧ – блок определения частоты, БОПЧФ – блок определения последовательности чередования фаз

Перед пуском электродвигателя блок управления инвертором (БУИ) подает сигналы на два транзистора в разных группах (эмиттерная и коллекторная) инвертора и подает в обмотку статора однофазный ток. В двух фазах обмотки статора двигателя нарастает ток, и при превышении током уставки ключи закрываются. При этом в обмотке статора кратковременно протекает однополярный ток – импульс тока. Величина уставки выбирается на уровне, при котором обеспечивается достаточное намагничивание двигателя, чтобы с учётом чувствительности блока определения частоты (БОЧ) и блока определения последовательности чередования фаз (БОПЧФ) обеспечить заданную точность измерения при минимально заданной частоте вращения. Под действием импульса тока статора в роторе двигателя также создается импульс тока. Этот ток в свою очередь создаёт магнитное поле, которое наводит в обмотках статора ЭДС, частота которой равна частоте вращения ротора (умноженной на число пар полюсов), а последовательность чередования фаз определяет направление вращения ротора. Определенное таким образом направление вращения и значение

частоты вращения передается в блок управления инвертором (БУИ). Инвертору задаётся это начальное значение частоты и направление вращения. С этой частоты начинается частотный разгон электродвигателя, если ротор электродвигателя вращается в режиме выбега, или частотное торможение (частотный останов), если ротор вращается обратном направлении [15].

В результате виртуального эксперимента, проведённого на имитационной модели частотно-регулируемого электропривода вентилятора АВО газа, приведённой в [16], получены графики зависимости скорости вращения и фазного напряжения статора от времени при частотном торможении, останове и частотном разгоне.

Как видно из графиков, изображённых на рисунке 2, при «подхвате» ротора при скольжении электродвигателя  $S=2$  (отрицательной скорости вращения, равной по модулю синхронной частоте), при выбранной интенсивности снижения/повышения частоты частотное торможение происходит за  $t_{\text{чт}}=10$  с, дальнейший частотный разгон  $t_{\text{чн}}=12$  с, при этом кратность действующего тока статора



**Рисунок 2.** Графики зависимости действующего фазного напряжения статора скорости вращения от времени при частотном торможении и частотном разгоне

не превышает значения 1,7 на всём временном диапазоне торможения и разгона.

### Выводы

1. В настоящее время при вращении электропривода в обратном направлении подхват и частотный пуск происходит в режиме противовключения с той частоты вращения, с которой вращается ротор. В статье предложен и исследован способ определения скорости и направления вращения рабочего колеса перед пуском АВО газа. При использовании предложенного способа сначала происходит частотный останов электродвигателя путём снижения частоты до нуля и затем частотный пуск с нулевой частоты вращения электродвигателя.

2. Вследствие расширения функциональных возможностей преобразователя частоты дополнением функции определения частоты и направления вращения ротора, перед пуском повышается надёжность электропривода за счет исключения пуска электродвигателя в режиме противовключения, при обрат-

ном вращении рабочего колеса вентиляционного или насосного механизма.

3. В результате имитационного моделирования частотно-регулируемого электропривода вентилятора АВО газа получено, что при предложенном способе подхвата преобразователя частоты успешный пуск осуществляется при любых скоростях обратного вращения ротора, при этом пусковой ток не превышает кратности 1,7.

### Список литературы

1. Шабанов В.А., Пашкин В.В. Оценка увеличения времени пуска электроприводов вентиляционных механизмов в режиме противовключения // Электропривод, электро-технологии электрооборудование предприятий : Сборник научных трудов III Всероссийской научно-технической конференции (с международным участием) / редкол.: В.А. Шабанов и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011. – С. 83-88.

2. Кабаргина О.В., Шабанов В.А., Юсупов Р.З. Выбег насосных агрегатов при наличии противодействия // Электротехнологии, элек

тропривод и электрооборудование предприятий: Сборник научных трудов II Всероссийской научно-технической конференции / редкол.: В.А. Шабанов и др. – Уфа, 2009. – С. 10-18.

3. Пашкин В.В. Проблемы пуска электроприводов аппаратов воздушного охлаждения газа // Проблемы управления и автоматизации технологических процессов и производств : Сборник научных трудов. – Уфа: Издательство УГНТУ, 2010. – С. 246-250.

4. Шабанов В.А., Пашкин В.В. Анализ пуска электроприводов автоматического охлаждения газа в режиме противовключения // Нефтегазовое дело. – 2013. - № 1. – С. 27-36.

5. Шабанов В.А., Пашкин В.В., Ивашкин О.Н. Экспериментальное исследование влияния рециркулирующих потоков воздуха на пусковой ток и время пуска осевого вентилятора // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов : III-й Межвузовский сборник научных трудов, посвященный юбилею кафедры. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2014. – С. 44-45.

6. Шабанов В.А., Пашкин В.В., Ивашкин О.Н. Анализ потерь электроэнергии в электроприводе аппарата воздушного охлаждения газа // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. - № 1. – Т. 10. – С. 18-24.

7. Многодвигательный частотно-регулируемый электропривод: пат. 2326488 РФ / Сидоров П.Г., Александров Е.В., Лагун В.В., заявл. 24.10.06, опубл. 10.06.08, Бюл. № 16.

8. Способ определения скорости вращения погружных асинхронных электродвигателей: пат. 2463612 РФ / Ковалев А.Ю., Ковалева Н.А., Кузнецов Е.М., заявл. 10.02.11, опубл. 10.10.12, Бюл. № 28.

9. Бесконтактный датчик скорости вращения и положения ротора: пат. 2488122 РФ / Загривный Э.А., Фоменко А.Н., Гаврилов Ю.А., Иваник В.В., Губарь Н.С., заявл. 13.02.12, опубл. 20.07.13, Бюл. № 20.

10. Устройство управления и способ управления электрической вращающейся машиной: пат. 2481694 РФ: / Ито Масато, Кимпара Йосихито, Танимото Масанори, заявл. 25.03.09, опубл. 10.05. 13, Бюл. № 13.

11. Способ подхвата преобразователя частоты: пат. № 2462808 РФ / Кузькин В.И.,

Мелешкин В.Н., Московец В.Н., Мясичев С.В., заявл. 15.06.11, опубл. 27.09.12. Бюл. № 27.

12. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н., Шабанов В.А. Определение скорости вращения асинхронного электродвигателя, вращающегося под действием рециркулирующего потока воздуха // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов : II Межвузовский сборник научных трудов (с международным участием). – Уфа, 2016.

13. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н. Способ пуска частотно-регулируемого электропривода вентиляторных установок в режиме авторотации // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий : Сборник научных трудов III Международной (VI Всероссийской) научно-технической конференции / редкол.: В.А. Шабанов и др. – Уфа, 2017.

14. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н., Шабанов В.А. Применение функции «подхвата» преобразователя частоты для пуска электроприводов вентиляторных установок в режиме авторотации // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов : V Межвузовский сборник научных трудов. – Уфа, 2018.

15. Пашкин В. В. Способ подхвата преобразователя частоты / В.В. Пашкин [и др.]: Пат. РФ № 2 656 846 С1, Заявлено 10.04.2017. Опубл. 07.06.2018. Бюл. № 16.

16. Ивашкин О.Н., Пашкин В.В., Шабанов В.А. Моделирование процесса пуска электропривода АВО газа в режиме противовключения // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий : Сборник научных трудов I Международной (IV Всероссийской) НТК // Нефтегазовое дело. – 2013. – С. 127-133.

## References

1. Shabanov V.A., Pashkin V.V. Ocenka uvelichenija vremeni puska elektroprivodov ventiljacionnyh mehanizmov v rezhime protivovkljuchenija // Elektroprivod, elektrotehnologii elektrooborudovanije predpriyatij : Sbornik nauchnyh trudov III Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoj konferencii (s mezhdunarodnym uchastiem) / redkol.:

- V.A. Shabanov i dr. – Ufa: Izd-vo UGNTU, 2011. – P. 83-88.
2. Kabargina O.V., Shabanov V.A., Jusupov R.Z. Vybeg nasosnyh agregatov pri nalichii protivodavlenija // Elektrotehnologii, elektroprivod i elektrooborudovanie predpriyatij : Sbornik nauchnyh trudov II Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii / redkol.: V.A. Shabanov i dr. – Ufa, 2009. – P. 10-18.
3. Pashkin V.V. Problemy puska elektroprivodov apparatov vozdushnogo ohlazhdenija gaza // Problemy upravlenija i avtomatizacii tehnologicheskikh processov i proizvodstv : Sbornik nauchnyh trudov. – Ufa: Izdatel'stvo UGNTU, 2010. – P. 246-250.
4. Shabanov V.A., Pashkin V.V. Analiz puska elektroprivodov avtomaticheskogo ohlazhdenija gaza v rezhime protivovkljuchenija // Neftegazovoe delo. – 2013. - № 1. – P. 27-36.
5. Shabanov V.A., Pashkin V.V., Ivashkin O.N. Eksperimental'noe issledovanie vlijanija recirkulirujushhijh potokov vozduha na puskovoj tok i vremja puska osevogo ventiljatora // Povyshenije nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotehnicheskikh sistem i kompleksov : III Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov, posvjashhennyj jubileju kafedry. – Ufa: Izd-vo UGNTU, 2014. – P. 44-45.
6. Shabanov V.A., Pashkin V.V., Ivashkin O.N. Analiz poter' elektroenergii v elektroprivode apparata vozdushnogo ohlazhdenija gaza // Elektrotehnicheskije i informacionnyje komplekxy i sistemy. – 2014. - № 1. – vol. 10. – P. 18-24.
7. Mnogodvigatel'nyj chastotno-reguliruemyj elektroprivod: pat. 2326488 RF / Sidorov P.G., Aleksandrov E.V., Lagun V.V., zajavl. 24.10.06, opubl. 10.06.08. Bjul. № 16.
8. Sposob opredelenija skorosti vrashhenija pogruzhnyh asinhronnyh elektrodvigatelej: pat. 2463612 RF / Kovalev A. Ju., Kovaleva N. A., Kuznecov E., M., zajavl. 10.02.11, opubl. 10.10.12, Bjul. № 28.
9. Beskontaktnyj datchik skorosti vrashhenija i polozhenija rotora: pat. 2488122 RF / Zagrivnyj Je.A., Fomenko A.N., Gavrilov Ju.A., Ivanik V.V., Gubar' N.S., zajavl. 13.02.12, opubl. 20.07.13, Bjul. № 20.
10. Ustrojstvo upravlenija i sposob upravlenija elektricheskoy vrashhajushhejsja mashinoy: pat. 2481694 RF: / Ito Masato, Kimpara Josihito, Tanimoto Masanori, zajavl. 25.03.09, opubl. 10.05. 13, Bjul. № 13.
11. Sposob podhvata preobrazovatelja chastoty: pat. № 2462808 RF / Kuz'kin V.I., Meleshkin V.N., Moskovec V.N., Mjasishhev S.V., zajavl. 15.06.11, opubl. 27.09.12, Bjul. № 27.
12. Pashkin V.V., Ivashkin O.N., Shabanov V.A. Opredelenie skorosti vrashhenija asinhronnogo elektrodvigatelja, vrashhajushhegsja pod dejstviem recirkulirujushhego potoka vozduha // Povyshenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotehnicheskikh sistem i kompleksov : II Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov (s mezhdunarodnym uchastiem). – Ufa, 2016.
13. Pashkin V.V., Ivashkin O.N. Sposob puska chastotno-reguliruemogo elektroprivoda ventiljatornyh ustanovok v rezhime avtorotacii // Elektroprivod, elektrotehnologii i elektrooborudovanie predpriyatij : Sbornik nauchnyh trudov III Mezhdunarodnoj (VI Vserossijskoj) nauchno-tehnicheskoy konferencii / redkol.: V.A. Shabanov i dr. – Ufa, 2017.
14. Pashkin V.V., Ivashkin O.N., Shabanov V.A. Primenenie funkcii «podhvata» preobrazovatelja chastoty dlja puska elektroprivodov ventiljatornyh ustanovok v rezhime avtorotacii // Povyshenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotehnicheskikh sistem i kompleksov : V Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov. – Ufa, 2018.
15. Pashkin V.V. Sposob podhvata preobrazovatelja chastoty / V.V. Pashkin [i dr.]: Pat. RF № 2 656 846 S1, Zajavleno 10.04.2017 Opubl. 07.06.2018. Bjul. № 16.
16. Ivashkin O.N., Pashkin V.V., Shabanov V.A. Modelirovanie processa puska elektroprivoda AVO gaza v rezhime protivovkljuchenija // Elektroprivod, elektrotehnologii i elektrooborudovanie predpriyatij : Sbornik nauchnyh trudov I mezhdunarodnoj (IV Vserossijskoj) NTK // Neftegazovoje delo. – 2013. – P. 127-133.



**Линенко А.В.**  
**Linenko A.V.**

доктор технических наук, профессор,  
декан энергетического факультета  
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный  
аграрный университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Сираев Ш.Ф.**  
**Siraev Sh.F.**

старший преподаватель кафедры  
«Электроснабжения и применения элек-  
трической энергии в сельском хозяйстве»  
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный  
аграрный университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Азнагулов А.И.**  
**Aznagulov A.I.**

аспирант кафедры «Электрических  
машин и электрооборудования»  
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный  
аграрный университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Лукьянов В.В.**  
**Luk'yanov V.V.**

аспирант кафедры «Электрических  
машин и электрооборудования»  
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный  
аграрный университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация

УДК 629.3.07

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-33-40

## **МЕХАТРОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МАШИННО-ТРАКТОРНЫМ АГРЕГАТОМ С БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ**

Повысить производство продукции растениеводства можно за счет внедрения системы точного земледелия, где важным является обеспечить точность движения машинно-тракторного агрегата (МТА) до нескольких сантиметров по навигационным спутниковым системам. Такую точность может обеспечить подруливающее устройство, в котором электродвигатель постоянного тока через механический преобразователь по сигналам блока управления обеспечивает поворот рулевого колеса на требуемый угол. Наличие дополнительных механиче-

ских связей между рулевым колесом и ротором электродвигателя негативно сказывается на точности управления агрегатом, надежности и стоимости подруливающего устройства. В работе предложен мехатронный модуль, состоящий из двух частей, который позволяет увеличить быстродействие автоматической системы управления, упростить конструкцию и снизить ее стоимость. В механической части мехатронного модуля использован бесколлекторный двигатель постоянного тока (БКДПТ), ротор которого является составной частью рулевого колеса. Изменение положения ротора является поворотом рулевого колеса без промежуточных механизмов. Позиционирование ротора осуществляется с помощью трех дискретных датчиков Холла, установленных на статоре. Разработана и реализована в программе DIP TRACE принципиальная схема драйвера БКДПТ, которая реализована на базе микроконтроллера Atmel AT90PWM3, представлена часть программного кода функции прерывания по датчикам Холла. Получена динамическая зависимость скорости вращения ротора двигателя при разных моментах сопротивления на рулевом колесе. Временная стабилизация частоты вращения не превышает 0,3 секунды.

Внедрение мехатронной системы для управления МТА с использованием навигационных систем позволит уменьшить эксплуатационные затраты (на семена – до 15 %, на химикаты и топливо – не менее 10 %), снизить утомляемость оператора и увеличить производительность труда (возможность работы в ночное время, а также в условиях плохой видимости). Простой монтаж подруливающего устройства обеспечивает быструю его установку на любую отечественную и импортную технику.

**Ключевые слова:** мехатронная система, подруливающее устройство, точное земледелие, параллельное вождение, машинно-тракторный агрегат, электропривод, бесколлекторный двигатель постоянного тока, датчик Холла, пид-регулятор, микроконтроллер.

## MECHATRONIC SYSTEM FOR AUTOMATIC CONTROL OF A MACHINE-TRACTOR UNIT WITH A SCREW-FREE ELECTRIC MOTOR

It is possible to increase crop production by introducing a system of precision farming, where it is important to ensure the accuracy of movement of the machine-tractor unit (MTA) to a few centimeters in navigation satellite systems. Such accuracy can be provided by the thruster, in which the DC motor, through a mechanical converter, according to the signals of the control unit, ensures the steering wheel to turn to the required angle. The presence of additional mechanical connections between the steering wheel and the rotor of the electric motor adversely affects the accuracy of the control unit, the reliability and cost of thruster. The paper proposed a mechatronic module consisting of two parts, which allows you to increase the speed of the automatic control system, simplify the design and reduce its cost. In the mechanical part of the mechatronic module, a brushless DC motor is used, the rotor of which is an integral part of the steering wheel. Changing the position of the rotor is turning the steering wheel without intermediate mechanisms. The rotor is positioned using three discrete Hall sensors mounted on the stator. The DIP TRACE program has been developed and implemented in the BKDPT driver, which is based on the Atmel AT90PWM3 microcontroller, and presents a portion of the program code for the interrupt function by Hall sensors. The dynamic dependence of the rotation speed of the rotor of the engine at different points of resistance on the steering wheel. The time stabilization of the rotation speed does not exceed 0.3 seconds.

The introduction of a mechatronic system for controlling the MTA using navigation systems will reduce operating costs (up to 15% for seeds, chemicals and fuel not less than 10%), reduce operator fatigue and increase labor productivity (ability to work at night, as well as in bad conditions visibility). Simple installation of the thruster ensures its quick installation on any domestic and imported equipment.

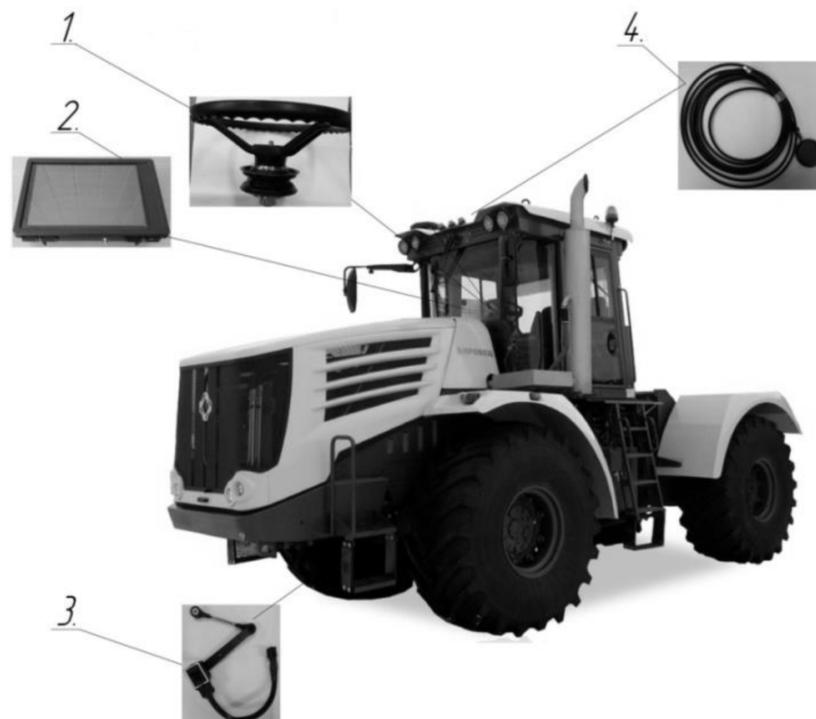
**Key words:** mechatronic system; thruster; precision farming; parallel driving; machine and tractor unit; electric drive; brushless DC motor; Hall Sensor; PID-regulator; microcontroller.

Практическое отсутствие цифровых технологий в сельском хозяйстве (менее 10 % от всех технологических операций) является сдерживающим фактором повышения производства продукции. В системе точного земледелия необходимо обеспечить параллельное вождение машинно-тракторного агрегата (МТА) с высокой точностью (0-25 см) [2].

Одним из сдерживающих факторов повышения точности и надежности подруливающего устройства МТА является наличие механических подвижных составляющих в структуре его привода [3]. Механические составляющие (редукторы, механизм подвода электропривода к рулевому колесу) увеличивают себестоимость подруливающего устройства, значительно усложняют и сни-

жают его точность, что сказывается на надежности.

Тенденция развития систем автоматического управления МТА заключается в повышении ее точности и надежности при одновременном уменьшении энергопотребления и снижении стоимости. Для решения поставленных вопросов предлагается оснастить МТА мехатронным модулем, который включает в себя аппаратно-программный комплекс с микропроцессорной системой управления, а также бесколлекторный электропривод рулевого колеса, в котором ротор является валом рулевого колеса, а движение МТА осуществляется по спутниковым сигналам системы ГЛОНАСС (рис. 1).

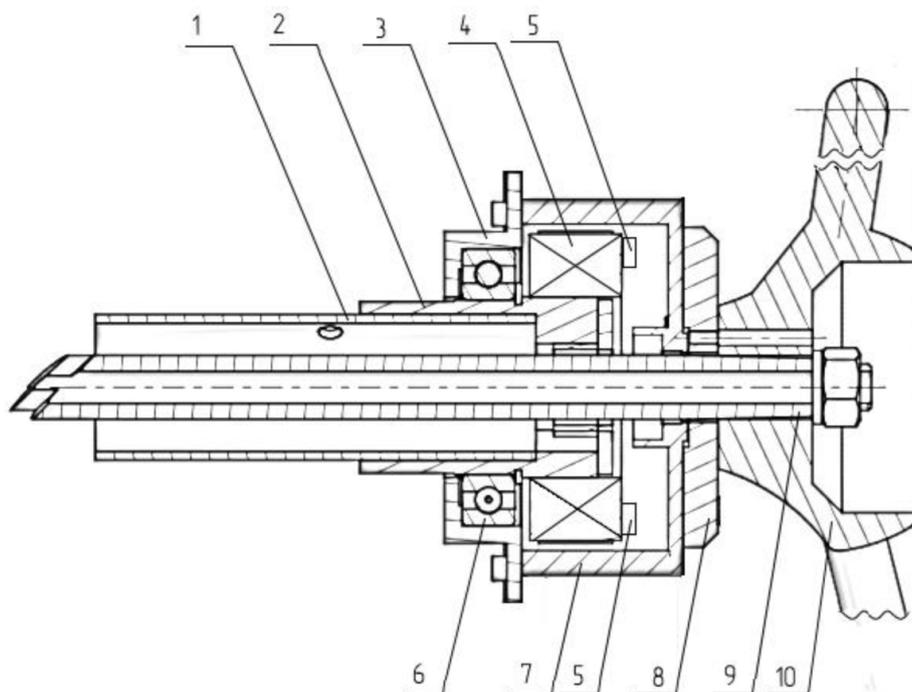


**Рисунок 1.** Расположение оборудования мехатронной системы для управления машинно-тракторным агрегатом с использованием ГЛОНАСС навигации:  
1 – подруливающее устройство; 2 – курсоуказатель; 3 – датчик угла поворота колес;  
4 – высокоточная антенна с магнитным основанием

Мехатронная система управления МТА – это система, образованная конструктивным слиянием электрической машины с рабочим органом (рулевым колесом) для осуществления заданного движения МТА под управлением интеллектуальной системы.

В качестве воздействующего механизма на рулевое колесо в структуре мехатронного модуля использован бесколлекторный двигатель постоянного тока (БКДПТ) с датчиками

Холла (рис. 2). Статор 4 БКДПТ жестко закреплен на рулевой колонке 1. Рулевое колесо 10 жестко соединено с ротором 7 БКДПТ, который, в свою очередь, также зафиксирован на рулевой колонке посредством подшипника 6 с возможностью вращения.



**Рисунок 2.** Механическая часть мехатронного модуля подруливающего устройства с БКДПТ: 1 – рулевая колонка, 2 – фланец сердечника статора, 3 – корпус подшипника, 4 – статор, 5 – датчики Холла, 6 – подшипник, 7 – ротор, 8 – фланец ротора, 9 – вал рулевого колеса, 10 – рулевое колесо

БКДПТ для мехатронного модуля является наиболее подходящим типом электропривода постоянного тока, в котором регулирование скорости и момента вращения осуществляется подводимым напряжением и углом опережения включения фаз. Он обладает регулировочными качествами машин постоянного тока и надежностью систем переменного тока [1].

БКДПТ по принципу действия и рабочим характеристикам близок к коллекторному двигателю постоянного тока, а благодаря исключению коллектора имеет высокую надежность и долговечность, требует меньших расходов на обслуживание. Кроме того, БКДПТ имеет возможность осуществления бесконтактного реверса без вмешательства в силовые цепи привода (увеличением угла опережения либо реверсом двух фаз в цепях датчика положения ротора).

Конструктивно БКДПТ состоит из ротора (1) с постоянными магнитами и статора (2) с обмотками, которые соединяются звездой. На статоре имеются датчики Холла, необходимые для определения положения ротора относительно статора. Статор, состоящий из нескольких секций, позволяет стабилизировать вращающийся

момент на низких оборотах работы двигателя.

Управление осуществляется по принципу частотного регулирования, т.е. управление инвертором преобразователя частоты осуществляется в функции углового положения ротора двигателя. Программная реализация данного подхода содержит контур управления скоростью с помощью ПИД-регулятора. Такой регулятор состоит из трех звеньев, каждый из которых характеризуется собственным коэффициентом передачи:  $K_n$  – коэффициент передачи пропорционального звена,  $K_i$  – коэффициент передачи интегрирующего звена и  $K_d$  – коэффициент передачи дифференцирующего звена (рис. 3) [4].

Отклонение требуемой скорости от фактической («ошибка рассогласования») обрабатывается каждым из звеньев, результат операций суммируется и подается на двигатель для получения желаемой частоты вращения.

Коэффициент  $K_n$  влияет на длительность переходного процесса, коэффициент  $K_i$  позволяет подавить статические ошибки, а  $K_d$  используется для стабилизации положения ротора.

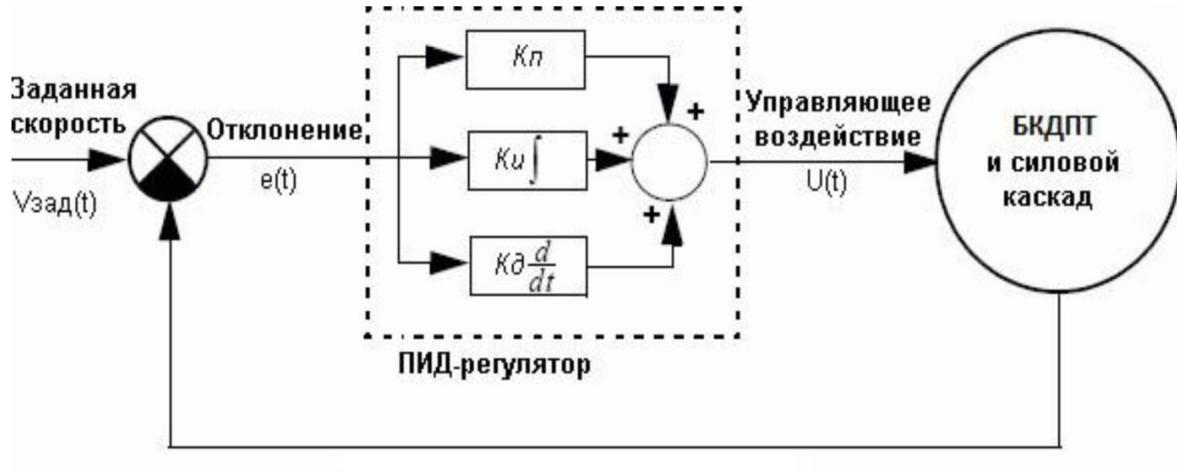


Рисунок 3. Структурная схема ПИД-регулятор БКДПТ

Как показано на функциональной схеме (рис. 4), контроллер содержит 3 силовых каскада. Каждый силовой каскад работает как широтно-импульсный модулятор с двумя выходными сигналами. Во избежание воз-

никновения короткого замыкания в силовых каскадах поддерживается возможность управления задержкой момента включения с помощью драйвера двигателя для каждой пары силовых ключей.



Рисунок 4. Функциональная схема управления БКДПТ

Для измерения тока используются два дифференциальных канала с программируемым усилительным каскадом ( $K_y=10$ ). Номинал шунтового резистора для наиболее полного охвата диапазона преобразования составляет 0,05 Ом. Сигнал «Токовая перегрузка» формируется внешним компаратором. Пороговое напряжение компаратора

регулируется с помощью внутреннего цифро-аналогового преобразователя.

Для управления БКДПТ используется силовой каскад, состоящий из 3 полумостов, каждое плечо которого управляется отдельным драйвером. Принципиальная схема драйвера составлена в программе DIPTRACE (рис. 5).

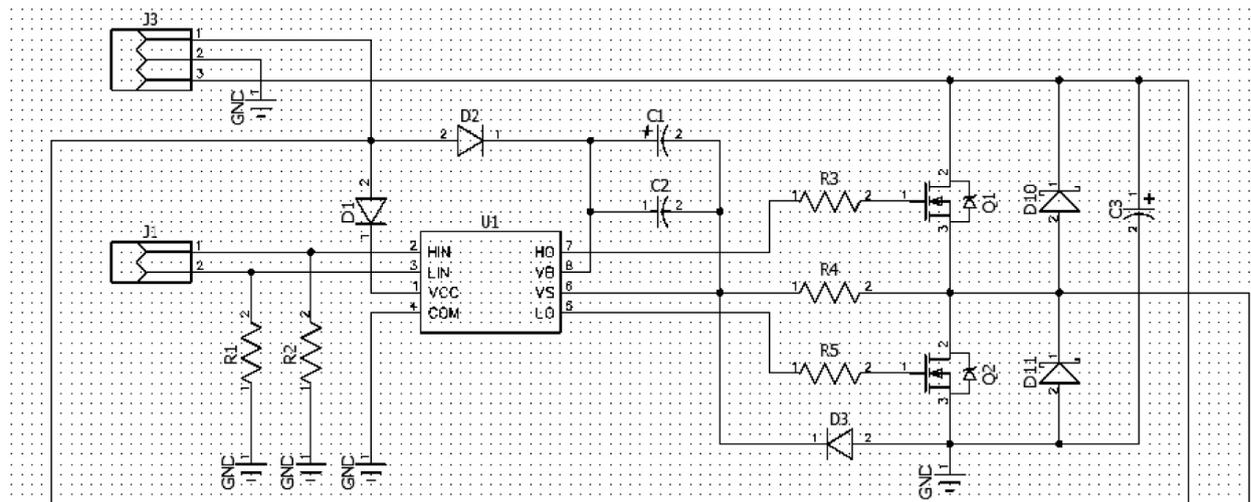


Рисунок 5. Принципиальная схема драйвера БКДПТ

Рассматриваемый БКДПТ работает на дискретных датчиках Холла [5]. На один электрический оборот датчики Холла выдают комбинацию из 3 логических сигналов в виде меандры сдвинутых по фазе на 120 электрических градусов. Для управления фазами

двигателя используется разнополярная 6-тактная парная коммутация, порядок коммутации представлен в таблице 1. Переключение фаз происходит через каждые 60 электрических градусов.

Таблица 1. Порядок коммутация ключей

Значение датчиков Холла	Фаза
101	А-В
001	А-С
011	В-С
010	В-А
110	С-А
100	С-В

Система управления БКДПТ подруливающего устройства разработана на базе микроконтроллера фирмы Atmel. Часть программного кода (функция прерывания по датчикам Холла) представлена в листинге 1.

В результате экспериментального определения коэффициентов ПИД-регулятора получен оптимальный режим работы БКДПТ для подруливающего устройства. Динамическая зависимость скорости вра-

щения ротора БКДПТ, при разных значениях момента силы сопротивления на рулевом колесе, полученная в результате экспериментального моделирования работы подруливающего устройства, представлена на рисунке 6.

**Листинг 1. Функция прерывания по датчикам Холла**

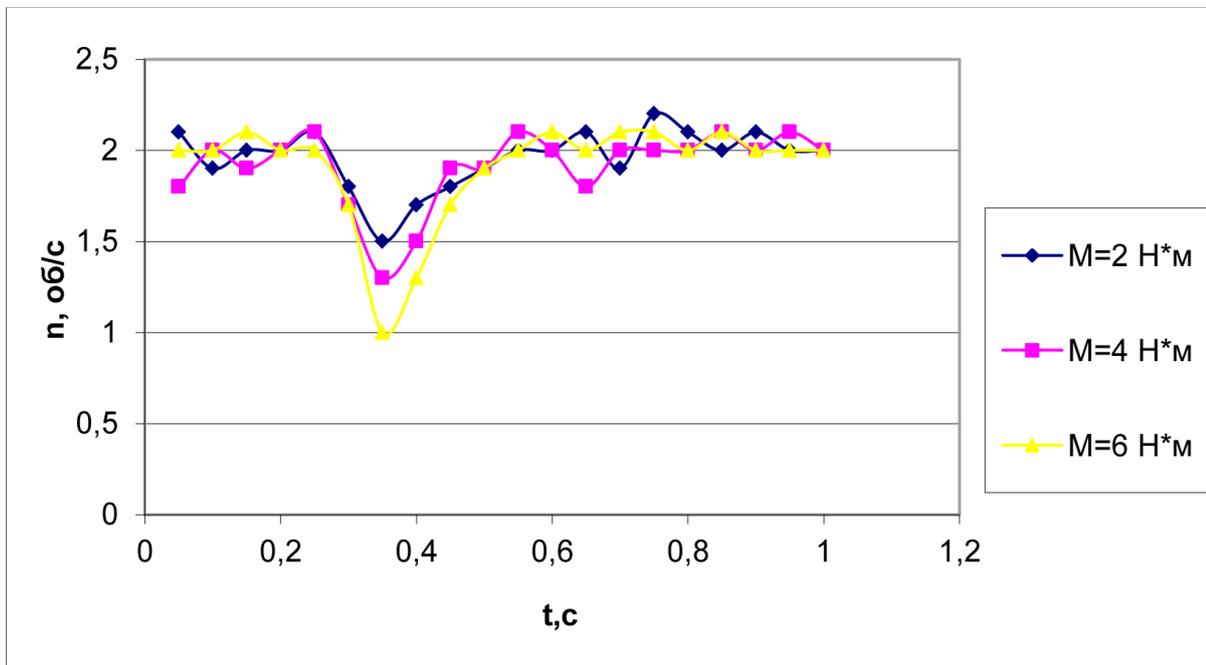
```

// Обработчик внешнего прерывания INT0.
ISR(INT0_vect) {
    _delay_us(100);
    if((PIND & ( 1 <<PD2)) == 0) {
        _delay_us(100);
        // Крутим против часовой стрелки
        if((PIND & ( 1 <<PD1)) == 0)
        {
            if(motor_pwm != START_PWM) motor_pwm -= 5;
        }
        // Уменьшаем ШИМ
    }
    // Крутим по часовой стрелке
    else
    {
        if(motor_pwm != 255) motor_pwm += 5;
    }
    // Увеличиваем ШИМ
}
}}

```

Как видно из графика, скорость вращения ротора БКДПТ стабилизируется на требуемом значении в течение не более 0,3

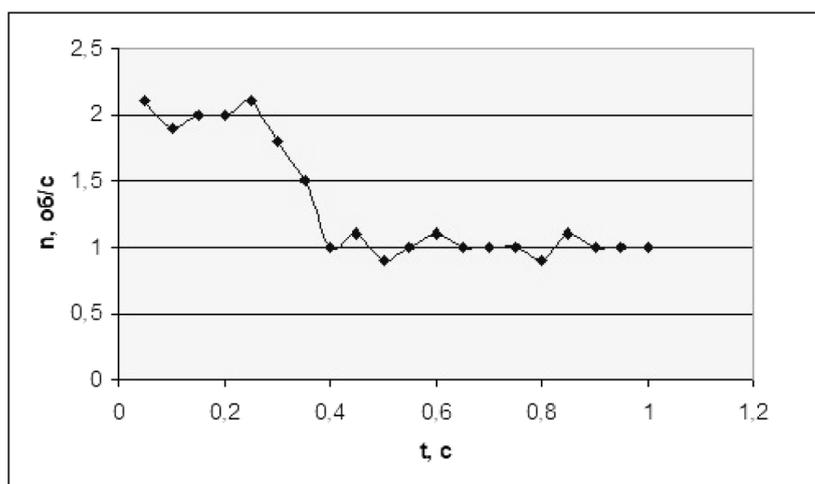
секунд, с момента воздействия тормозящей силы разных значений.



**Рисунок 6.** Динамическая зависимость скорости вращения ротора БКДПТ при разных значениях тормозящего момента на рулевом механизме

График, представленный на рисунке 7, показывает, что «время реакции» предложенной системы для подруливающих устройств составляет не более 0,25

секунд, что более чем достаточно для подруливающих устройств.



**Рисунок 7.** Пример переходного процесса изменения скорости вращения ротора БКДПТ при подруливании

Предложен мехатронный модуль для автоматического управления МТА, который включает механическую и интеллектуальную системы. Механическая система представлена бесколлекторным двигателем постоянного тока с датчиками Холла, причем статор двигателя жестко установлен на неподвижной рулевой колонке трактора, а его ротор соединен с рулевым колесом. В интеллектуальную систему входит аппаратно-программный комплекс с микропроцессорным управлением. Аппаратная часть реализована с микропроцессором фирмы Atmel.

#### Список литературы

1. Ильинский Н.Ф. Перспективы развития регулируемого электропривода. – *Электричество*. – 2003. – № 2. – С. 3-7.
2. Труфляк Е.В. Основные элементы системы точного земледелия. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – 39 с.
3. Патент на полезную модель № 183287 Исполнительное устройства для автоматического управления машино-тракторным агрегатом / А.В. Линенко, А.И. Азнагулов, М.М. Ямалетдинов. № 2018114392; заявл. 18.04.18; опубл. 17.09.18 с.
4. Dorf P., Bishop R. Современные системы управления / Пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
5. Герасимов В.Г., Кузнецов Э.В., Николаева О.В. Электротехника и электроника. – Кн. 2. Электромагнитные устройства и электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1997. — 288 с.

#### References

1. Il'inskij N.F. Perspektivy razvitiya regulirujemogo elektroprivoda // *Elektrichestvo*. – 2003. – № 2. – С. 3-7.
2. Truffljak E.V. Osnovnye elementy sistemy tochnogo zemledelija. – Krasnodar: KubGAU, 2016. – 39 p.
3. Patent na poleznuju model' № 183287 Ispolnitel'noje ustrojstva dlja avtomaticheskogo upravlenija mashino-traktornym agregatom / A.V. Linenko, A.I. Aznagulov, M.M. Jamaletdinov. № 2018114392; zajavl. 18.04.18; opubl. 17.09.18 p.
4. Dorf P., Bishop R. Sovremennyje sistemy upravlenija / Per. s angl. B.I. Kopylova. – M.: Laboratorija bazovyh znaniy, 2002. – 832 p.
5. Gerasimov V.G., Kuznecov Je. V., Nikolaeva O.V. Elektrotehnika i elektronika. – Vol. 2. Elektromagnitnyje ustrojstva i elektricheskije mashiny. — M.: Energoatomizdat, 1997. — 288 p.



**Саттаров Р.Р.**  
**Sattarov R.R.**

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



**Зиганшин Т.Р.**  
**Ziganshin T.R.**

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

УДК 621.313

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-41-51

## **АНАЛИЗ РЕЖИМА ХОЛОСТОГО ХОДА В ЭКРАНИРОВАННОМ ТОРЦЕВОМ СИНХРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ С ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫМИ ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

В работе исследуются бесконтактные экранированные синхронные генераторы (БЭСГ) с постоянными магнитами (ПМ) для поплавоквой волновой электрической станции (ПВЭС), которая предназначена для эксплуатации в прибрежных морских и океанических зонах. Конструктивные и эксплуатационные особенности ПВЭС обуславливают необходимость в герметичном исполнении БЭСГ с ПМ. Отличительной особенностью БЭСГ с ПМ для ПВЭС от традиционных синхронных генераторов является экран, выполненный с целью защиты активных элементов БЭСГ от воздействий морской воды и соленого тумана. Предложена конструкция герметичного БЭСГ с ПМ для использования в составе ПВЭС. Разработана математическая модель, и произведен анализ режима холостого хода БЭСГ с ПМ с учетом действия индуцированных в экране токов. Получены зависимости результирующего магнитного потока и выходной ЭДС от скорости вращения для различных экранов, отличающихся материалом и геометрией. В частности, исследованы экраны из следующих материалов: титан, медь и керамика.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, экранированные электрические машины, экран, керамический экран, бесконтактные синхронные генераторы, постоянные магниты

## **ANALYSIS OF THE NO-LOAD STEADY MODE IN A SHIELDED FACE SYNCHRONOUS GENERATOR WITH HIGH-COERCIVE PERMANENT MAGNETS**

The contactless shielded synchronous generators (BESG) with permanent magnets (PM) for a float wave power plant (FWPP) are studied in the work. The BESG is intended for operation in coastal marine and oceanic zones. Constructive and operational features of FWPP determine the need for a shielded design of BESG with PM. A distinctive feature of BESG with PM for FWPP from traditional synchronous generators is the shield that made to protect the active elements of

BESG from the effects of seawater and salt fog. The design of a hermetic sealed BESG with PM for use in FWPP is proposed. A mathematical model had been obtained and an analysis of the no-load steady mode of the BESG with PM had been made taking into account the action of currents induced in the shield. The dependences of the resulting magnetic flux and the output EMF on the rotational speed are obtained for various shields that differ in material and geometry. In particular, shields from the following materials had been investigated: titanium, copper and ceramics.

**Key words:** synchronous generator, shielded electrical machines, shield, ceramic shield, contactless synchronous generators, permanent magnets

Одним из интересных направлений развития альтернативной энергетики является использование энергии волн для электропитания промышленных и жилых объектов. Важной практической задачей для реализации поплавковых волновых электростанций является разработка электро-механических преобразователей энергии (далее – ЭМПЭ), позволяющих значительно повысить эффективность использования энергии волн. В частности, к таким ЭМПЭ относятся бесконтактные синхронные экранированные генераторы (БЭСГ) с постоянными магнитами (ПМ). Для каждого типа ЭМПЭ характерны свои конструкционные особенности, обусловленные областью их применения и характеристиками окружающей среды. Активное внедрение альтернативных решений [1-4] в установках, преобразующих кинетическую энергию мирового океана в электрическую, показывает необходимость разработки и применения специальных герметичных генераторов.

В настоящее время современные решения в области защиты, экранирования активных частей генераторов первую очередь направлены на химическую промышленность, где существует целый ряд вопросов, таких как коррозионная стойкость, взрывоопасная среда, критичные температуры. В области же генерирующих энергоустановок, работающих в морской среде, такие решения изучены мало. Перспективной разработкой в области современных эффективных преобразователей кинетической энергии волны является поплавок-волновая электростанция [5]. Для данных электростанций необходимо разработать и реализовать оптимальные конструктивные решения БЭСГ на основании исследований герметичных генераторов с экраном.

Основные требования для герметичного генератора в составе ПВЭС [5]:

1. Оптимальные массо-габаритные показатели.

2. Герметичная конструкция статора генератора.

3. Возможность применения высокоэффективных постоянных магнитов в конструкции ротора.

4. Аксиальная (торцевая) конструкция.

Как показано в [7-10], для обеспечения наилучших массогабаритных и энергетических показателей наиболее эффективным конструктивным решением будет генератор с возбуждением от постоянных магнитов. Это связано с простотой конструкции, отсутствием скользящих контактов, возможностью многопакетного исполнения, лучшим охлаждением активной части из-за расположения тепловыделяющих узлов вблизи периферийных поверхностей машины. Торцевые синхронные генераторы дают существенный выигрыш по занимаемому пространству за счет приближения электрической машины к рабочему механизму. Малый аксиальный габарит генератора, с возбуждением от постоянных магнитов, дает возможность обеспечить конструктивную совместимость их с рядом механизмов (мультиплексоров), компактность и удобство эксплуатации, что особенно актуально для ПВЭС.

В данной работе исследуется БЭСГ с ПМ для поплавок-волновой электрической станции, которая предназначена для эксплуатации в прибрежных морских и океанических зонах. Конструктивные и эксплуатационные особенности ПВЭС обуславливают необходимость в герметичном исполнении БЭСГ с ПМ. Отличим БЭСГ с ПМ для ПВЭС от традиционных синхронных генераторов является экран, выполненный с целью защиты активных элементов БЭСГ от воздействий морской воды и соленого тумана. Использование электропроводного материала экрана (например, из титанового сплава)

в конструкции БСГ с ПМ является причиной возникновения дополнительного магнитного потока (реакция вихревых токов) в БЭСГ, направленного на снижение (магнитного потока постоянных магнитов) и, соответственно, выходных мощностных характеристик генератора. В настоящее время также могут использоваться неэлектропроводные, немагнитные экраны (материал – керамика FrialitFZM [11]) для генераторов, двигателей, работающих в сложных химических и физических условиях. Подобные экраны имеют высокую механическую прочность, тем самым могут выполняться крайне малой толщины – до 0,5 мм. Применение керамических экранов из материала FRIALITFZM незначительно увеличивает магнитный зазор между ротором и статором генератора, тем самым результирующий магнитный поток также снижается.

Одним из аспектов развития конструкции электрических генераторов является принцип трансформации [12] конфигурации. Цель данного принципа трансформации – повышение эффективности использования областей электропроводящих и магнитопроводящих частей генератора.

Трансформация представлена в следующем приоритетном ряду: цилиндрическая конфигурация (ЦК), далее однослойная дисковая конфигурация (ДК), далее многослойная дисковая конфигурация (МДК), далее аксиально-радиальная дисковая конфигурация. Преобразование ЦК в однослойную ДК на примере двигателя с магнитоэлектрическим возбуждением представлено на рисунке 1.

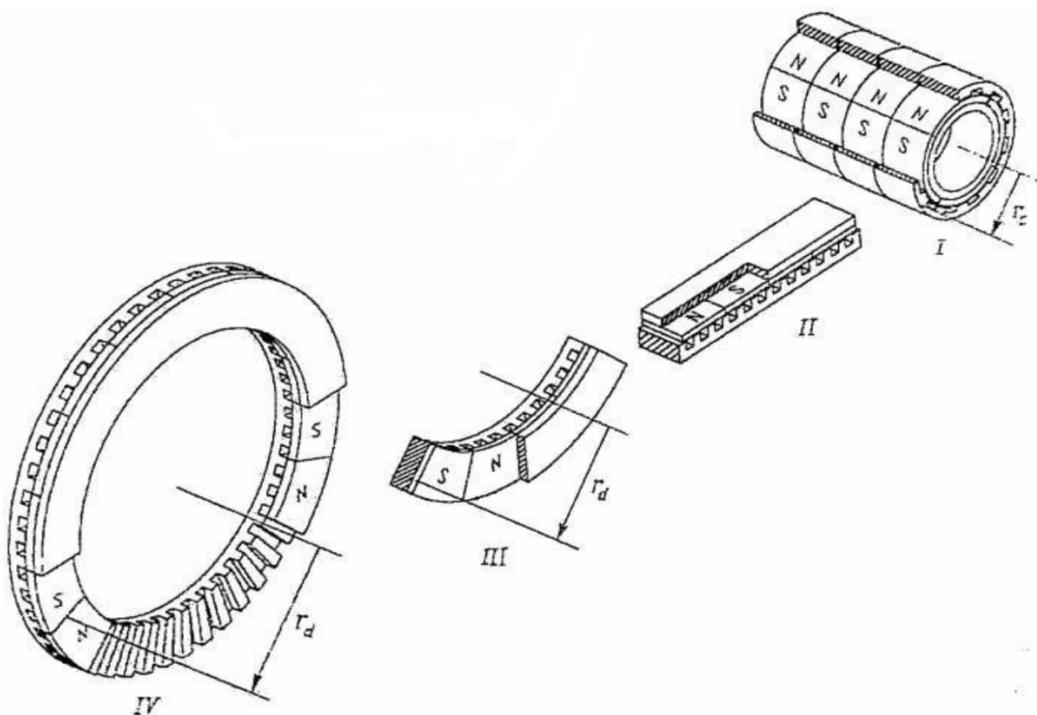
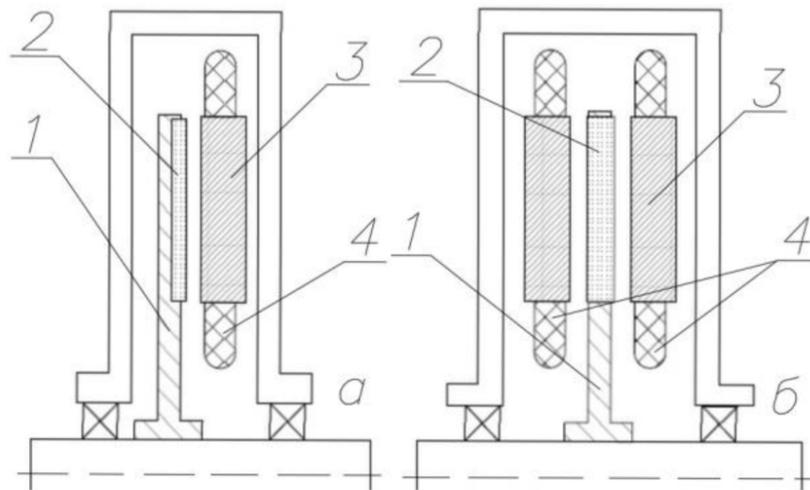


Рисунок 1. Трансформация от дисковой конструкции к цилиндрической и наоборот

На рисунке 1 показан вариант цилиндрического двигателя, состоящего из четырех сегментов, расположенных в аксиальном направлении. Один из сегментов может быть трансформирован в линейный двигатель (II), если осуществить его развертку по длине окружности с радиусом  $r_c$ . Изгибом линейного двигателя вдоль боковой стороны по радиусу  $r_d$  получается сегмент (III). Четыре таких сегмента образуют дисковый двигатель (IV). Аналогично может быть проведена

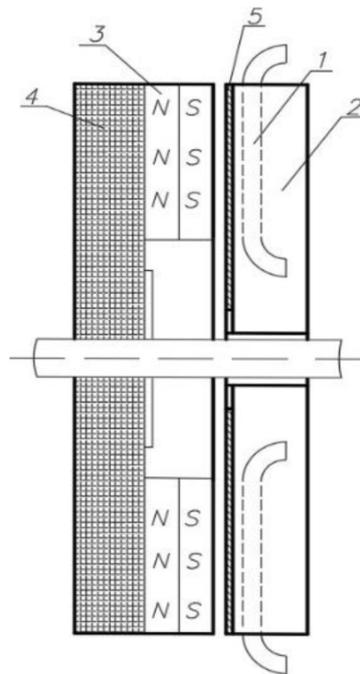
трансформация от дисковой машины к цилиндрической. Электромагнитный момент двигателя дисковой конфигурации возрастает с увеличением радиуса приложения сил и может достигать двукратных и более высоких значений по сравнению с традиционной компоновкой двигателей цилиндрической конструкции эквивалентного объема.



**Рисунок 2.** Типовые конструкции дисковых генераторов

Типовые конструкции дисковых генераторов в схематическом виде [13-17], в порядке

возрастания от однопакетных к многопакетным структурам, представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Схема-эскиз бесконтактного синхронного экранированного генератора с постоянными магнитами: 1 – основание ротора, 2 – сердечник ротора (ферромагнетик или постоянный магнит), 3 – сердечник статора, 4 – обмотки статора

Однослойная конструкция (рис. 3) представлена одним статорным диском и одним роторным диском (а), двухслойная – двумя статорными дисками и одним роторным (б) или двумя роторными дисками и одним статорным. Также существуют многослойные конструкции, где два статорных диска и три роторных. Каждый из статорных дисков имеет тороидальную форму и содержит плоские обмотки управления (и возбуждения), размещенные в пазах и создающие аксиально

направленную МДС. Для замыкания магнитного потока на крайних статорных и роторных дисках имеются дополнительные ферромагнитные ярма кольцеобразной формы.

По аналогии с трансформацией конструкции из торцевой электрической машины в цилиндрическую, могут быть трансформированы и подходы к классическому электромагнитному расчету.

Анализ экранированного БСГ с ПМ производится в режиме холостого хода.

Рассматриваются традиционные методики электромагнитных расчетов, учитывающие влияние материала экрана БСГ с ПМ на выходные характеристики генератора.

В основу расчетной модели принимается однороторный однопакетный тип бесконтактного синхронного генератора с независимым возбуждением от высококоэрцитивных постоянных магнитов. Конструкция представляет собой подвижный ротор (4) с закрепленными высококоэрцитивными аксиально намагниченными постоянными магнитами (3), неподвижный статор (2) с медной обмоткой (1), залитыми немагнитным компаундом, с экраном (5) из электропроводного титан (Ti) или неэлектропроводного (FrialitFZM) материала. ПМ прикреплены к ротору с помощью немагнитной арматуры и защищены антикоррозийным покрытием. Немагнитная рама статора компенсирует действие радиальных сил и препятствует повреждению ротора.

**Постановка задачи**

Задача сводится к анализу влияния магнитных потоков, создаваемых реакцией экрана в двух случаях:

- немагнитный неэлектропроводный материал (FrialitFZM);
- немагнитный электропроводящий материал титан (Ti).

Для сравнения также будет исследован экран из материала с большой электропроводимостью – медь (Cu).

Допущения:

- магнитная проницаемость во всей области между статором и ротором равна прони-

цаемости вакуума, магнитная проницаемость постоянных магнитов постоянна, магнитная проницаемость железа статора равна бесконечности;

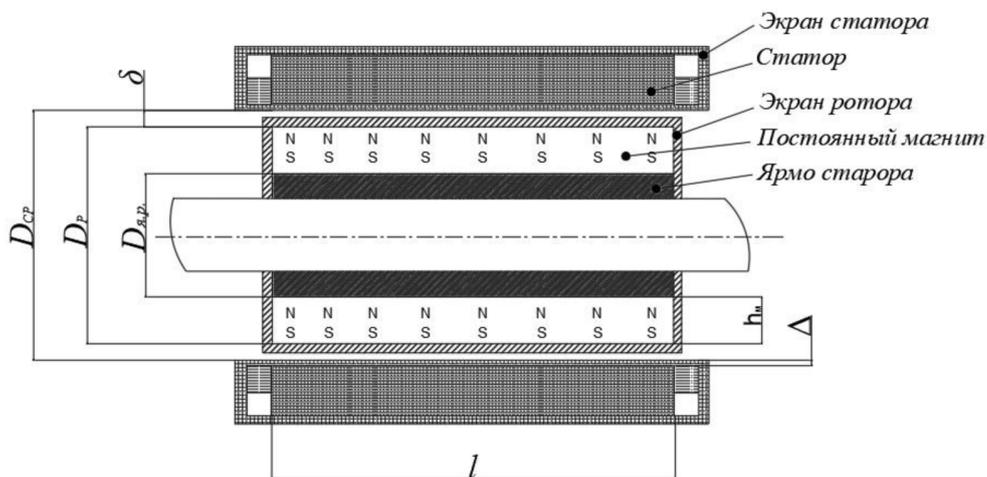
- экран ротора в первом варианте выполнен из неэлектропроводного материала, толщина экрана входит в величину воздушного зазора;
- экран ротора во втором варианте выполнен из электропроводного материала, толщина экрана входит в величину воздушного зазора;

– БСГ с ПМ работает в симметричном установившемся режиме, то есть апериодическая составляющая токов экрана ротора отсутствует;

– индуктивное сопротивление по оси равняется индуктивному сопротивлению по оси. Принятые допущения являются стандартными для задач подобного класса и не вносят значительных погрешностей, а влияние некоторых может быть учтено особо [18].

Распределение магнитного поля в экранированном торцевом синхронном генераторе с высококоэрцитивными постоянными магнитами имеет объемный характер. Данные электрические машины не были достаточно исследованы из-за сложностей использования математических методов трехмерного описания геометрии для выполнения ряда традиционных электромагнитных расчетов [19, 20].

Для дальнейшего решения поставленной выше задачи будем использовать схему, представленную на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Расчетная схема, сегмент БЭСГ с ПМ

### Режим холостого хода БЭСГ с ПМ, материал экрана неэлектропроводный (FrialitFZM)

Рассмотрим режим холостого хода, вариант с применением экрана, в том случае если он выполнен из неэлектропроводного материала (FrialitFZM). Диэлектрические свойства данного материала предполагают полное отсутствие вихревых токов. Вследствие чего продольная и поперечная составляющие  $H_{aq}$

и  $H_{ads}$ , а также соответствующие им магнитные потоки  $\Phi_{aq}$  и  $\Phi_{aq}$  можно не учитывать. Ввиду вышеизложенного магнитный поток на холостом ходу равен потоку ПМ:

$$\underline{\Phi}_0 = \Phi_M, \quad (1)$$

Векторная диаграмма ЭБГ при холостом ходе с учетом принятых допущений имеет вид, показанный на рисунке 5.

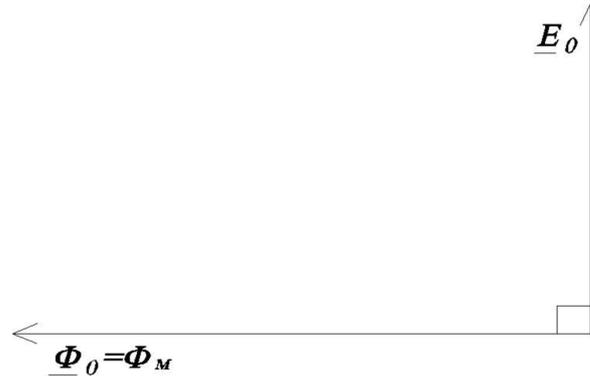


Рисунок 5. Векторная диаграмма БЭСГ с ПМ при холостом ходе, материал экрана неэлектропроводный

Магнитодвижущая сила может быть определена следующим образом [19, 20]:

$$F_M = H_c l_a, \quad (2)$$

где  $H_c$  – коэрцитивная сила постоянного магнита;  $l_a$  – активная длина постоянного магнита.

Индукция на поверхности магнитов при холостом ходе определяется следующим образом [19]:

$$B_{\Pi 0} = \frac{B_r}{\left(1 + \frac{B_r}{\mu_0 H_c \sigma_0} \frac{\delta k_\delta}{h_M}\right)} \sigma_0, \quad (3)$$

где  $B_r$  – остаточная магнитная индукция постоянного магнита;  $\delta$  – воздушный зазор;  $D$  – диаметр ротора;  $k_\delta$  – коэффициент, учитывающий зубцы статора;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость;  $\sigma_0$  – коэффициент, учитывающий рассеивание магнита;  $\mathcal{D}$  – среднее значение воздушного зазора;  $H_c$  – коэрцитивная сила ПМ;  $h_M$  – толщина магнита.

Магнитный поток при холостом ходе [19, 20]:

$$\Phi_0 = \Phi_M = \frac{l_a b_M B_r}{l_c \sigma_0} l', \quad (4)$$

где  $l_c$  – активная длина статора;  $l_a$  – активная длина постоянного магнита;  $b_M$  – ширина постоянного магнита;  $l' = \frac{l_a + l_c}{2}$  – средняя активная длина.

Для упрощения далее примем, что активные длины статора и постоянного магнита совпадают и равны  $l$ . Тогда магнитный поток постоянного магнита будет

$$\Phi_M = l b_M \frac{B_{\Pi 0}}{\sigma_0}. \quad (4)$$

ЭДС БЭСГ с ПМ тогда определится как:

$$\underline{E}_0 = -j\omega \underline{\Phi}_0. \quad (5)$$

### Режим холостого хода БЭСГ с ПМ, материал экрана электропроводный

Рассмотрим применение электропроводного экрана, который является причиной дополнительных потерь и магнитного потока реакции в БЭСГ с ПМ, направленного на снижение основного потока возбуждения.

Векторная диаграмма экранированного бесконтактного генератора при холостом ходе представлена на рисунке 6.

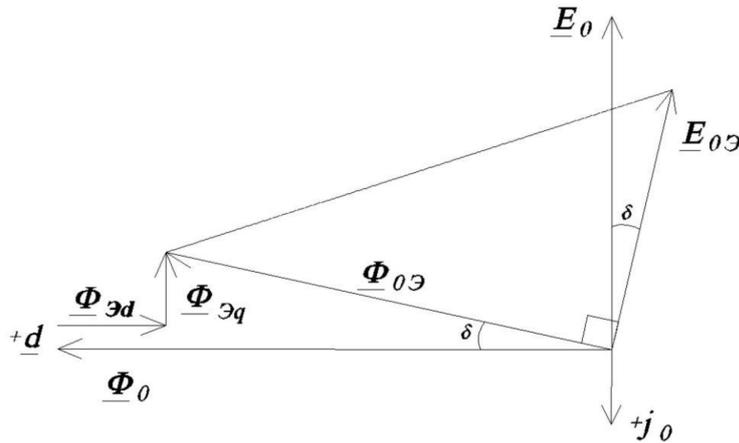


Рисунок 6. Векторная диаграмма БЭСГ с ПМ при холостом ходе, материал экрана электропроводный

Из векторной диаграммы можно записать следующее выражение:

$$\Phi_{0Э} = \sqrt{(\Phi_0 - \Phi_{Эд})^2 + \Phi_{Эq}^2}, \quad (6)$$

$$\delta = \arctg \frac{\Phi_{Эq}}{\Phi_0 - \Phi_{Эд}}.$$

Средняя по толщине экрана напряженность вторичного магнитного поля [21]:

$$H_{cp} = -\frac{B_{П0}}{\mu_0} \frac{j\varepsilon}{1+j\varepsilon}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon = \frac{\mu_0 \sigma \omega}{\alpha^2} k_z$  – магнитное число Рейнольдса;  
 $k_z = \frac{\Delta}{\delta K_\delta K_\mu}$ ;  $\Delta$  – толщина экрана статора;  
 $\alpha = \frac{\pi}{\tau}$ ;  $\tau$  – коэффициент полюсного перекрытия;  $\omega$  – угловая скорость магнитного поля относительно оболочки;  $\sigma$  – электропроводность экрана;

$$k_d = 1 - \frac{\text{th} \alpha \frac{\Delta}{2}}{\alpha \frac{\Delta}{2} \left( 1 + \frac{1 - A \text{th} \alpha \frac{\Delta}{2}}{A - \text{th} \alpha \frac{\Delta}{2}} \text{th} \alpha \frac{\Delta}{2} \right)}, \quad (8)$$

$$A = \frac{1 + \text{th} \alpha \frac{\delta}{2}}{\mu_0} \frac{\delta}{1 + \frac{1}{\mu_0} \text{th} \alpha \frac{\delta}{2}}. \quad (9)$$

Определяются продольная и поперечная составляющие напряженности поля реакции экрана и соответствующие им магнитные потоки, приходящиеся на полюс [3]:

$$\Phi_{aqэ} = \frac{\pi D_{cp}}{2p} l \cdot \mu_0 H_{Эq} = -j\tau l B_{П0} \frac{\varepsilon k_d}{1 + \varepsilon^2 k_d^2}, \quad (10)$$

$$\Phi_{adэ} = \frac{\pi D_{cp}}{2p} l \cdot \mu_0 H_{Эd} = -\tau l B_{П0} \frac{\varepsilon^2 k_d^2}{1 + \varepsilon^2 k_d^2}, \quad (11)$$

где  $D_{cp}$  – средний диаметр экрана;  $l$  – осевая длина экрана, которая принята равной длине статора и постоянных магнитов.

Тогда с учетом (10), (11) выражение (12) можно переписать в виде:

$$\frac{\Phi_p}{\Phi_M} = \sqrt{\left( 1 - \frac{\sigma_0}{\alpha_{ПМ}} \frac{\varepsilon^2 k_d^2}{1 + \varepsilon^2 k_d^2} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_0}{\alpha_{ПМ}} \frac{\varepsilon k_d}{1 + \varepsilon^2 k_d^2} \right)^2}, \quad (12)$$

где  $\alpha_{ПМ} = \frac{b_m}{\tau}$  – коэффициент полюсного перекрытия.

Видно, что поток в относительных единицах определяется только одним безразмерным параметром и тремя коэффициентами.

По выражению (12) для анализа и теоретической оценки математической модели были произведены расчеты в программной среде Mathcad15

На рисунке 7 показаны кривые результирующего магнитного потока  $\Phi$  относительно числа Рейнольдса  $\mathcal{E}$  при различных значениях полюсного перекрытия  $\alpha$ . При значении  $\alpha=0,6$  видно, что с ростом  $\mathcal{E}$  результирующий поток  $\Phi$  снижается незначительно и достигает уровня 0,825 о.е., со значения

$\alpha = 0,7$  достигает уровня 0,575 о.е., далее  $\alpha = 0,9$  поток  $\Phi$  достигает уровня 0,25 о.е. наблюдается значительное снижение, где при

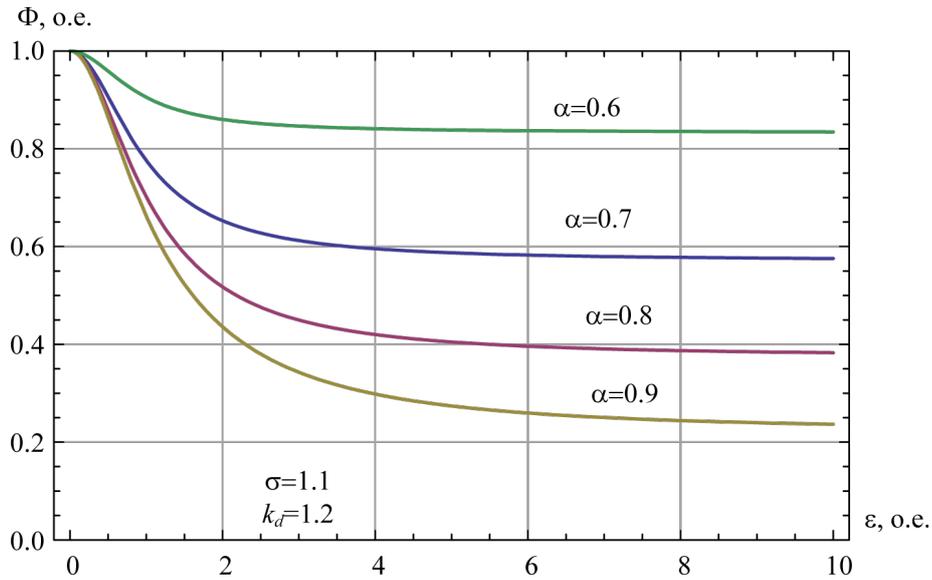


Рисунок 7. Кривые значения результирующего магнитного потока  $\Phi$

На рисунке 8 представлены кривые значения выходного ЭДС относительно частоты вращения ротора  $n$ . Толщина для всех вариантов материала экрана принята 3 мм. Можно наблюдать, что значение ЭДС в случае, если экран изготовлен из титана (Ti), начинает снижаться с момента достижения значения 0,75 о.е. частоты оборотов  $n$  и далее, с ростом  $n$ , при значении  $E_{о.е.}$ , равном 1,5, разница составляет 13 %, а при значении  $E_{о.е.}$ , равном 2, разница уже составляет 16 % относительно

экрана, выполненного из материала FrialitFZM. Также для наглядности представлена кривая при описания зависимости  $E$  от  $n$ , когда экран изготовлен из меди (Cu), уменьшение значения выходного ЭДС относительно неэлектропроводного материала экрана FrialitFZM, при  $n$ , равной 1,0  $E = 0,2$  (снижение на 80 %), а при значении  $n$ , равной 2,0,  $E = 0,48$  (снижение в полтора раза).

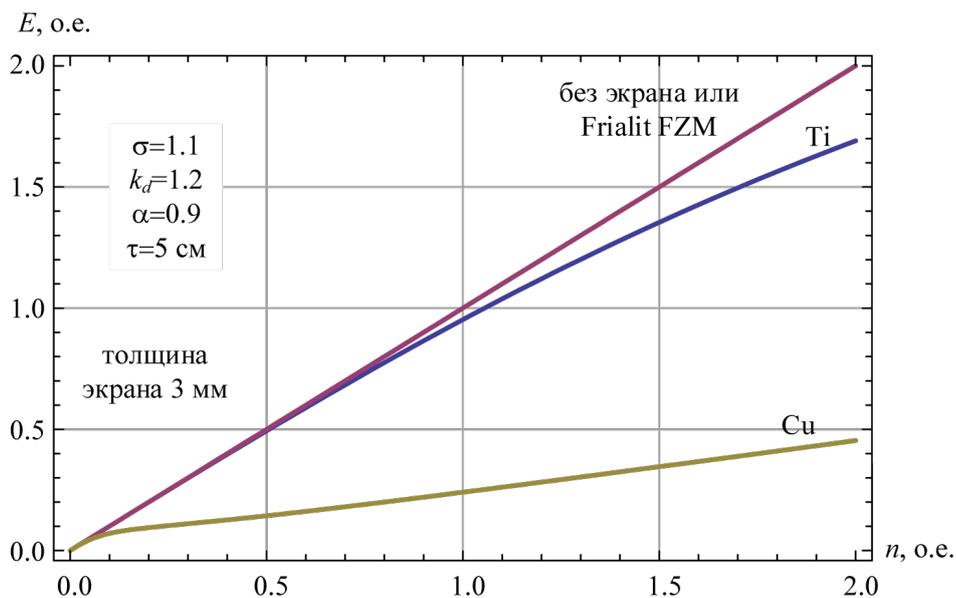


Рисунок 8. Кривые значения ЭДС относительно частоты вращения ротора

Ниже на рисунке 9 представлены зависимости, когда для всех вариантов материала экрана толщина принимается 0,5 мм. В данном варианте видно, что значения  $E_{o.e.}$  для вариантов материалов экрана, титана (Ti) и FrialitFZM, относительно частоты вращения ротора одинаковы, в диапазоне при  $n$ , равной от 0 до 2 о.е. Также представлена

кривая значения  $E_{o.e.}$ , для варианта, когда экран выполнен из меди (Cu), и, как видно из рисунка 9, значение выходного ЭДС превосходит значение показанного на рисунке 8 и при  $n$ , равной 1,9 о.е., значение  $E_{o.e.} = 1,1$ , ниже на 42 % относительно значения при использовании неэлектропроводного материала экрана FrialitFZM.

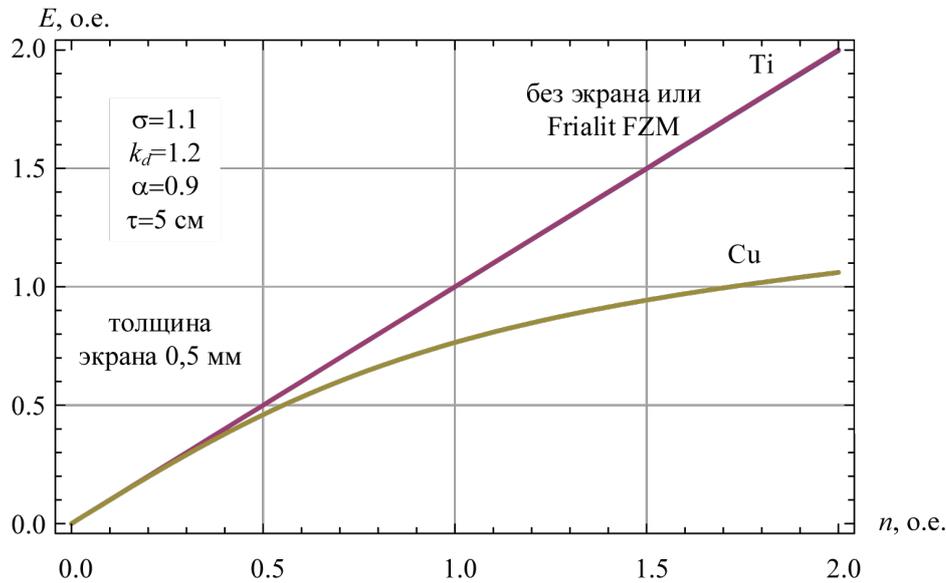


Рисунок 9. Кривые значения ЭДС относительно частоты вращения оборотов в минуту

Таким образом, в работе определены основные параметры математической модели БЭСГ с ПМ при режиме холостого хода, с учетом процессов, протекающих в экране. Проанализированы выходные характеристики синхронного генератора БЭСГ с ПМ с вариантами электропроводного титана (Ti), меди (Cu) и неэлектропроводного FrialitFZM (материалов экранов).

### Выводы

1. Толщина экрана статора значительная.

Современный и новаторский материал экрана FrialitFZM не оказывает влияние на выходные характеристики синхронного генератора БЭСГ с ПМ, фактически увеличивает толщину зазора между ротором и статором.

Более традиционный материал, который применяют в электрических машинах в качестве экрана, титан (Ti) снижает выходные характеристики синхронного генератора БЭСГ с ПМ на 16 % относительно материала экрана FrialitFZM.

Классический материал медь (Cu), в качестве экранирующего, оказался самым неэф-

фективным, выходные характеристики синхронного генератора БЭСГ с ПМ относительно материала экрана FrialitFZM снижались на 80 и более процентов.

2. Толщина экрана статора незначительная.

В данном случае материал экрана FrialitFZM не оказывает влияние на выходные характеристики синхронного генератора БЭСГ с ПМ. Фактически увеличивает толщину зазора между ротором и статором. Титан (Ti) при данной геометрической толщине также не оказывает влияния на выходные характеристики синхронного генератора БЭСГ с ПМ. Медь (Cu) и при толщине 0,5 мм значительно снижает характеристики синхронного генератора БЭСГ с ПМ.

Полученные результаты могут быть использованы на практике при проектировании герметичных встраиваемых, погружных бесконтактных генераторов, работающих в морской среде.

### Список литературы

1. Whittaker T.J.T, Beattie W., Folley M., Boake C., Wright A., M. Osterried Faculty of Engineering, Queen's University Belfast T. Heath Wavegen, Invernes The limpet wave power project-the first years of operation.[<https://ru.scribd.com/document/96577915/The-Development-of-Oyster-A-Shallow-Water-Surging-Wave-Energy-Converter>].
2. Pelamis P-750 Wave Energy Converter [<http://www-ctp.mit.edu/energy/files/pelamisbrochure.pdf>].
3. Archimedes Waveswing. [<http://www.awsocan.com/archimedes-waveswing.html>].
4. OPT's Power Buoy. [<https://www.oceanpowertechnologies.com/product>].
5. Поплавковая волновая электрическая станция, Темеев А.А. Патент РФ № 2037642 19.06.1995 [<http://ru-patent.info/20/35-39/2037642.html>].
6. Tong W. Mechanical design of electric motors. – Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. – P. 702. dense stator configuration // 15th European Conf. on Power Electronics and Applications (EPE). – Lille, France, 2013. – P. 1-10.
7. Yamamoto Y., Watanabe R., Takada Y., Koseki T., Aoyama Y. Design using simple modeling and experimental study on direct-drive disk-type motor with.
8. Евдокимов А.А., Чарыков В.И., Саттаров Р.Р., Игнатъев С.Г., Городских А.А. Расчет магнитной системы магнитоэлектрических генераторов мощностью до 10 кВА для ветроэнергетических установок // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. - № 1. – Т. 14. – С. 27-33.
9. Герман-Галкин С.Г., Лебедев В.В., Бормотов А.В. Модульная синхронная индукторная машина в системе электропривода // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – Т. 16. - № 11. – С. 731-738.
10. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины: Учеб. пособие для электромех. и электроэнерг. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1990. – 416 с.: ил.
11. Герметизирующие стаканы FrialitFZM [[http://www.aliaxis-ui.ru/u/ceramics/frialit\\_degussit\\_stakany.pdf](http://www.aliaxis-ui.ru/u/ceramics/frialit_degussit_stakany.pdf)].
12. Гребеников В.В. Новые технологии дисковых двигателей с постоянными магнитами // Техническая электродинамика. – 2003. - № 5. – С. 39-43.
13. Lambert T., Biglarbegian M., Mahmud S. A novel approach to the design of axial-flux switched-reluctance motors // Machines. – 2015. – № 3. – P. 27-54.
14. Герман-Галкин С.Г., Бормотов А.В. Современное состояние и перспективы развития мехатронных систем с вентильными электрическими машинами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 2. – С. 43-50.
15. Parviainen A. Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines: Thesis for the deg. of Doctor of Sceince (Technology). – Lappeenranta, 2005. – P. 159.
16. Aydin M., Huang S., Lipo T.A. Axial flux permanent magnet disc machines: a review: research report. – Madison, USA, 2004. – P. 12.
17. Du-Bar C. Design of an axial flux machine for an in-wheel motor application [Электронныйресурс]: Master of Science Thesis. – Goteborg, Sweden, 2011. – P. 68 [<http://webfiles.portal.chalmers.se/et/MSc/DubarChristian.pdf>].
18. Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р., Гумерова М.Б. Механические характеристики электромагнитных демпфирующих элементов с двойным ротором // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2010. - № 32 (208), Серия «Энергетика». – Вып. 14. – С. 59-63.
19. Ледовский А.Н. Электрические машины с высокоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 168 с.; ил.
20. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 279 с.
21. Хайруллин И.Х. К расчету потерь в тонких пластинках с учетом реакции вихревых токов // Труды УАИ. – 1973. – Вып. 35. – С. 129-133.
22. Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Пашали Д.Ю. Теория электромеханических демпфирующих преобразователей с распределенными параметрами. – М.: Машиностроение, 2010. – 327 с.

## References

1. Whittaker T.J.T, Beattie W., Folley M., Boake C., Wright A., M. Osterried Faculty of Engineering, Queen's University Belfast T. Heath Wavegen, Invernes The limpet wave power project-the first years of operation.[<https://ru.scribd.com/document/96577915/The-Development-of-Oyster-A-Shallow-Water-Surging-Wave-Energy-Converter>].
2. Pelamis P-750 Wave Energy Converter [<http://www-ctp.mit.edu/energy/files/pelamisbrochure.pdf>].
3. Archimedes Waveswing. [<http://www.awsocan.com/archimedes-waveswing.html>].
4. OPT's Power Buoy. [<https://www.oceanpowertechnologies.com/product>].
5. Poplavkovaja volnovaja elektricheskaja stancija, Temejev A.A. Patent RF № 2037642 19.06.1995 [<http://ru-patent.info/20/35-39/2037642.html>]
6. Tong W. Mechanical design of electric motors. – Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. – P. 702. dense stator configuration // 15th European Conf. on Power Electronics and Applications (EPE). – Lille, France, 2013. – P. 1-10.
7. Yamamoto Y., Watanabe R., Takada Y., Koseki T., Aoyama Y. Design using simple modeling and experimental study on direct-drive disk-type motor with.
8. Jevdokimov A.A., Charykov V.I., Sattarov R.R., Ignat'jev S.G., Gorodskih A.A. Raschet magnitnoj sistemy magnitoelektricheskikh generatorov moshchnost'ju do 10 kVA dl'a vetroenergeticheskikh ustanovok // Elektrotehnicheskije i informacionnyje komplekxy i sistemy. – 2018. - № 1. – Vol. 14. – P. 27-33.
9. German-Galkin S.G., Lebedev V.V., Bormotov A.V. Modul'naja sinhronnaja induktornaja mashina v sisteme elektroprivoda // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenije. – 2015. – Vol. 16. - № 11. – P. 731-738.
10. But D.A. Beskontaktnyje elektricheskije mashiny: Ucheb. Posobije dl'a elektromeh. i elektroenerg. spec. vuzov. – M.: Vyssh. shk., 1990. – 416 p.: il.
11. Germetizirujushchije stakany FrialitFZM [[http://www.aliaxis-ui.ru/u/ceramics/frialit\\_degussit\\_stakany.pdf](http://www.aliaxis-ui.ru/u/ceramics/frialit_degussit_stakany.pdf)].
12. Grebennikov V.V. Novyje tehnologii diskovyh dvigateley s postojannymy magnitami // Tehnicheskaja elektrodinamika. – 2003. - № 5. – P. 39-43.
13. Lambert T., Biglarbegian M., Mahmud S. A novel approach to the design of axial-flux switched-reluctance motors // Machines. – 2015. – № 3. – P. 27-54.
14. German-Galkin S.G., Bormotov A.V. Sovremennoje sostojanije i perspektivy razvitija mehatronnyh system s ventil'nymi elektricheskimi mashinami // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenije. – 2011. – № 2. – P. 43-50.
15. Parviainen A. Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines: Thesis for the deg. of Doctor of Science (Technology). – Lappeenranta, 2005. – P. 159.
16. Aydin M., Huang S., Lipo T.A. Axial flux permanent magnet disc machines: a review: research report. – Madison, USA, 2004. – P. 12.
17. Du-Bar C. Design of an axial flux machine for an in-wheel motor application [Электронныйресурс]: Master of Science Thesis. – Goteborg, Sweden, 2011. – P. 68 [<http://webfiles.portal.chalmers.se/et/MSc/DubarChristian.pdf>].
18. Sattarov P.P., Ismagilov F.R., Gumerova M.B. Mehanicheskije harakteristiki elektromagnitnyh dempfirujushchih elementov s dvojnym rotorom // Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. – 2010. - № 32 (208), Serija "Energetika". – Vyp. 14. – P. 59-63.
19. Ledovskij A.N. Elektricheskije mashiny s vysokoercitivnymi postojannymi magnitami. – M.: Energoatomizdat, 1985. – 168 p.; il.
20. Balagurov V.A., Galtejev F.F. Elektricheskije generatory s postojannymi magnitami. — M.: Energoatomizdat, 1988. — 279 p.
21. Hajrullin I.H. K raschetu poter' v tonkih plastinkah s uchotom reakcii vihrevykh tokov // Trudy UAI. – 1973. – Vol. 35. – P. 129-133.
22. Sattarov P.P., Ismagilov F.R., Hajrullin I.H., Pashali D.Ju. Teorija elektromehaničeskikh dempfirujushchih preobrazovatelej s raspredel'onnyimi parametrami. – M.: Mashinostrojenije, 2010. – 327 p.



**Копытов С.М.**  
**Kopytov S.M.**

*кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Промышленная  
электроника», ФГБОУ ВО «Комсомольский-  
на-Амуре государственный университет»,  
г. Комсомольск-на-Амуре,  
Российская Федерация*



**Ульянов А.В.**  
**Ulianov A.V.**

*кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Промышленная  
электроника», ФГБОУ ВО «Комсомольский-  
на-Амуре государственный университет»,  
г. Комсомольск-на-Амуре,  
Российская Федерация*

УДК 628.9; 621.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-52-59

## **КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫМИ ОСВЕТИТЕЛЬНЫМИ СЕТЯМИ ПО ЛИНИИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

В статье представлен цифровой контроллер освещения, предназначенный для управления группой светодиодных осветительных приборов, имеющих общую сеть электроснабжения. Для передачи команд осветительным приборам использована модифицированная низкочастотная PLC-технология, позволяющая передавать информацию по линии электроснабжения. Предусмотрена возможность задания режима работы как отдельных светильников, так и всех светильников одновременно. Преимуществом модифицированной PLC-технологии является слабое влияние на форму напряжения сети, что позволяет ее использовать на объектах, требовательных к уровню помех.

Контроллер освещения построен на базе 8-разрядного микроконтроллера семейства STM8L компании STMicroelectronics.

Предусмотрена дополнительная возможность использования контроллера в качестве главного управляющего устройства в системах освещения, работающих с протоколом передачи данных DMX512. Кроме того, с помощью широтно-импульсной модуляции реализован выход с напряжением 0...10 В для управления диммерами светодиодных светильников по аналоговому входу. Входы и выходы контроллера освещения гальванически развязаны от внешних устройств.

К контроллеру может быть подключен цифровой датчик освещённости с последовательным интерфейсом I2C, например, датчик BH1750, отградуированный производителем в люксах. Для централизованного управления осветительной сетью предусмотрена возможность удаленного общения контроллера освещения с устройством верхнего уровня по интерфейсу RS-485. Контроллер освещения дополнительно укомплектован USB-интерфейсом, который предназначен для связи с персональным компьютером при обслуживании и отладке.

Приведена функциональная схема контроллера, спроектирована печатная плата под промышленный корпус, создан опытный образец.

При проведении экспериментальных исследований опытного образца он был подключен к персональному компьютеру посредством интерфейса USB. Для компьютера в среде графического программирования LabVIEW разработана тестовая терминальная программа. В

ходе эксперимента сняты осциллограммы напряжения в сети электроснабжения при передаче команд управления отдельными светильниками и всеми светильниками одновременно. Визуально мерцания светильников при передаче команд не зафиксировано.

**Ключевые слова:** контроллер освещения, светодиодный светильник, диммер, низкочастотная PLC-технология, микроконтроллер, протокол DMX512, ШИМ, силовой коммутатор, интерфейс RS-485, LabVIEW.

## CONTROLLER FOR CONTROL OF LED LIGHTING NETWORKS ON ELECTRIC POWER SUPPLY LINE

The article presents a digital lighting controller designed to control a group of LED lighting devices with a common power supply network. To transmit commands to lighting devices, a modified low-frequency PLC-technology was used, which allows the transmission of information through the power supply line. It is possible to set the operation mode of both individual lamps and all lamps at the same time. The advantage of the modified PLC-technology is the weak effect on the voltage form of the network, which allows it to be used on objects that are demanding to the level of interference.

The lighting controller is built on the basis of an 8-bit microcontroller of the STM8L family from STMicroelectronics.

There is an additional possibility of using the controller as the main control device in lighting systems operating with the DMX512 data transfer protocol. In addition, with the help of pulse-width modulation, an output with a voltage of 0...10 V is implemented to control the dimmers of LED luminaires using an analog input. The inputs and outputs of the lighting controller are galvanically isolated from external devices.

A digital light sensor with an I2C serial interface can be connected to the controller, for example, a BH1750 sensor, calibrated by the manufacturer in lux. For centralized control of the lighting network, the possibility of remote communication of the lighting controller with a higher-level device via the RS-485 interface is provided. The lighting controller is additionally equipped with a USB interface, which is designed to communicate with a personal computer during maintenance and debugging.

A functional diagram of the controller is presented, a printed circuit board for the industrial case is designed, and a prototype has been created.

When conducting experimental studies of a prototype, it was connected to a personal computer via a USB interface. A test terminal program has been developed for the computer in the graphical programming environment LabVIEW. In the course of the experiment, oscillograms of voltage in the power supply network were taken when transmitting commands to control individual lamps and all lamps at the same time. Visually, the flickering of luminaires during the transmission of commands was not fixed.

**Key words:** lighting controller, LED lamp, dimmer, low-frequency PLC technology, microcontroller, DMX512 protocol, PWM, power switch, RS-485 interface, LabVIEW.

### Введение

В настоящее время актуальна задача управления протяженными системами наружного и внутреннего освещения, построенными на базе светодиодных осветительных приборов. Основными преимуществами светодиодных светильников являются экономичность, длительный срок службы, возможность диммирования. Анализ существующих технических решений в области автоматиза-

ции освещения [1-4] показывает, что они требуют прокладки дополнительных линий управления либо используют для передачи команд управления саму сеть питания, но при этом вносят в нее помехи. Поэтому применять на предприятиях имеющиеся решения зачастую невозможно из-за влияния на безопасность работы персонала и из-за недостаточной помехозащищенности используемого оборудования.

Нами для управления светильниками предложено использовать модифицированную низкочастотную PLC-технологию (Power Line Communication), свободную от перечисленных недостатков [5]. В данной технологии информация передается по самой линии электроснабжения на частоте сетевого напряжения. Выбран способ кодирования передаваемых данных количеством полуволн сетевого напряжения, прошедших между двумя маркерами. С целью минимизации влияния передаваемых посылок на форму сетевого напряжения предложено в качестве маркеров использовать полуволны сетевого напряжения, уменьшенные по амплитуде. Данный способ апробирован в лабораторных условиях с использованием стандартного диммируемого блока питания ИПС50-350ТУ.

### Разработка контроллера освещения

В работе [5] приведена структурная схема автоматизированной системы освещения с передачей команд по сети электроснабжения, а также предложены варианты принципиальных схем силовых коммутаторов переменного напряжения, предназначенные для формирования информационных посылок от контроллера освещения микроконтроллерными демодуляторами данных, расположенным в каждом осветительном приборе. Центральным звеном системы освещения является именно контроллер освещения, который управляет всеми осветительными приборами посредством силового коммутатора, видоизменяющего форму сетевого напряжения.

Контроллер освещения имеет следующие функции:

- 1) управление отдельными или всеми светильниками системы освещения одновременно с помощью модифицированной низкочастотной PLC-технологии;
- 2) управление всеми светильниками по аналоговому входу;
- 3) измерение освещенности с помощью цифрового датчика;
- 4) удаленное считывание даты, времени и освещенности в главное устройство верхнего уровня (управляющую станцию) по его запросу;
- 5) удаленная запись даты и времени в контроллер освещения из рабочей станции;
- 6) обслуживание и отладка контроллера освещения с помощью персонального компьютера.

Контроллер освещения формирует следующие команды управления светильниками:

- 1) команда локального управления позволяет включать/отключать и диммировать каждый светодиодный светильник индивидуально;
- 2) команда глобального управления позволяет включать/отключать и диммировать все светильники одновременно.

Для формирования из полуволн сетевого напряжения маркера и пропуска обычных полуволн используется рассмотренный в работе [5] силовой коммутатор переменного напряжения на основе n-канальных MOSFET-транзисторов (рис. 1).

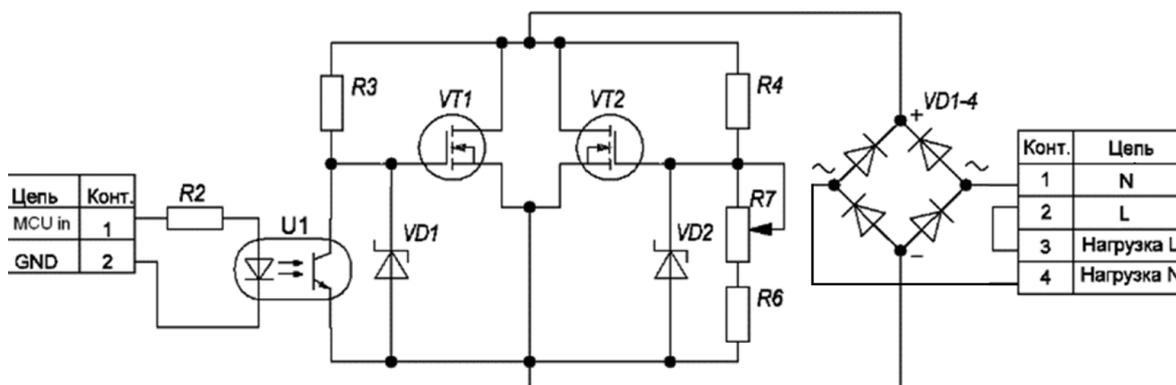


Рисунок 1. Силовой коммутатор переменного напряжения на MOSFET-транзисторах

Управляющие импульсные сигналы поступают на силовой коммутатор через левый разъем от контроллера освещения. С помощью правого разъема силовой коммутатор включают в разрыв линии электроснабжения осветительной сети. Силовой коммутатор предлагается выполнять конструктивно отдельно и не встраивать в контроллер освещения. Это связано с зависимостью мощности, габаритов и цены силовых элементов коммутатора (диодов VD1-4 и транзисторов VT1, VT2) от числа и мощности светильников в системе освещения.

Функциональная схема контроллера освещения представлена на рисунке 2. Контроллер освещения построен на базе 8-разрядного микроконтроллера STM8L152K6 семейства STM8L компании STMicroelectronics. Основой микроконтроллера является ядро с CISC-архитектурой. Данное семейство специально разработано для применения в устройствах с ультранизким энергопотреблением; входящие в его состав микроконтроллеры обладают высокой надежностью, что позволяет применять их в устройствах промышленной автоматизации.

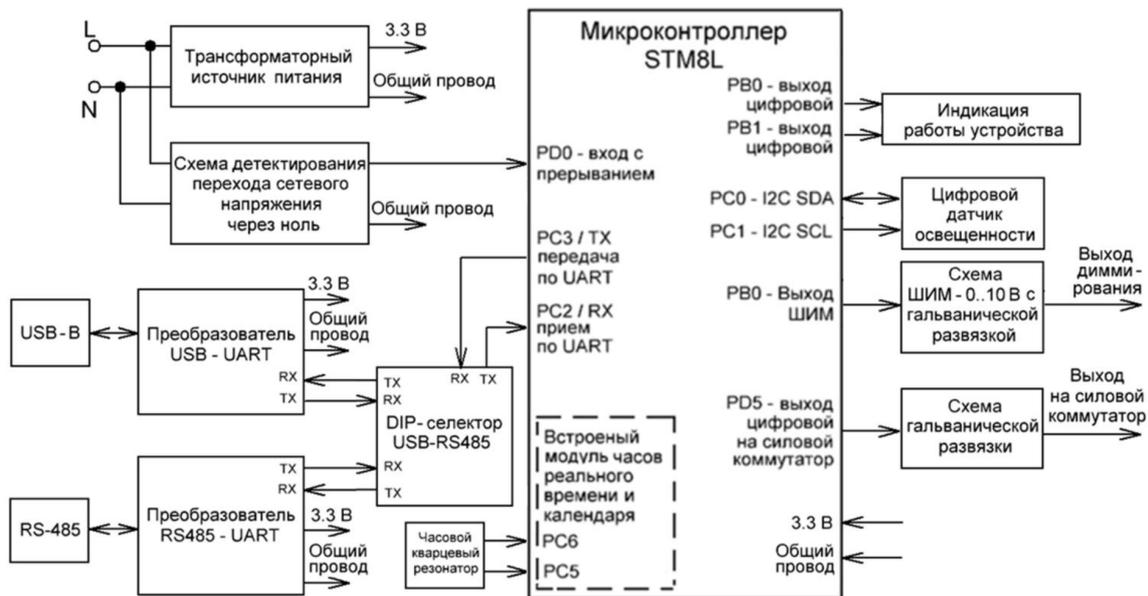


Рисунок 2. Функциональная схема контроллера освещения

Питание контроллера освещения осуществляется встроенным в него трансформаторным источником питания, который обеспечивает стабилизированное напряжение, гальваническую развязку от сети электроснабжения и защиту от короткого замыкания по цепям питания.

Наличие схемы детектирования перехода сетевого напряжения через ноль позволяет синхронизировать устройство с сетевым напряжением и реализовать алгоритм передачи команд управления светильниками по линии энергоснабжения. Для управления силовым коммутатором предусмотрен гальванически развязанный цифровой выход.

USB-интерфейс предназначен для связи с персональным компьютером при обслуживании и отладке контроллера освещения. Основным рабочим интерфейсом является интерфейс RS-485, с помощью которого можно управлять контроллером освещения

непосредственно от рабочей станции. Данный интерфейс также позволяет расширить функциональные возможности контроллера освещения благодаря реализации дополнительного протокола передачи данных DMX512 [3, 6]. Выбор в качестве рабочего интерфейса USB или RS-485 осуществляется с помощью механического DIP-селектора (переключателя). Одновременная работа интерфейсов USB и RS-485 не предусмотрена.

Микроконтроллер STM8L152K6 оснащен встроенным аппаратным модулем часов реального времени с календарём. Для использования данного модуля необходимо активировать его в программе и предусмотреть подключение внешнего часового кварцевого резонатора.

Так как на рынке осветительной техники присутствуют диммеры с аналоговым входом управления 0...10 В, то в контроллере освеще-

щения предусмотрен выход с аналоговым напряжением 0...10 В, реализуемым схемой широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с гальванической развязкой.

К устройству может быть опционально подключен цифровой датчик освещённости с последовательным интерфейсом I2C, например, датчик BH1750 с 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем, отградуированный производителем в люксах. Это позволит измерять освещённость и использовать её при формировании команд управления.

Для индикации состояния контроллера освещения служат светодиоды, отображающие режим работы устройства, потерю связи с датчиком освещённости и аварийный останов контроллера.

Разработана принципиальная схема устройства и печатная плата, выполненная под промышленный корпус с торговой маркой «22-11 Sanhe». На рисунке 3 представлен вид печатной платы.

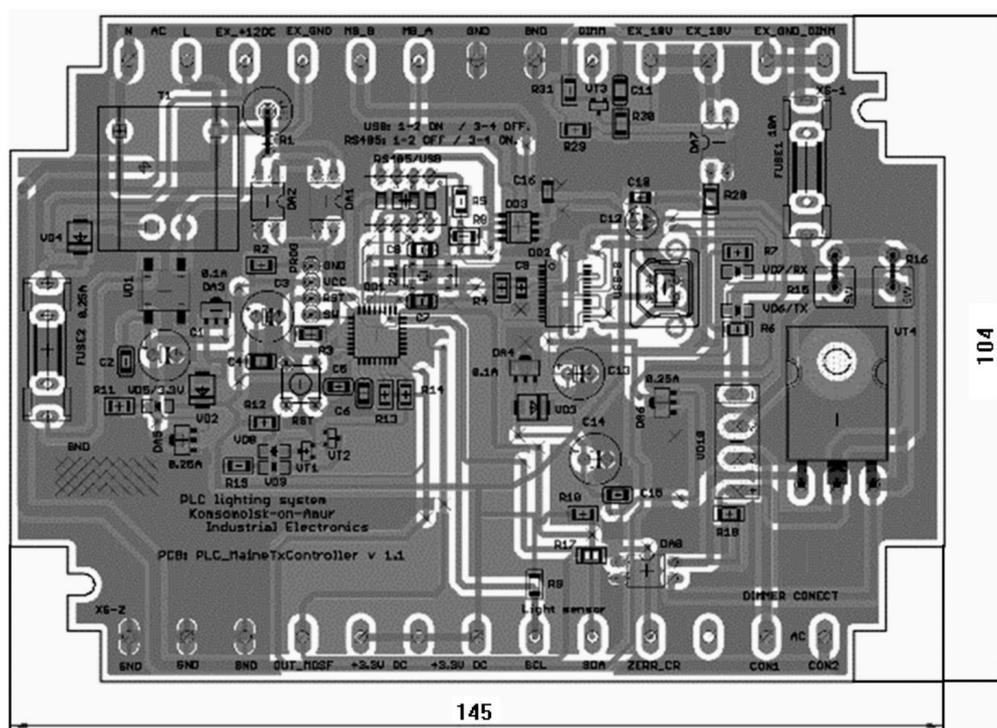


Рисунок 3. Печатная плата контроллера освещения

На рисунке 4 приведены фотографии опытного образца контроллера освещения.

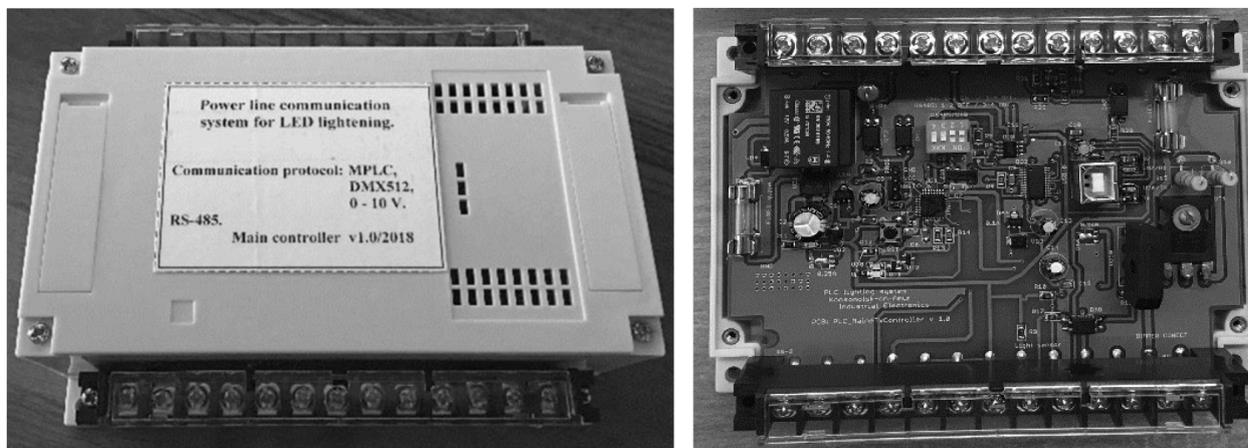
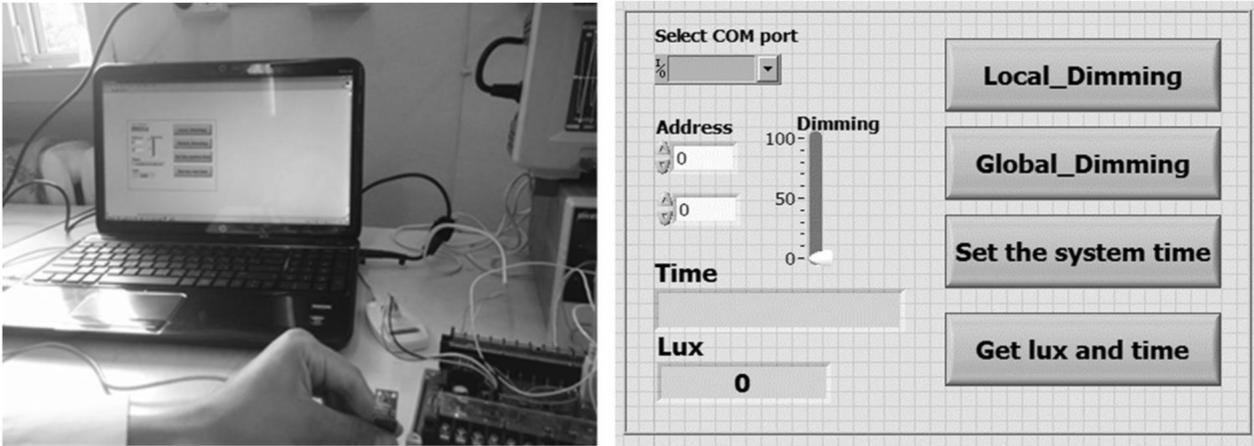


Рисунок 4. Опытный образец контроллера освещения

### Экспериментальное исследование контроллера освещения

Для экспериментального исследования разработанного контроллера освещения он был подключен к персональному компьютеру посредством интерфейса USB. Фотография экспериментального стенда приведена на

рисунке 5, а. На компьютере была запущена тестовая программа управления контроллером, разработанная в среде графического программирования LabVIEW. Лицевая панель терминальной программы представлена на рисунке 5, б.

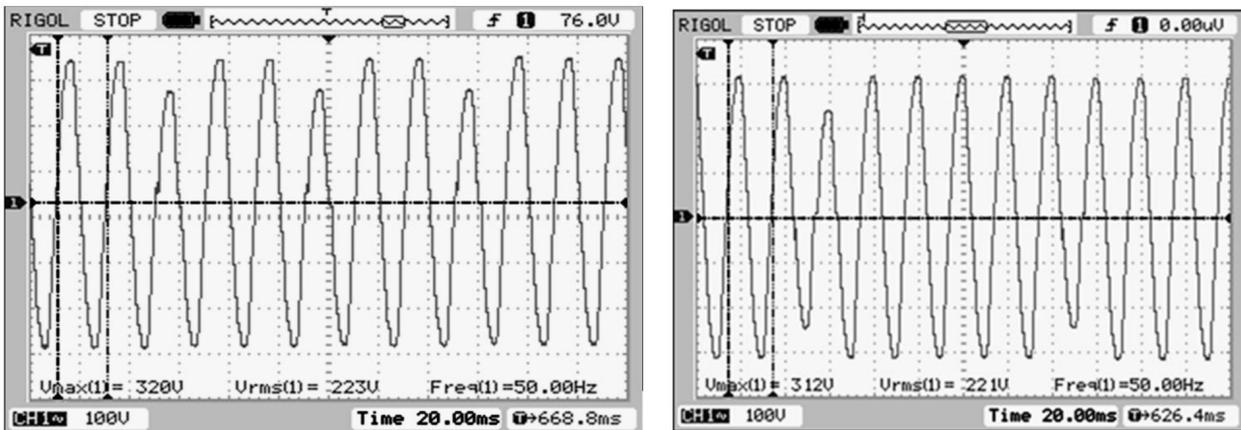


**Рисунок 5.** Экспериментальный стенд для тестирования контроллера освещения:  
 а) фотография экспериментального стенда;  
 б) лицевая панель терминальной программы для проведения экспериментов

В ходе эксперимента проверялись режимы локального и глобального управления светильниками, а также функция считывания освещенности, даты и времени из контроллера и функция записи даты и времени в контроллер из управляющей станции.

Для проверки режима диммирования конкретного (локального) светильника на лицевой панели терминальной программы был установлен адрес светильника и уровень диммирования, соответствующий приказ был отправлен в контроллер освещения.

Контроллер, получив задание, синхронизировался с сетевым напряжением и сформировал импульсы управления силовым коммутатором. Из полуволн сетевого напряжения была сформирована команда управления, содержащая стартовый маркер, адрес светильника, разделительный маркер, уровень диммирования, завершающий маркер. На рисунке 6, а представлена осциллограмма напряжения в сети электроснабжения при передаче команды локального управления.



**Рисунок 6.** Осциллограммы напряжения в сети:  
 а) при передаче команды локального управления;  
 б) при передаче команды глобального управления

Аналогично проверялся режим одновременного (глобального) диммирования всех светильников в системе освещения. На лицевой панели терминальной программы был установлен общий уровень диммирования, и соответствующий приказ был отправлен в контроллер освещения. Из полувольт сетевого напряжения была сформирована команда управления, содержащая два стартовых маркера, уровень диммирования и завершающий маркер. На рисунке 6, б представлена осциллограмма напряжения в сети электроснабжения при передаче команды глобального управления.

В режиме глобального диммирования контроллер освещения также формирует выходное аналоговое напряжение в диапазоне 0...10 В для управления уровнем освещения через аналоговый вход диммеров.

Тестирование функции считывания освещенности, даты и времени из контроллера в компьютер и функции записи даты и времени в контроллер из компьютера выполнено успешно.

### Список литературы

1. Никуличев А.Ю., Сапронов А.А. Система управления уличным освещением с использованием передачи информации по сети электроснабжения // Известия вузов. Электромеханика. – 2008. Спец. выпуск. – С. 137–138.
2. Алексеев Е.Г., Шиков С.А., Иванова Е.С. Интегрированные технологии, стандартные интерфейсы и протоколы для построения интеллектуальных систем управления освещением // Материалы XXI научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва (Саранск, 22–29 мая 2017 г.). – В 3 ч. – Саранск: Изд-во НИ МГУ им. Н.П. Огарёва, 2017. – С. 602–610.
3. Архитектурная подсветка зданий [Электронный ресурс] // ООО «МегаЛЕД». URL: <http://www.megaled.ru/2014-09-22-18-19-31> (19.09.2018).
4. Тетри Э., Халонен Л. Экономия электроэнергии благодаря энергосберегающему

### Выводы

Разработанный контроллер позволяет управлять светодиодными осветительными приборами по линиям электроснабжения, что приводит к минимизации затрат на создание автоматизированных внутренних и наружных сетей освещения. Используемая модифицированная низкочастотная PLC-технология передачи команд управления слабо влияет на спектральный состав напряжения сети, что позволяет применять ее при жестких требованиях к создаваемому уровню помех. Кроме того, экспериментальные исследования опытного стенда не выявили мерцания светодиодных светильников при передаче команд по линии электроснабжения, что важно для обеспечения комфортных условий работы персонала предприятия.

Контроллер может также применяться в системах освещения, работающих с протоколом DMX512, в качестве главного управляющего устройства. Для повышения гибкости управления предусмотрена возможность удаленного общения контроллера с устройством верхнего уровня по интерфейсу RS-485.

освещению // Светотехника. – 2009. – № 5. – С. 59–64.

5. Копытов С.М., Ульянов А.В., Шибeko P.B. Коммутатор сетевого напряжения для управления светодиодными осветительными приборами с помощью низкочастотной PLC-технологии // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 9. – С. 152–161.

6. Шиков С.А., Алексеев Е.Г., Фадеева А.Ю., Гуреева Е.А. Современные концепции интеллектуальных систем управления освещением // Материалы XXI научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва (Саранск, 22–29 мая 2017 г.). – В 3 ч. – Саранск: Изд-во НИ МГУ им. Н.П. Огарёва, 2017. – С. 126–131.

### References

1. Nikulichev A.Ju., Sapronov A.A. Sistema upravlenija ulichnym osveshhenijem s ispol'zovanijem peredachi informacii po seti

elektrosnabzhenija // Izvestija vuzov. Elektromehanika. – 2008. Spec. vypusk. – P. 137–138.

2. Alekseev E.G., Shikov S.A., Ivanova E.S. Integrirrovannye tehnologii, standartnyje interfejsy i protokoly dlja postroenija intellektual'nyh sistem upravlenija osveshhenijem // Materialy XXI nauchno-prakticheskoj konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov Nacional'nogo issledovatel'skogo Mordovskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.P. Ogarjova (Saransk, 22–29 maja 2017 g.). – V 3 ch. – Saransk: Izd-vo NI MGU im. N.P. Ogarjova, 2017. – P. 602–610.

3. Arhitekturnaja podsvetka zdanij [Elektronnyj resurs] // OOO «MegaLED». URL: <http://www.megaled.ru/2014-09-22-18-19-31> (19.09.2018).

4. Tetri Je., Halonen L. Ekonomija elektroenergii blagodarja

energoberegajushhemu osveshheniju // Svetotehnika. – 2009. - № 5. – P. 59–64.

5. Kopytov S.M., Ul'janov A.V., Shibeko R.V. Kommutator setevogo naprjazhenija dlja upravlenija svetodiodnymi osvetitel'nymi priborami s pomoshh'ju nizkochastotnoj PLC-tehnologii // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2018. – Vol. 22. - № 9. – P. 152–161.

6. Shikov S.A., Alekseev E.G., Fadejeva A.Ju., Gurejeva E.A. Sovremennye koncepcii intellektual'nyh sistem upravlenija osveshcheniem // Materialy XXI nauchno-prakticheskoj konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov Nacional'nogo issledovatel'skogo Mordovskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.P. Ogarjova (Saransk, 22–29 maja 2017 g.). – V 3 ch. – Saransk: Izd-vo NI MGU im. N.P. Ogarjova, 2017. – P. 126–131.



**Ахмеджанов Ф.М.**  
**Akhmedzhanov F.M.**

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



**Крымский В.Г.**  
**Krymskiy V.G.**

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

УДК 519.873:007.5

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-60-69

## **АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ HEART**

Методика HEART (human error assessment and reduction technique) относится к числу наиболее простых и удобных инструментов для оценки надежности человека-оператора, действующего в составе сложных технологических систем. В то же время в традиционной версии эта методика обладает рядом недостатков. В частности, она не учитывает время до возникновения ошибки (т.е. время до отказа), а также требует задания фиксированных значений для номинальных вероятностей ошибок, связанных с человеческим фактором.

В статье предлагается новая модификация методики HEART, которая имеет целью преодолеть эти препятствия. Она основана на использовании аппарата интервальных вероятностей и привлечении экспертных суждений для того, чтобы сделать модель более адекватной реальным условиям.

Применение предложенного алгоритма иллюстрируется численными примерами.

**Ключевые слова:** надежность человека-оператора, методика HEART, интервальнозначные вероятности.

## **ALGORITHM FOR ASSESSMENT OF HUMAN OPERATOR RELIABILITY BASED ON MODIFIED HEART METHODOLOGY**

Abstract The methodology named HEART (human error assessment and reduction technique) is one of the simplest and most convenient tools for assessing the reliability of a human operator acting as a part of complex technological systems. At the same time, in the traditional version, this technique has several disadvantages. In particular, it does not take into account the time before the occurrence of the error (i.e. time to failure), and also requires the assignment of fixed values for the nominal error probabilities associated with the human factor.

The paper proposes the new modification of HEART methodology which aims at overcoming these obstacles. It is based on the use of the interval probabilities technique and the involvement of expert judgments in order to make the model more adequate to real conditions.

The application of the proposed algorithm is illustrated by numerical examples.

**Key words:** human reliability, HEART methodology, interval-valued probabilities

### Введение

В число подходов к оцениванию влияния человеческого фактора на надежность сложных технологических систем, которые включены в перечень методов HRA (т.е. «Human Reliability Analysis», или «Анализ надежности человека») стандарта ГОСТ Р МЭК 62508-2014 «Менеджмент риска. Анализ влияния на надежность человеческого фактора», входит так называемый метод HEART. Эта аббревиатура расшифровывается как «human error assessment and reduction technique», или инструментарий для оценивания и сокращения количества человеческих ошибок. Указанный метод был впервые представлен в 1985 г. в публикации Дж. Виллиамса [1] и позднее, пройдя через некоторые корректировки, получил широкое распространение на практике. Метод предполагает выполнение ряда последовательных шагов [2]:

- 1) конкретизация анализируемой деятельности человека в составе сложной системы;
- 2) соотнесение задач, стоящих в процессе данной деятельности перед человеком, с позициями предлагаемого списка обобщенных задач и установлением номинальных вероятностей GEP человеческой ошибки (отказа) (табл. 1);
- 3) идентификация условий, приводящих к ошибке человека в процессе рассматриваемой деятельности (задание весовых коэффициентов  $W(i)$ , позволяющих учесть  $i$ -е соче-

тание этих условий, осуществляется с помощью выбора значения в соответствующей строке таблицы 2);

4) оценивание интенсивности проявления этих условий (оно находит отражение в «распределении» величин коэффициентов важности  $R(i)$  между сочетаниями условий, что делается, как правило, экспертным путем);

5) вычисление окончательного значения вероятности ошибки человека-оператора согласно выражению

$$HEP = GEP \prod_{i=1}^n (R(i)(W(i)-1) + 1), \quad (1)$$

где  $n$  – общее число вариантов условий, приводящих к ошибкам при реализации человеком рассматриваемой деятельности;

$$\sum_{i=1}^n R(i) = 1. \quad (2)$$

В монографии [3] приводится наглядный пример, иллюстрирующий применение этой методики. Автор рассматривает действия оператора по замене в химико-технологической установке старого клапана из-за его отказа на новый. Сначала оператор выключает из функционирования линию, в которой произошел отказ клапана, затем ремонтник заменяет неисправный клапан новым. После этого линия начинает работать с замененным клапаном.

Таблица 1

Обозначение обобщенной задачи	Характеристика задачи	Номинальная вероятность ошибки GEP	Интервал между квантилями для уровней 5 % и 95 % применительно к логнормальному распределению
А	Полностью незнакомая задача, которую необходимо выполнять быстро и при отсутствии реального представления о последствиях	0,55	(0,35-0,97)

B	Перевод системы в новое состояние или восстановление ее оригинального состояния за одну попытку без руководства и инструкций	0,26	(0,14-0,42)
C	Сложная задача, требующая высокого уровня понимания и практических навыков	0,16	(0,12 – 0,28)
D	Достаточно простая задача, выполняемая быстро или требующая ограниченного внимания	0,09	(0,06 – 0,13)
E	Обычная, в высокой степени практическая задача, для которой необходим относительно низкий уровень квалификации	0,02	(0,07 - 0,045)
F	Восстановление либо перевод системы в оригинальное или новое состояние в соответствии с установленными процедурами и с некоторой проверкой	0,003	(0,0008 - 0,007)
G	Полностью знакомая, хорошо сформулированная, в высокой степени практическая задача, возникающая несколько раз в день и выполняемая согласно наилучшим из возможных стандартов высокомотивированным, хорошо обученным и опытным персоналом, при наличии времени для исправления потенциальной ошибки, но без значительной помощи в работе	0,0004	(0,00008 - 0,009)

Н	Правильное реагирование на системную команду, в том числе при наличии расширенной или автоматизированной системы контроля, обеспечивающей точную интерпретацию системного состояния	0,00002	(0,000006 - 0,00009)
М	Прочие задачи, для которых нельзя найти какое-либо описание	0,003	(0,008 - 0,11)

Таблица 2

	Условия, приводящие к возникновению ошибки	Вес $W(i)$
1	Неизвестная ситуация, потенциально важная, но случающаяся нечасто или впервые	17
2	Дефицит времени для определения и коррекции ошибки	11
3	Низкое отношение уровней сигнал – шум	10
4	Средства подавления или аннулирования информации либо ее аспектов, которые слишком легкодоступны	9
5	Отсутствие способов передачи пространственной или функциональной информации операторам в форме, которую они готовы воспринимать	8
6	Несоответствие между моделью предметной области оператора и представлением разработчика	8
7	Отсутствие очевидных способов отмены непреднамеренных действий	8
8	Перегрузка канала, в частности, вызванная одновременным представлением различной избыточной информации	6
9	Необходимость забыть привычную методику и применить другую, основанную на альтернативных подходах	6
10	Необходимость передавать определенные знания от задания к заданию без потерь	5,5
11	Неопределенность в нормах выработки, фигурирующих в требованиях	5
12	Несоответствие между воспринимаемым и реальным риском	4
13	Слабая, неопределенная или неструктурированная системная обратная связь	4
14	Нет ясных, прямых и своевременных подтверждений намеченных действий со стороны той части системы, по отношению к которой осуществляется управление	3
15	Неопытный оператор (например, только что получивший квалификацию, не «эксперт»)	3
16	Низкое качество информации, поступающей по итогам процедур и от человека человеку	3

17	Малая или не вполне независимая проверка (тестирование) результатов	3
18	Конфликт между тактическими и стратегическими целями	2,5
19	Нет разнообразия источников информации для проверки достоверности	2,5
20	Несоответствие уровня обучения персонала требованиям задания	2
21	Побуждение использовать другие, более опасные процедуры	2
22	Небольшие возможности для упражнений ума и тела за рамками непосредственного выполнения работы	1,8
23	Ненадежные измерительные приборы (достаточно подозрений по этому поводу)	1,6
24	Необходимость оценок, лежащих за пределами компетентности или опыта оператора	1,6
25	Неясное распределение функций и обязанностей	1,6
26	Отсутствие очевидных способов удерживать процесс в требуемых пределах	1,4
27	Опасность превышения предельных физических возможностей	1,4
28	Малый или несущественный смысл задания	1,4
29	Высокий уровень эмоционального стресса	1,3
30	Свидетельство нездоровья работника, особенно наличие лихорадки	1,2
31	Низкий уровень моральных побуждений к труду	1,2
32	Несогласованность того, как представляется процесс и его значимости	1,2
33	Плохая окружающая среда (качество ниже 75 % от того, которое требуется для отсутствия угрозы жизни или здоровью)	1,15
34	Длительное бездействие или часто повторяющиеся циклы задач, ориентированные на низкий уровень интеллектуальной загрузки	1,1 (для первого получаса работы) 1,05 (для остальных часов)
35	Недосыпание	1,1
36	Сбой рабочего ритма, вызванный вмешательством посторонних	1,06
37	Члены команды – недостающие или лишние	1,03 на каждого
38	Возраст персонала, выполняющего работу	1,02

Анализируется случай, когда оператор имеет опыт выполнения таких заданий, а ремонтник – нет. В результате через 10 минут после начала работы отремонтированной системы зафиксирована утечка, вызванная ошибкой в процессе установки нового клапана.

Замена контрольного клапана включает в себя пять шагов:

1. Проверить, выведена ли линия с клапаном для ремонта из эксплуатации.

2. Проверить и убедиться, что на линии, где находится требующий ремонта клапан, отсутствует давление.

3. Изолировать линии, ведущие к клапану.

4. Заменить неисправный клапан новым.

5. Ввести линию с новым клапаном в действие.

Применение методологии HEART начинается с того, что для каждого из этих пяти шагов необходимо подобрать соответствие ситуации позициям таблицы 1. Шаги 1, 2, 3 и

5 выполняются опытным оператором, следовательно, соответствуют ситуации, обозначенной Н, и номинальная вероятность человеческой ошибки будет равна 0,00002. Шаг 4 вследствие того, что ремонтник не обладает необходимым опытом, соответствует ситуации В, и для данного случая такая вероятность будет равна 0,26.

Шаги 1, 2, 3, 5 связаны только с одним условием из таблицы 2, которое способно вызвать ошибку, а именно: «дефицит времени для определения и коррекции ошибки». Оно характеризуется весом  $W(i)$ , равным 11. Так как условие единственное, то  $R(i)$  при  $i = 1$  равно единице.

Применение формулы (1) к этим данным даст следующий результат:

$$HEP=0,00002*(1*(11-1)+1)=0,00022.$$

Для перечисленных выше шагов в сумме  $HEP$  составляет  $0,00022*4=0,00088$ .

Для действия в рамках шага 4 можно указать два таких «опасных» условия:

– «неопытность оператора», вес которого равен 3, а интенсивность  $R(i)$  проявления которого по данным экспертного оценивания составляет 0,7;

– «высокий уровень эмоционального стресса», вес которого равен 1,3, а интенсивность проявления равна  $1 - 0,7 = 0,3$ . Итоговая вероятность человеческой ошибки для шага 4 будет равна:

$$HEP=0,26*(0,7*(3-1)+1)*(0,3*(1,3-1)+1)=0,68016.$$

Результирующее значение вероятности ошибки человека-оператора, равное сумме вычисленных значений вероятностей для каждого шага, составляет 0,68104. Очевидно, что решающий вклад в это значение дает четвертый шаг, выполняемый неопытным ремонтником.

Следует отметить, что при полностью независимом задании величин  $GEP$ ,  $W(i)$  и  $R(i)$  значение вероятности  $HEP$  может оказаться больше единицы. К этому выводу нетрудно прийти, наложив необходимое требование на правую часть выражения (1) в случае, если  $n = 1$ :

$$GEP (R(i) (W(i)-1)+1) \leq 1. \quad (3)$$

Отсюда

$$R(i) \leq (1/GEP-1)/(W(i)-1). \quad (4)$$

Тогда если  $GEP = 0,12$  (ситуация С, табл. 1) и  $W(i) = 11$  (строка 2 в табл. 2), то неравенство (4) приобретает вид:

$$R(i) \leq 0,733.$$

Но согласно (2) при  $n = 1$  должно выполняться  $R(i) = 1$ , что сразу же приводит к получению вероятностей  $HEP$ , больших единицы.

Авторы методики не дают ответа, как поступать в подобных случаях. Очевидно, если вычисляемое значение вероятности оказывается больше единицы, то принимается  $HEP=1$ .

Из приведенного рассмотрения видны сильные стороны методологии HEART. К ним необходимо отнести «прозрачность» ее применения – практически любой набор действий можно «разобрать» на составляющие и увидеть, какой вклад вносит каждый исполняемый шаг в результирующее значение вероятности человеческой ошибки. Из такого анализа напрямую вытекают меры, которые необходимо предпринять для того, чтобы снизить значение этой вероятности до приемлемых величин.

Между тем, рассматриваемая методология имеет и ряд недостатков. В частности, они касаются выбора величины номинальной вероятности  $GEP$  человеческой ошибки и заключаются в следующем:

а) принимается, что такие вероятности для любых видов деятельности соответствуют определенному (логнормальному) закону распределения (табл. 1), что на практике сложно, а зачастую – невозможно обосновать;

б) в традиционной модели, вытекающей из методики HEART, совершенно игнорируется фактор времени; между тем ясно, что вероятности  $GEP$  меняются с течением времени  $t$ , т.е.  $GEP = GEP(t)$ .

Ниже предлагается новая версия алгоритма, реализующего методику HEART, при создании которой поставлена цель повышения адекватности модели реальным условиям деятельности человека-оператора и устранения перечисленных недостатков.

### Новая модификация методики heart на базе моделей, относящихся к теории интервальнозначных вероятностей

Будем далее исходить из предпосылок, которые, на наш взгляд, в значительно большей степени характерны для практики, чем те, которые отражены в таблице 1, а именно:

1) номинальные вероятности  $GEP$  ошибок человека для обобщенных задач А, В, С, ..., Н рассматриваются как функции времени  $t$ ;

2) величины этих вероятностей не берутся в фиксированном виде из таблицы 1, а оцениваются по накопленной статистике либо называются экспертом, причем и в том, и в другом случае они соответствуют определенному интервалу времени  $[0, t^*]$  (т.е. принимается, что известны значения  $GEP(t^*)$ );

3) вид закона распределения указанных вероятностей полагается неизвестным, что вытекает из реально имеющегося уровня неопределенности.

Определим номинальную вероятность  $GEP(t_{fact})$  человеческой ошибки на интервале  $[0, t_{fact}]$ . Здесь  $t_{fact}$  – время, в течение которого человек фактически работает в рамках выбранной обобщенной задачи из списка А, В, С, ..., Н. Высокий уровень неопределенности приводит к тому, что значение  $GEP(t_{fact})$  в данном случае оказывается возможным оценить только с точностью до содержащего его интервала с границами  $\underline{GEP}(t^*)$ ,  $\overline{GEP}(t^*)$ :

$$\underline{GEP}(t_{fact}) \leq GEP(t_{fact}) \leq \overline{GEP}(t_{fact}). \quad (5)$$

При этом должны соблюдаться ограничения:

$$\int_0^{t^*} I_{[0, t^*]}(t) f(t) dt = GEP(t^*), \quad (6)$$

$$\int_0^{t^*} f(t) dt = 1, \quad (7)$$

где  $f(t)$  – неизвестная плотность распределения времени до ошибки человека-оператора,  $T^*$  – максимальное время его работы в рамках выбранной обобщенной задачи,  $I_{[0, t^*]}(t)$  – индикаторная функция, равная 1 при  $t \leq t^*$  либо равная 0 в противном случае.

В свою очередь,

$$GEP(t_{fact}) = \int_0^{t^*} I_{[0, t_{fact}]}(t) f(t) dt. \quad (8)$$

Мы можем рассматривать (8) как оптимизируемый функционал, стремясь найти

$$\underline{GEP}(t_{fact}) = \inf_{f(t)} \int_0^{t^*} I_{[0, t_{fact}]}(t) f(t) dt,$$

$$\overline{GEP}(t_{fact}) = \sup_{f(t)} \int_0^{t^*} I_{[0, t_{fact}]}(t) f(t) dt$$

с учетом ограничений (6), (7).

Поставленная задача принадлежит классу задач определения так называемых «интервальных», или «неточных» («imprecise»), вероятностей, в отношении которых основополагающими работами принято считать монографии [4, 5].

Между тем, в работе [6] показано, что при ограничениях вида (6), (7) (изопериметрических, т.е. сформулированных применительно лишь к интегралам от выражений, включающих  $f(t)$ ), решения этой оптимизационной задачи представляют собой линейные комбинации  $\delta$ -функций. Подобные плотности распределения характеризуют сосредоточение «вероятностной массы» в дискретной совокупности точек, что не соответствует реальным процессам, для описания которых используются формируемые вероятностные модели.

Для преодоления вышеназванной трудности в постановку задачи целесообразно ввести также голономные ограничения, касающиеся выражений, которые зависят непосредственно от  $f(t)$ . Соответствующие подходы предложены и исследованы в публикациях [7-12]. В работе [13] показана эффективность применения для оценки надежности человека-оператора голономного ограничения вида

$$f(t) \leq K, \quad (10)$$

где  $K$  – заданное положительное число.

В данном случае воспользуемся идеей, описанной в работах [10, 11], и введем ограничения снизу ( $\underline{\lambda}$ ) и сверху ( $\overline{\lambda}$ ) на величину интенсивности отказов (ошибок) человека  $\lambda(t)$ :

$$\underline{\lambda} \leq \lambda(t) \leq \overline{\lambda}. \quad (11)$$

При этом значения  $\underline{\lambda}$  и  $\bar{\lambda}$  должны не противоречить неравенствам

$$1 - \exp(-\underline{\lambda}t^*) \leq GEP(t^*) \leq 1 - \exp(-\bar{\lambda}t^*). \quad (12)$$

Преимущества такого подхода заключаются в том, что:

а) ограничения на величину  $\lambda(t)$ , как правило, относительно несложно получить по результатам экспертного опроса либо из статистики, накопленной по аналогичным системам с участием человека;

б) как показано в [10, 11], при наличии в постановке оптимизационной задачи неравенств вида (11) возможно рассмотрение случая  $T^* \rightarrow \infty$  (так называемый «бесконечный горизонт управления» [14]), что позволяет устранить необходимость эвристического задания величины  $T^*$ , которая обычно не известна.

Поставим целью определение  $\underline{GEP}(t_{fact})$  и  $\overline{GEP}(t_{fact})$  в предположении, что  $t_{fact} > t^*$ .

Такого рода задача решена в примере 1 статьи [12]. Воспользовавшись этим решением, можно записать, что

$$\underline{GEP}(t_{fact}) = 1 - (1 - GEP(t^*)) \exp(-\underline{\lambda}(t_{fact} - t^*)), \quad (13)$$

$$\overline{GEP}(t_{fact}) = 1 - (1 - GEP(t^*)) \exp(-\bar{\lambda}(t_{fact} - t^*)). \quad (14)$$

Покажем, как «работают» соотношения (12), (13) на численных данных. Пусть  $t^* = 4$  часа,  $t_{fact} = 8$  часов,  $GEP(t^*) = 0,26$  (аналогично ситуации, характеризуемой обобщенной задачей В, табл. 1),  $\underline{\lambda} = 0,06$  (1/час),

$\bar{\lambda} = 0,08$  (1/час). Тогда из (13), (14) находим

$$0,418 \leq GEP(t_{fact}) \leq 0,462.$$

Полученный интервал значений номинальной вероятности ошибки человека-оператора за время 8 часов отражает реальную неопределенность, в условиях которой осуществляется оценивание. Между тем для ответственных систем при планировании мер по предотвращению неблагоприятных событий целесообразно ориентироваться на наихудший случай, т.е. на величину верхней границы указанной вероятности.

Остановимся далее на случае  $t_{fact} < t^*$ . Как показано в работах [11, 12], в такого рода ситуациях функция  $f(t) = f^*(t)$ , на которой достигается максимум или минимум функционала (9) (т.е. экстремаль), является кусочно-непрерывной, причем на интервалах непрерывности она представляет собой экспоненту с параметром либо  $\lambda = \bar{\lambda}$ , либо  $\lambda = \underline{\lambda}$ .

При определении величины  $\underline{GEP}(t_{fact})$  последовательность интервалов непрерывности функции  $f^*(t)$  соответствует рисунку 1.

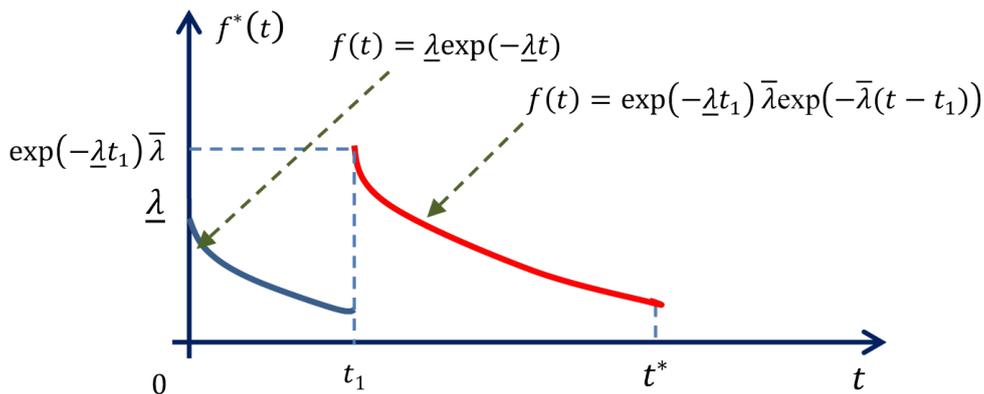


Рисунок 1. Экстремаль при поиске  $\underline{GEP}(t_{fact})$

Момент времени  $t_1$  переключения (рис. 1) можно найти из соотношения

$$\exp(-\underline{\lambda}t_1) \exp(-\bar{\lambda}(t^* - t_1)) = 1 - GEP(t^*), \quad (15)$$

или

$$t_1 = (\bar{\lambda}t^* + \ln(1 - GEP(t^*))) / (\bar{\lambda} - \underline{\lambda}). \quad (16)$$

Для заданных выше численных данных  $t_1 = 0,945$ . Таким образом, если  $t_{fact} < t_1$ , то

$$\underline{GEP}(t_{fact}) = 1 - \exp(-\underline{\lambda}t_{fact}), \quad (17)$$

а в противном случае

$$\underline{GEP}(t_{fact}) = 1 - \exp(-\underline{\lambda}t_1) \exp(-\bar{\lambda}(t_{fact} - t_1)). \quad (18)$$

Если, например,  $t_{fact} = 2$  часа, то  $\underline{GEP}(t_{fact}) = 0,132$ .

Руководствуясь аналогичными соображениями и меняя при этом порядок следования интервалов непрерывности функции  $f^*(t)$ , находим верхнюю границу искомой вероятности ошибки для  $t_{fact} = 2$  часа:

$$\overline{GEP}(t_{fact}) = 0,148.$$

Полученные таким образом величины нижней и верхней границы номинальной вероятности ошибки применительно к

$$\underline{HEP}(t_{fact}) = 0,132 * (0,7 * (3 - 1) + 1) * (0,3 * (1,3 - 1) + 1) = 0,34531,$$

$$\overline{HEP}(t_{fact}) = 0,148 * (0,7 * (3 - 1) + 1) * (0,3 * (1,3 - 1) + 1) = 0,38717.$$

Интервал между двумя найденными значениями вероятности ошибки характеризует реальную неопределенность в исходной информации при постановке задачи. Для планирования управленческих решений целесообразно ориентироваться на наихудший случай, т.е. на верхнюю границу этой вероятности.

#### Вывод

Данная публикация продолжает изложение результатов исследований авторов в области усовершенствования методик оценки вероятностей неблагоприятных событий, связанных с человеческим фактором как ком-

менту времени  $t_{fact}$  могут далее использоваться для расчета границ интервала результирующей вероятности  $HEP(t_{fact})$  в соответствии с формулой (1). При этом

$$\underline{HEP}(t_{fact}) = \underline{GEP}(t_{fact}) \prod_{i=1}^n (R(i) (W(i) - 1) + 1), \quad (19)$$

$$\overline{HEP}(t_{fact}) = \overline{GEP}(t_{fact}) \prod_{i=1}^n (R(i) (W(i) - 1) + 1). \quad (20)$$

Так, если  $t_{fact} = 2$  часа,  $\underline{GEP}(t_{fact}) = 0,132$ ,  $\overline{GEP}(t_{fact}) = 0,148$ , (результат рассмотренного выше примера), и необходимо оценить вероятность  $HEP(t_{fact})$  для действий ремонтника на шаге 4 общей процедуры замены клапана (пример предыдущего раздела данной статьи), то

понентом сложных технологических систем. В ней анализируется известная методика HEART, которая, как и рассмотренная в предыдущей статье [13] методика SPAR-N, базируется на достаточно большом количестве не вполне обоснованных допущений.

Авторы показывают, что здесь, в частности, можно избежать необходимости в целом ряде допущений, если применить методы, разработанные в рамках теории интервальнозначных вероятностей. При этом подход становится более адекватным реальным условиям, не теряя своей простоты и наглядности.

#### Список литературы

1. Williams J.C. HEART – a proposed method for achieving high reliability in process operation by means of human factors engineering technology / J.C. Williams // Proceedings of a Symposium on the Achievement of Reliability in Operating Plant, Safety and Reliability Society (Southport, NC, the USA). – Elsevier, 1985. – P. 87-109.
2. Williams J.C. A data-based method for assessing and reducing human error to improve operational performance // Proceedings of IEEE Fourth Conference on Human Factors in Power Plants (Monterey, CA, the USA). – IEEE Cat. No. 88CH2576-7. – 1988. – P. 436-450.

3. Calixto E. Gas and Oil Reliability Engineering: Modeling and Analysis / E. Calixto // Waltham (the USA): Gulf Professional Publishing, 2013. – 545 p.

4. Walley P. Statistical Reasoning with Imprecise Probabilities / P. Walley. – London: Chapman and Hall, 1991. – 719 p.

5. Кузнецов В.П. Интервальные статистические модели / В.П. Кузнецов. – М.: Советское радио. – 1991. – 352 с.

6. Utkin L.V. Kozine I.O. Different Faces of the Natural Extension // Proceedings of the 2nd International Symposium on Imprecise Probabilities and Their Applications. – Maastricht: Shaker Publ., 2001. – P. 316-323.

7. Krymsky V.G. Computing Interval Bounds for Statistical Characteristics Under Expert-Provided Bounds on Probability Density Functions // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2006. – Vol. 3732. — P. 151-160.

8. Kozine I.O. Krymsky V.G. Computing Interval-Valued Statistical Characteristics: What is the Stumbling Block for Reliability Applications? // *International Journal of General Systems*. – Vol. 38. – No. 5. – 2009. – P. 547-565.

9. Kozine I., Krymsky V.G. Bounded densities and their derivatives: extension to other domains // *Journal of Statistical Theory and Practice*. – Vol. 3. – No. 1. – 2009. – P. 25-38.

10. Kozine I., Krymsky V. An interval-valued reliability model with bounded failure rates // *International Journal of General Systems*. – Vol. 41. – No. 8. – 2012. – P. 760-773.

11. Krymsky V.G. Control Theory Based Uncertainty Model in Reliability Applications // *International Journal of Performability Engineering*. – Vol. 10. – No. 5. – 2014. – P. 477-486.

12. Kozine I. Krymsky V. Computing Interval-Valued Reliability Measures: Application of Optimal Control Methods // *International Journal of General Systems*. – Vol. 46. – No. 2. – 2017. – P. 144-157.

13. Ахмеджанов Ф.М., Крымский В.Г. Интервально-вероятностный алгоритм оценки человеческой надежности: новая модификация методики SPAR-H // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. – 2017. – Т. 13. - № 4. – С. 81-91.

14. Carlson D.A., Haurie A.B., Leizarowitz A. *Infinite Horizon Optimal Control: Deterministic and Stochastic Systems*. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1991. – 220 p.

### References

1. Williams J.C. HEART – a proposed method for achieving high reliability in process operation by means of human factors engineering technology / J.C. Williams // *Proceedings of a Symposium on the Achievement of Reliability in Operating Plant, Safety and Reliability Society (Southport, NC, the USA)*. – Elsevier, 1985. – P. 87-109.

2. Williams J.C. A data-based method for assessing and reducing human error to improve operational performance // *Proceedings of IEEE Fourth Conference on Human Factors in Power Plants (Monterey, CA, the USA)*. –

IEEE Cat. No. 88CH2576-7. – 1988. – P. 436-450.

3. Calixto E. *Gas and Oil Reliability Engineering: Modeling and Analysis* / E. Calixto // Waltham (the USA): Gulf Professional Publishing, 2013. – 545 p.

4. Walley P. *Statistical Reasoning with Imprecise Probabilities* / P. Walley. – London: Chapman and Hall, 1991. – 719 p.

5. Kuznecov V.P. *Interval'nye statisticheskie modeli*. – M.: Sovetskoe radio. – 1991. – 352 p.

6. Utkin L.V. Kozine I.O. Different Faces of the Natural Extension // *Proceedings of the 2nd International Symposium on Imprecise Probabilities and Their Applications*. – Maastricht: Shaker Publ., 2001. – P. 316-323.

7. Krymsky V.G. Computing Interval Bounds for Statistical Characteristics Under Expert-Provided Bounds on Probability Density Functions // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2006. – Vol. 3732. — P. 151-160.

8. Kozine I.O. Krymsky V.G. Computing Interval-Valued Statistical Characteristics: What is the Stumbling Block for Reliability Applications? // *International Journal of General Systems*. – Vol. 38. – No. 5. – 2009. – P. 547-565.

9. Kozine I., Krymsky V.G. Bounded densities and their derivatives: extension to other domains // *Journal of Statistical Theory and Practice*. – Vol. 3. – No. 1. – 2009. – P. 25-38.

10. Kozine I., Krymsky V. An interval-valued reliability model with bounded failure rates // *International Journal of General Systems*. – Vol. 41. – No. 8. – 2012. – P. 760-773.

11. Krymsky V.G. Control Theory Based Uncertainty Model in Reliability Applications // *International Journal of Performability Engineering*. – Vol. 10. – No. 5. – 2014. – P. 477-486.

12. Kozine I. Krymsky V. Computing Interval-Valued Reliability Measures: Application of Optimal Control Methods // *International Journal of General Systems*. – Vol. 46. – No. 2. – 2017. – P. 144-157.

13. Ahmedzhanov F.M., Krymskij V.G. Interval'no-verojatnostnyj algoritm ocenki chelovecheskoj nadezhnosti: novaja modifikacija metodiki SPAR-H // *Elektrotehnicheskije i informacionnyje kompleksy i sistemy*. – 2017. – Т. 13. - № 4. – P. 81-91.

14. Carlson D.A., Haurie A.B., Leizarowitz A. *Infinite Horizon Optimal Control: Deterministic and Stochastic Systems*. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1991. – 220 p.



**Муфтахов Т.И.**  
**Muftakhov T.I.**

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



**Гиниятуллин В.М.**  
**Giniyatullin V.M.**

*кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Вычислительная техника и  
инженерная кибернетика», ФГБОУ ВО  
«Уфимский государственный нефтяной  
технический университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация*

УДК 004.032.26

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-70-78

## **СИМУЛЯЦИЯ ВХОДНЫХ ДАННЫХ НЕЙРОННОЙ СЕТИ НА ПРИМЕРЕ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ ВИРУСНЫМ ГЕПАТИТОМ**

Основной целью статьи является возможность выполнения симуляции входных показателей нейронной сети. Искусственные нейронные сети становятся популярнее из-за того, что полученные с помощью них результаты зачастую бывают более точными, чем результаты других методов искусственного интеллекта. Они являются одним из способов решения той или иной задачи. Отличительное свойство нейронных сетей заключается в их способности обучаться на основе большого числа экспериментальных данных. Например, в медицине в качестве исходных данных выступает множество различных признаков и параметров (анамнез болезни, жизни, клинический осмотр, функциональные методы, результаты лабораторных исследований), на основании которых ставится правильный диагноз.

В данной работе применена искусственная нейронная сеть для дифференциальной диагностики острых и хронических вирусных гепатитов на основе результатов общеклинического и биохимического анализа крови. Были изучены 250 пациентов, зараженных вирусными гепатитами. Из них 61 пациент имеет острый вирусный гепатит А, В, С и 189 пациентов – хронический вирусный гепатит В и С.

В научной статье рассмотрена предметная область, проанализированы изменения в показателях анализов крови при вирусных гепатитах, также изучены основные понятия искусственной нейронной сети и обоснована необходимость в разработке программного симулятора.

Новизна работы заключается в оценке относительной плотности распределения экземпляров обучающей выборки.

Практическая значимость результатов работы состоит в возможности целенаправленного дозаселения пустующих кластеров. При этом указанное дозаселение реализуется как формализованная процедура, поэтому ее результат может быть неадекватен смыслу прикладной области.

В результате исследования выяснилось, что полученная неравномерная плотность распределения входных данных в двоичном, а также в многомерном пространстве предполагает

считать исходную выборку «неполной». Кроме того, впервые показана возможность заселения кластеров симулированными входными данными.

**Ключевые слова:** нейронные сети, кластеризация, диагностика вирусного гепатита, персептрон.

## SIMULATION INPUT DATA OF NEURAL NETWORK ON THE EXAMPLE OF THE INCIDENCE OF VIRAL HEPATITIS

The main purpose of the article is the ability to perform simulation of neural network input parameters. Artificial neural networks are becoming more popular because their results are often more accurate than those of other artificial intelligence methods. They are one way to solve a particular problem. A distinctive feature of neural networks is their ability to learn from a large number of experimental data. For example, in medicine, as the initial data are many different signs and parameters (medical history, life, clinical examination, functional methods, laboratory results), on the basis of which the correct diagnosis is made.

In this work an artificial neural network was used for differential diagnosis of acute and chronic viral hepatitis based on the results of general clinical and biochemical blood analysis. 250 patients infected with viral hepatitis were studied. Of these, 61 patients have acute viral hepatitis A, B, C and 189 patients have chronic viral hepatitis B and C.

In the scientific article the subject area is considered, changes in indicators of blood tests at viral hepatitis are analyzed, the basic concepts of an artificial neural network are also studied and the need for development of the program simulator is proved.

The novelty of the work lies in the evaluation of the relative density distribution of the training sample instances.

The practical significance of the results of the work is the possibility of purposeful pre-settlement of empty clusters. In this case, the specified pre-settlement is implemented as a formalized procedure, so its result may be inadequate to the meaning of the application area.

As a result of the study, it was found that the obtained non-uniform distribution density of the input data in binary, as well as in multidimensional space, assumes that the initial sample is "incomplete". In addition, for the first time shows the possibility of settling clusters simulated input data.

**Key words:** neural networks, clustering, diagnostics of viral hepatitis, a perceptron.

### Введение

Вирусный гепатит является одним из самых широко распространённых заболеваний в мире. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), ежегодно в мире погибают около 2 млн человек от острых и хронических вирусных гепатитов [1].

Вирусный гепатит А отличается повсеместное распространение и неравномерная интенсивность на отдельных территориях. Данный вид гепатита протекает только в острой стадии, а также относительно редко заканчивается смертельным исходом [2].

Гепатиты В и С являются самыми опасными инфекционными заболеваниями в мире. По данным ВОЗ [2], предположительно 325 миллионов человек в мире живут с хронической инфекцией, вызванной вирусом

гепатита В или вирусом гепатита С. Только от хронического гепатита В умирают 40 % больных, инфицированных вирусом HBV [3]. При этом численность хронических больных вирусным гепатитом постоянно растёт.

В некоторых случаях причины болезни однозначно выявить не удастся даже при использовании современных средств диагностики, тогда ставится следующий диагноз: хронический гепатит неуточненной этиологии. Для такого заболевания характерны воспалительно-деструктивные процессы.

При длительном течении хронический вирусный гепатит С может перейти в цирроз или начальные стадии рака печени, поэтому очень важна правильная и своевременная диагностика заболевания.

Наибольший интерес для практического здравоохранения представляют системы дифференциальной диагностики [4] заболеваний. При этом для принятия решений могут использоваться самые разнообразные данные: жалобы пациента, анамнез болезни, клинический осмотр, результаты лабораторных исследований, сложные функциональные методы и др. Для решения подобных задач могут использоваться [5] искусственные нейронные сети (ИНС), представляющие собой мощный и одновременно гибкий метод имитации процессов и явлений. Предметные

области, в которых могут применяться ИНС, весьма обширны и разнообразны по постановкам задач [6, 7].

#### Описание выборки входных показателей

При выполнении работы была сформирована общая выборка из данных о 250 больных вирусными гепатитами А, В и С. Затем общая выборка была разделена на обучающую и тестовую выборку. В таблице 1 представлены 23 входных параметра нейронной сети.

Таблица 1. Входные параметры нейронной сети

№ п/п	Показатель	Диапазон изменения	Единица измерения
1	Пол	мужской, женский	-
2	Возраст	7... 81	лет/год
3	Гемоглобин	74... 193	г/л
4	Эритроциты	1,85... 5,91	$\times 10^{12}/л$
5	Лейкоциты	1,4... 16,8	$\times 10^9/л$
6	Тромбоциты	26... 417	$\times 10^9/л$
7	Скорость оседания эритроцитов (СОЭ)	1... 51	мм/ч
8	Глюкоза	3,3... 9,8	ммоль/л
9	Холестерин	1,8... 9,6	ммоль/л
10	Общий билирубин	5... 366,1	мкмоль/л
11	Тимоловая проба	0,25... 34	ед.
12	Аспаратаминотрансфераза (АСТ)	15... 3630	ед/л
13	Аланинаминотрансфераза (АЛТ)	9... 4014	ед/л
14	Гамма-глутамилтранспептидаза (ГГТ)	11... 1436	ед/л
15	Щелочная фосфатаза (ЩФ)	31... 1581	ед/л
16	Общий белок	60... 100	г/л
17	Вид вирусного гепатита	А, В, С	-
18	Форма тяжести	Легкая, среднетяжелая, тяжелая	-
19	Альбумин	32,48... 57,2	г/л
20	Концентрация $\alpha 1$	1,99... 18,48	%
21	Концентрация $\alpha 2$	4,92... 17,07	%
22	Концентрация $\beta$	7,11... 23,0	%
23	Концентрация $\gamma$	15,45... 42,0	%

В обучающей выборке содержатся данные о 225 пациентах, из которых 58 больны острыми вирусными гепатитами А, В и С и 167 – хроническими вирусными гепатитами

В и С. В тестовую выборку попали данные о 3 больных острыми вирусными гепатитами А и В и данные о 22 больных хроническими гепатитами В и С.

Из таблицы 1 видно, что такие показатели, как пол, вид гепатита и форма тяжести являются нечисловыми данными. Они были представлены в дискретном виде: пол – бинарный (мужской = 1, женский = -1), вид гепатита – четырехзначный, но гепатит неуточненной этиологии в данной работе не рассматривается, поэтому виды гепатита кодируются так: A = 0, B = -1, C = 1. Форма тяжести – исчисляемый параметр и кодируется следующим образом: легкая = -1, среднетяжелая = 0, тяжелая = 1. Остальные показатели масштабированы в диапазон [-1; 1]. Выходной слой кодируется так: острое течение = -1, хроническое течение = 1.

**Структура персептрона**

Для обучения нейронной сети использовалось свободное программное обеспечение Multiple Back-Propagation [8]. Исходя из многократных проведенных тестов, была выбрана следующая структура персептрона: два нейрона в скрытом слое, выходной слой

состоит из одного нейрона. В качестве функции активации в скрытом и выходном слоях используется функция гиперболического тангенса. Обучение искусственной нейронной сети осуществлялось с помощью метода обратного распространения ошибки (backpropagation). В результате обучения получаются матрицы весов скрытого и выходного слоя персептрона (рис. 1).

**Подмена функции активации на пороговую**

Распишем подробнее рабочий ход персептрона, выполнив следующие действия в электронных таблицах:

1. Результат выполнения скалярного умножения вектора входов на матрицу весов скрытого слоя приведен на рисунке 2 (столбцы ps1 и ps2).
2. Результат применения функции активации (гиперболический тангенс) к результату скалярного умножения представлен в столбцах p1 и p2.

to the 1th hidden layer	1th neuron	2th neuron	to the output layer	1th neuron
bias	-0,928338	-0,337032	bias	-3,2349
1th weight	0,307831	0,294374	1th weight	3,4011
2th weight	0,797554	1,02618	2th weight	3,13924
3th weight	1,2414	-0,357926		
4th weight	-0,83936	-1,66756		
5th weight	-1,19906	-0,714341		
6th weight	0,31524	-1,72561		
7th weight	-1,14925	0,545223		
8th weight	0,0759451	1,49098		
9th weight	1,50956	-0,0692936		
10th weight	0,45035	-4,61832		
11th weight	-0,846072	-2,08323		
12th weight	-0,771772	0,227809		
13th weight	-4,73377	0,0928176		
14th weight	1,39388	-0,914482		
15th weight	-2,57924	1,16982		
16th weight	0,248778	-0,0510175		
17th weight	0,534629	0,501062		
18th weight	4,48537	-0,618889		
19th weight	0,00148284	-0,0956685		
20th weight	0,00759095	-0,220889		
21th weight	-0,649486	1,56455		
22th weight	-0,261958	-0,683136		
23th weight	0,301353	0,411919		

**Рисунок 1.** Веса нейронов скрытого и выходного слоя персептрона

3. Результат скалярного умножения матрицы из столбцов p0...p2 и вектора весов выходного слоя представлен в столбце us1.

4. Применение гиперболического тангенса к столбцу us1 и округление до целого числа – столбец y1.

ps1	ps2	p0	p1	p2	ys1	y1
6,399	1,522	1	0,999994	0,909031	3,019849	1
6,769	-4,061	1	0,999997	-0,99941	-2,97118	-1
0,524	2,508	1	0,48091	0,986813	1,498568	1
1,398	3,530	1	0,884815	0,998285	2,908303	1
1,187	2,688	1	0,82975	0,99079	2,697492	1
0,321	-2,234	1	0,309995	-0,97732	-5,24861	-1
4,944	-3,939	1	0,999898	-0,99924	-2,97101	-1
1,887	4,476	1	0,955145	0,999741	3,152069	1
0,659	2,497	1	0,5777	0,986524	1,82685	1
1,437	4,667	1	0,893123	0,999823	2,941386	1
-2,032	-0,707	1	-0,96622	-0,60859	-8,43162	-1
0,948	5,698	1	0,738701	0,999978	2,416664	1
4,028	-1,303	1	0,999365	-0,86261	-2,5439	-1
1,309	3,501	1	0,864014	0,998181	2,837231	1
-6,678	-0,547	1	-1	-0,49844	-8,2007	-1
-0,606	-3,590	1	-0,54113	-0,99848	-8,20978	-1
-2,544	0,379	1	-0,98775	0,362229	-5,4572	-1
4,336	1,760	1	0,999657	0,942449	3,123608	1

Рисунок 2. Фрагмент таблицы результатов рабочего хода

Сравнение ожидаемого выхода обучающей выборки с результатом рабочего хода персептрона (столбец y1 на рис. 2-4) демонстрирует их совпадение. Считается, что данный персептрон обучен правильно. Тестовая выборка также полностью распознается без ошибок.

Затем было замечено, что в некоторых строках, например, как на приведенном выше рисунке у двух выделенных строк значения в столбцах ys1, p1 и p2 практически совпадают. Поэтому предложено заменить гиперболическую функцию активации троичной пороговой функцией [9] следующего вида:

$$y=f(a)=\begin{cases} -1, & \text{при } x < -0,5; \\ 0, & \text{при } -0,5 \leq x \leq 0,5; \\ 1, & \text{при } x > 0,5. \end{cases}$$

Для этого производились следующие действия: значения в столбцах p1 и p2 (рис. 2) округляются до целого, затем копируются в текстовый редактор, благодаря этому данные теряют форматирование и преобразуются в целые числа. Далее они копируются из текстового редактора в ячейки p1 и p2, это заменяет исходные числа на их округленные значения (рис. 3).

ps1	ps2	p0	p1	p2	ys1	y1
6,399	1,522	1	1	1	3,30544	1
6,769	-4,061	1	1	-1	-2,97304	-1
0,524	2,508	1	0	1	-0,09566	1
1,398	3,530	1	1	1	3,30544	1
1,187	2,688	1	1	1	3,30544	1
0,321	-2,234	1	0	-1	-6,37414	-1
4,944	-3,939	1	1	-1	-2,97304	-1
1,887	4,476	1	1	1	3,30544	1
0,659	2,497	1	1	1	3,30544	1
1,437	4,667	1	1	1	3,30544	1
-2,032	-0,707	1	-1	-1	-9,77524	-1
0,948	5,698	1	1	1	3,30544	1
4,028	-1,303	1	1	-1	-2,97304	-1
1,309	3,501	1	1	1	3,30544	1
-6,678	-0,547	1	-1	0	-6,636	-1
-0,606	-3,590	1	-1	-1	-9,77524	-1
-2,544	0,379	1	-1	0	-6,636	-1
4,336	1,760	1	1	1	3,30544	1

Рисунок 3. Фрагмент результатов подмены на функцию активации

В результате подмены гиперболической функции активации на пороговую значения в столбце  $ys1$  изменились, и в некоторых строках эти значения полностью совпадают, что соответствует равным значениям  $p1$  и  $p2$ . При этом выходной результат, расположенный в столбце  $y1$  (рис. 3), остался прежним при неизменных коэффициентах матриц весов. Тогда можно говорить, что нейроны скрытого слоя в результате скалярного умножения преобразуют пространство исходных признаков в некое непрерывное пространство, обозначенное столбцами  $ps$ .

Далее пороговая функция активации формирует дискретно троичное пространство выходов скрытого слоя, это столбцы  $p1$  и  $p2$  на рисунке 3. Поскольку алгоритм обучения персептронов изменяет значения весов пропорционально фиксированной константе – скорости обучения, то можно утверждать, что и непрерывные функции активации тоже формируют дискретное выходное простран-

ство, но большей значности. Тогда троичность – это всего лишь относительно простой, частный случай. При этом нейрон выходного слоя (столбец  $y1$ ) реализует смешанную 3-2 логику, аргументы которой троичны, а результат бинарный [10].

#### Распределение кластеров в непрерывном пространстве

После сортировки строк по возрастанию столбца  $ys1$  выделяются кластеры – это строки с одинаковыми значениями в столбцах  $p1$ ,  $p2$  и, как следствие, в столбце  $ys1$  (рис. 4). Кластеризация данных позволяет выявить объекты, которые имеют одинаковые или схожие характеристики.

Возможно существование 9 кластеров, исходя из двумерной плоскости. В данном случае обнаружено 7, при этом кластеры  $(1; 0)$  и  $(0; 0)$  остались незаселёнными.

ps1	ps2	p1	p2	ys1	
-1,154	-0,595	-1	-1	-9,775	1 кластер
-2,032	-0,707	-1	-1	-9,775	
-0,606	-3,590	-1	-1	-9,775	
-6,678	-0,547	-1	0	-6,636	2 кластер
-2,544	0,379	-1	0	-6,636	
-2,367	0,290	-1	0	-6,636	
0,321	-2,234	0	-1	-6,374	3 кластер
-2,903	3,954	-1	1	-3,497	4 кластер
-2,642	3,604	-1	1	-3,497	
-2,382	0,701	-1	1	-3,497	
-8,712	4,291	-1	1	-3,497	
2,778	-5,260	1	-1	-2,973	5 кластер
4,944	-3,939	1	-1	-2,973	
6,015	-4,737	1	-1	-2,973	
6,769	-4,061	1	-1	-2,973	
9,095	-5,139	1	-1	-2,973	
0,524	2,508	0	1	-0,096	6 кластер
-0,368	5,821	0	1	-0,096	
0,512	5,334	0	1	-0,096	
0,946	3,462	1	1	3,305	7 кластер
0,936	5,304	1	1	3,305	
0,811	2,852	1	1	3,305	

Рисунок 4. Фрагмент таблицы с кластерами

Необходимо отметить, что значения в строках столбцов  $ps1$  и  $ps2$  не изменились после замены на пороговую функцию. Было решено каждому кластеру присвоить свой символ: представители первого кластера обозначены синими ромбами, второго – фио-

летовыми прямоугольниками, третьего – черными треугольниками, четвертого – коричневыми крестиками, пятого – голубыми снежинками, шестого – красными кругами и седьмого – зелеными квадратами; и этих представителей кластеров отобразить в

непрерывном пространстве  $ps$ , т.е. результат скалярного умножения входного вектора на матрицу весов скрытого слоя, на графике.

Полученный график распределения представлен на рисунке 5.

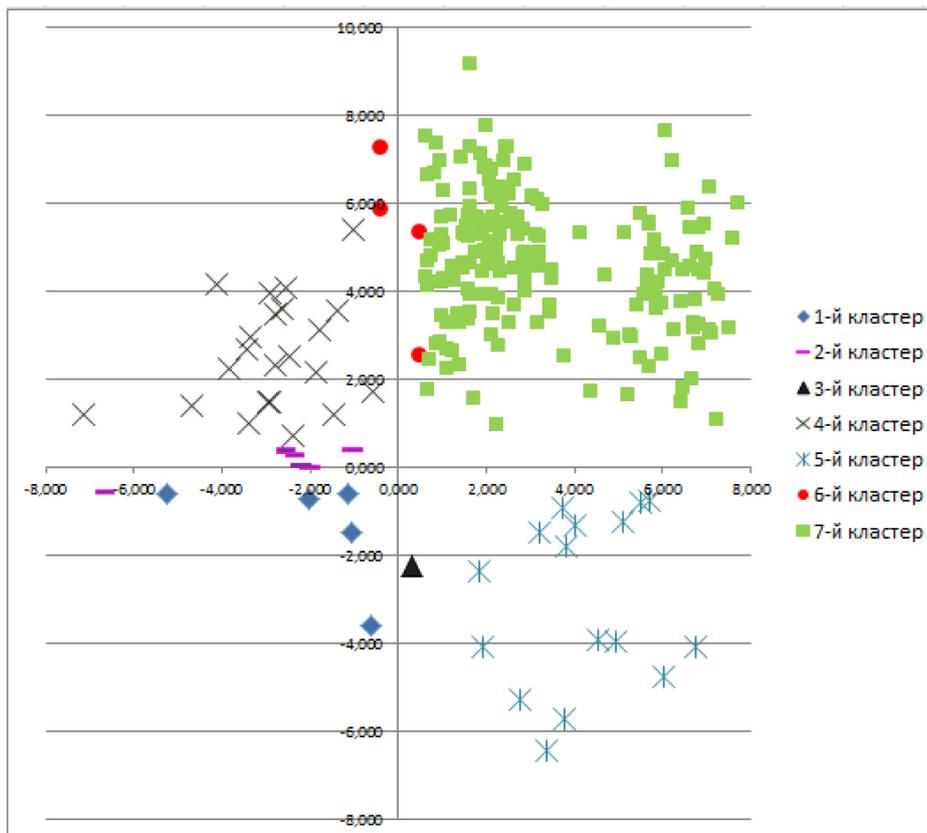


Рисунок 5. Распределение кластеров в непрерывном пространстве

Из рисунка 5 видно, что в непрерывном пространстве  $ps$  кластер  $(-1; -1)$ , условно обозначенный синими ромбами, заселен неравномерно, также в нем отсутствуют значения с «большими минусами» в столбцах  $ps1$ ,  $ps2$  одновременно (рис. 4). Естественно, возникает предположение, что исходная выборка «неполная». Более того, можно утверждать, что при обучении ИНС необходимо учитывать распределение экземпляров обучающей выборки по пространству входных признаков. Далее авторы предприняли попытку симуляции входных данных.

Следует отметить, что каждому кластеру двумерного дискретного пространства  $p$  соответствует  $n$ -мерный выпуклый многогранник в пространстве входов – симплекс [11]. В данном случае имеется 9 симплексов в 23-мерном пространстве входов. В таблице 1 имеются 3 дискретных параметра и 20 числовых, изменяющихся в диапазоне. В ходе обучения ИНС все входные параметры масштабируются в диапазон  $[-1; 1]$ . При их полном переборе с шагом в 0,1 число возмож-

ных комбинаций превышает цифру в 2020. Следовательно, симуляция всевозможных комбинаций входных параметров с достаточно малым шагом невозможна. Поэтому симуляция входных данных производилась случайным образом с использованием разработанного симулятора.

В результате выполнения симуляции входных данных, вопреки ожиданиям, 1 строка из 50 симулированных попала в кластер  $(0; 0)$  – это строка № 6 (рис. 6). Кроме того, найдены 15 строк, которые заселяют кластер  $(-1; -1)$ , и, самое главное, попадают в область «больших минусов».

В симулированной выборке незаселённым оказался кластер  $(0; -1)$  и кластер  $(1; 0)$ , который также не был заселён и в исходной выборке. Решено целенаправленно найти представителей данного кластера следующим образом. Десятый вес второго нейрона матрицы весов скрытого слоя (рис. 1) имеет наибольшее значение, следовательно, при изменении десятого входного параметра значение столбца  $ps2$  будет изменяться сильнее,

чем при изменении других входов. Перебором десятого входного параметра с шагом в 0,1 в итоге были обнаружены две строки, принадлежащие к искомому кластеру.

Симплексы входного пространства признаков образованы пересечениями разделяющих плоскостей и границами гиперкуба. Поскольку удалость обнаружить представителей всех 9 симплексов, то можно утверждать, что все они полностью или частично расположены в границах единичного 23-мерного гиперкуба.

Как было сказано ранее, из 50 симулированных строк 15 относятся к кластеру (-1; -1).

Среди них лишь одна строка под номером 8, выделенная на рисунке 6, соответствует правильному диагнозу: у данного теоретически возможного больного острый вирусный гепатит В среднетяжелой формы (значение общего билирубина лежит в диапазоне 100-200 мкмоль/л, что характерно для данной формы тяжести). Остальные строки оказались некорректными, например, у первых шести пациентов диагностирован хронический гепатит А, тогда как гепатит А принимает только острое течение.

№ п/п	пол	возраст	общий билирубин	АСТ	АЛТ	вирусный гепатит	форма тяжести	F (выход)	p1	p2
1	мужской	36	296,3	347	3332	А	среднетяж.	хронический	-1	-1
2	женский	12	264,8	2458	3963	А	легкая	хронический	-1	-1
3	мужской	17	283,5	2556	3737	А	среднетяж.	хронический	-1	-1
4	женский	17	109,8	391	3004	А	среднетяж.	хронический	-1	-1
5	мужской	29	353,7	2778	789	А	легкая	хронический	-1	-1
6	женский	36	264,6	152	2024	А	среднетяж.	острый	-1	-1
7	мужской	71	271,0	231	3036	А	легкая	острый	-1	-1
8	женский	57	125,6	3401	4000	В	среднетяж.	острый	-1	-1
9	женский	32	267,0	1777	2873	В	среднетяж.	острый	-1	-1
10	женский	74	288,7	1523	3806	В	среднетяж.	хронический	-1	-1
11	женский	74	321,4	2205	2994	В	среднетяж.	острый	-1	-1
12	женский	12	354,2	298	1930	В	среднетяж.	острый	-1	-1
13	женский	64	351,5	1509	718	В	легкая	острый	-1	-1
14	женский	9	298,5	705	2530	С	среднетяж.	хронический	-1	-1
15	мужской	22	356,9	3440	1311	С	среднетяж.	хронический	-1	-1

Рисунок 6. Проверка симулированных данных

Это означает, что симулированные данные можно использовать для дообучения ИНС только после проверки их на корректность экспертом в прикладной области.

### Выводы и направления дальнейших исследований

1. Впервые было показано, что подмена непрерывной функции активации на пороговую позволяет производить кластеризацию входных данных не только по значению выходного нейрона, но и по значениям нейронов скрытого слоя.

2. Также впервые продемонстрирована возможность заселения симплексов входного пространства симулированными данными. В данном случае оказалось, что часть симулированных данных некорректна, притом, что перцептрон распознаёт тестовую выборку без

ошибок. Следовательно, исходная обучающая выборка «неполная».

3. В дальнейшем планируется сформулировать меру «полноты» обучающей выборки и критерий адекватности математической модели процесса, реализуемого искусственной нейронной сетью.

### Список литературы

1. <http://www.tiensmed.ru/illness/gepatit3.html> (дата обращения: 03.12.2017).
2. <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2017/global-hepatitis-report/ru/> (дата обращения: 03.12.2017).
3. Шувалова Е.П., Белозеров Е.С., Беляева Т.В., Змушко Е.И. Инфекционные болезни: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Е.П. Шуваловой; серия «Учебники и учебные пособия» – Ростов н/Д: Феникс, 2001. – 960 с.

4. <https://vocabulary.ru/termin/diagnostika-differencialnaja.html> (дата обращения: 04.12.2017).
5. Веденяпин Д.А., Лосев А.Г. Об одной нейросетевой модели диагностики венозных заболеваний // Управление большими системами. – Вып. 39. – М.: ИПУ РАН, 2012. – С. 219–229.
6. Арсланов И.Г., Дмитриев Г.Ю., Гиниятуллин В.М., Зайцева А.А., Кирлан С.А. Прогнозирование химических соединений с комплексом необходимых свойств // Башкирский химический журнал. – 2015. – Т. 22. - № 2. – С. 80–85.
7. Akhmetshin R.M., Ginijatullin V.M., Kirlan S.A. Identification of Structures of Organic Substances by Means of Complex-valued Perceptron // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2012. – Vol. 21. - № 1. – P. 11–25.
8. <http://mbp.sourceforge.net>(дата обращения: 26.11.2017).
9. Гиниятуллин В.М., Скрыпин А.Р., Тайсин Р.Р. Линейная разделимость функций троичной логики // Актуальные проблемы науки и техники – 2015: Материалы VIII Международной научно-практической конференции молодых ученых, 2015. – С. 116–119.
10. Гиниятуллин В.М. Троичная логика в нейросетевом базисе // Теоретико-методологические проблемы естественнонаучных методов в гуманитарных науках: Сборник статей Международной научно-практической конференции, 2014. – С. 318–325.
11. Палий И.А. Линейное программирование: Учебное пособие. – М.: Эксмо, 2008. – 256 с. – (Техническое образование).
4. <https://vocabulary.ru/termin/diagnostika-differencialnaja.html> (data obrashhenija: 04.12.2017).
5. Vedenjapin D.A., Losev A.G. Ob odnoj nejrosetevoj modeli diagnostiki venoznyh zabolevanij // Upravlenije bol'shimi sistemami. – Vyp. 39. – M.: IPU RAN, 2012. – P. 219–229.
6. Arslanov I.G., Dmitriev G.Ju., Ginijatullin V.M., Zajceva A.A., Kirlan S.A. Prognozirovanie himicheskikh sojedenenij s kompleksom neobhodimyh svojstv // Bashkirskij himicheskij zhurnal. – 2015. – Vol. 22. - № 2. – P. 80–85.
7. Akhmetshin R.M., Ginijatullin V.M., Kirlan S.A. Identification of Structures of Organic Substances by Means of Complex-valued Perceptron // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2012. – Vol. 21. - № 1. – P. 11–25.
8. <http://mbp.sourceforge.net>(data obrashhenija: 26.11.2017).
9. Ginijatullin V.M., Skrypin A.R., Tajsin R.R. Linejnaja razdelimost' funkcij troichnoj logiki // Aktual'nyje problemy nauki i tehniki – 2015. Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii molodyh uchenyh, 2015. – P. 116–119.
10. Ginijatullin V.M. Troichnaja logika v nejrosetevom bazise // Teoretiko-metodologicheskie problemy jestestvennonauchnyh metodov v gumanitarnyh naukah // Sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – 2014. – P. 318–325.
11. Palij I.A. Linejnoje programmirovanije: Uchebnoe posobie. – M.: Eksmo, 2008. – 256 p. – (Tehnicheskoe obrazovanije).

### References

1. <http://www.tiensmed.ru/illness/gepatit3.html> (data obrashhenija: 03.12.2017).
2. <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2017/global-hepatitis-report/ru/> (data obrashhenija: 03.12.2017).
3. Shuvalova E.P., Belozarov E.S., Beljaeva T.V., Zmushko E.I. Infekcionnyje bolezni: Ucheb. posobie dlja vuzov; Pod red. E.P. Shuvalovoj / Serija «Uchebniki i uchebnyje posobija». – Rostov n/D: Feniks, 2001. – 960 p.



**Коледин С.Н.**  
**Koledin S.N.**

старший преподаватель  
кафедры «Математика»  
Уфимского  
государственного  
нефтяного  
технического  
университета,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Коледина К.Ф.**  
**Koledina K.F.**

кандидат физико-математи-  
ческих наук, научный  
сотрудник лаборатории  
математической химии  
Института нефтехимии и  
катализа  
УФИЦ РАН, доцент  
кафедры «Математика»  
Уфимского  
государственного нефтя-  
ного технического  
университета, г. Уфа,  
Российская Федерация



**Губайдуллин И.М.**  
**Gubaydullin I.M.**

доктор физико-математи-  
ческих наук, доцент, стар-  
ший научный сотрудник  
лаборатории математиче-  
ской химии Института  
нефтехимии и катализа  
УФИЦ РАН, профессор  
кафедры «Технология нефти  
и газа» Уфимского госуда-  
рственного нефтяного тех-  
нического университета,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Муллаянова А.Ф.**  
**Mullaianova A.F.**

аспирант лаборатории математической  
химии Института нефтехимии и катализа  
УФИЦ РАН, г. Уфа  
Российская Федерация



**Габитов С.А.**  
**Gabitov S.A.**

магистрант Уфимского государственного  
нефтяного технического университета,  
г. Уфа,  
Российская Федерация

УДК 517.977.5

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-79-86

## ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА КАТАЛИТИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ МАТЕМАТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

В работе приведена схема информационной системы последовательного анализа катали-  
тических реакций математическими методами. Анализ начинается с построения кинетиче-  
ской модели и заканчивается оптимизацией условий проведения химического процесса,

базируясь на кинетической модели как на фундаментальных закономерностях его протекания.

Задача оптимизации кинетических параметров стадий представлена в виде основных модулей: 1) ввод данных; 2) прямая кинетическая задача расчета концентраций веществ по заданным параметрам; 3) обратная кинетическая задача восстановления кинетических параметров по экспериментальным данным; 4) вывод результатов. В каждом модуле определены входные параметры и выполняемые функции. При решении обратной кинетической задачи происходит восстановление кинетических параметров исходя из соответствия экспериментальных данных и расчетных значений. Вводятся несколько параметров: вид функционала невязки; метод решения обратной задачи. При выборе численного метода расчета обратной кинетической задачи необходимо комбинировать методы для глобального поиска и поиска локального экстремума. Наиболее быстрые методы, то есть методы за меньшие сроки приводящие к требуемому функционалу невязки: глобальный поиск (global search) и multistart, метод Хука-Дживса (pattern search), генетический алгоритм, симуляция отжига (simulated annealing) и др.

**Ключевые слова:** каталитические реакции, обратная кинетическая задача, схема последовательного анализа каталитической реакции, метод глобального поиска, метод Хука-Дживса, генетический алгоритм, симуляция отжига, Matlab, функционал невязки, планирование эксперимента.

## INFORMATION SYSTEM OF CONSISTENT ANALYSIS OF CATALYTIC REACTIONS BY MATHEMATICAL METHODS

The paper presents a diagram of an information system for the sequential analysis of catalytic reactions by mathematical methods. The analysis begins with the construction of a kinetic model and ends with the optimization of the conditions of the chemical process, based on the kinetic model, as the fundamental laws governing its occurrence.

The task of optimizing the kinetic parameters of the stages is presented in the form of basic modules: 1) data entry; 2) the direct kinetic problem of calculating the concentrations of substances according to given parameters; 3) the inverse kinetic problem of restoring kinetic parameters from experimental data; 4) output results. Each module defines the input parameters and functions performed. When solving the inverse kinetic problem, the kinetic parameters are restored, based on the fit of the experimental data and the calculated values. Several parameters are introduced: type of residual functional; method for solving the inverse problem. When choosing a numerical method for calculating an inverse kinetic problem, it is necessary to combine methods for global search and search for a local extremum. The fastest methods, that is, methods in less time lead to the required functional of the discrepancy: global search (global search) and multistart; Hook-Jeeves method (pattern search); genetic algorithm; simulated annealing (simulated annealing) and others.

**Key words:** catalytic reactions, inverse kinetic problem, sequential analysis scheme of the catalytic reaction, global search method, Hook-Jeeves method, genetic algorithm, annealing simulation, Matlab, residual functional, experimental design.

### Введение

На сегодняшний день исследования в области оптимизации сложных каталитических реакций в основном проводятся индивидуально для каждого рассматриваемого процесса. Однако общие закономерности протекания каталитических реакций – кинетические модели – позволяют разработать

единую методологию оптимизации процессов по различным параметрам: условия проведения реакции, начальные количества исходных реагентов, цикличность проведения процесса [1]. Кроме того, в данных исследованиях целевыми функциями оптимизации зачастую являются физико-химические показатели: выход продукта, селектив-

ность, конверсия. Однако для внедрения процессов в производство кроме физико-химических показателей необходимо рассматривать экономические, экологические факторы. Причем решение задачи оптимизации необходимо вести по нескольким заданным независимым критериям одновременно, что приведет к получению компромиссных значений параметров оптимизации и позволит принимать решения об условиях проведения процесса на производстве [2, 3].

Объединение понятий «информационная технология» и «технологии каталитических реакций» в единую систему позволяет решить сложные задачи оптимизации и управления, которые невозможно решить в отдельности [4].

Методы оптимизации при исследовании каталитических реакций необходимы на всех уровнях. На первом этапе необходимо построить кинетическую модель реакции, определить значения кинетических параметров с помощью решения обратной кинетической задачи. Решение такой задачи ведется алгоритмами оптимизации с целью минимизации функционала отклонения расчетных значений исследуемых параметров от экспериментальных данных [5]. На следующих этапах проводится оптимизация условий реакции с целью достижения экстремумов функционалов качества проведения процесса. Эти задачи могут быть задачами одноцелевой оптимизации, многоцелевой оптимизации или оптимального управления [6].

Разработка единой информационной системы алгоритмов оптимизации при иссле-

довании каталитических реакций позволит проводить исследования широкого класса каталитических реакций и объективно анализировать их с целью последующего внедрения в производство [7, 8]. Полученная информационная система трансформирует входящие данные с лабораторных установок для выработки оптимальных решений по управлению сложными каталитическими процессами, с учётом технологических, экономических и экологических критериев [9].

### 1. Задача оптимизации кинетических параметров стадий

Задача оптимизации кинетических параметров стадий представлена в виде основных модулей: 1) ввод данных; 2) прямая кинетическая задача расчета концентраций веществ по заданным параметрам; 3) обратная кинетическая задача восстановления кинетических параметров по экспериментальным данным; 4) вывод результатов. В каждом модуле необходимо определить входные параметры и выполняемые функции.

Ввод данных. В данном модуле при решении задач оптимизации для каталитических реакций требуется определить программную среду, где будут происходить расчеты (Matlab, Python). Во многих вычислительных программах уже реализованы многие алгоритмы, что снизит затраты времени на создание программного кода вычисления. На следующем этапе при совместной работе с химиками экспериментаторами вводятся экспериментальные данные реакции (рис. 1).

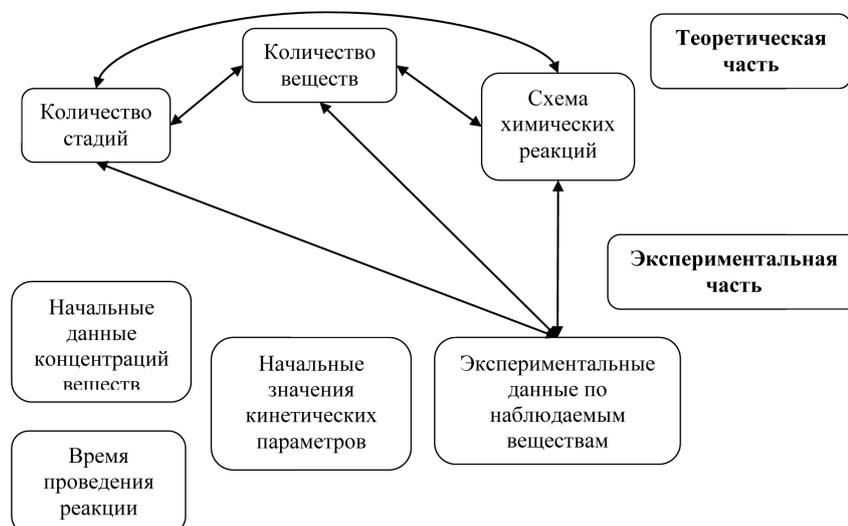


Рисунок 1. Параметры модуля «Ввод данных»

Заполнение блока разделено на теоретическую и экспериментальную части, что связано с логикой проведения химической реакции. В теоретической части, исходя из литературных источников, составляются предположительные схемы протекания реакций. По предложенным схемам и известным активационным параметрам выдвигается гипотеза о количестве веществ и возможных стадиях протекания каталитической реакции. На экспериментальной части в систему вводятся начальные данные концентраций веществ, время проведения реакции, начальные значения кинетических параметров. В ходе проведения реакции вводятся экспериментальные данные наблюдаемых веществ. На данном этапе химики-экспериментаторы могут проводить корректировку теоретической части. При наблюдении промежуточных веществ можно изменить схемы протекания реакции, количество веществ и количество стадий.

На данном этапе необходимо тесное взаимодействие между химиками-экспериментаторами и специалистами по математическому моделированию, по информационным технологиям (по базам данных, по технологии параллельных вычислений и т.д.). При необходимости проводятся дополнительные эксперименты при различной температуре, давлении, начальном количестве катализатора и пр.

## 2. Прямая кинетическая задача расчета концентраций веществ по заданным параметрам

В данном модуле входящим параметром будет вид математической модели в зависимости от предположительной схемы протекания каталитической реакции. Если схем несколько, тогда составляется несколько математических моделей, и расчеты по каждой проводятся независимо, параллельно. Также выбирается численный метод расчета в зависимости от известных условий. Методы могут быть явными, неявными; для жестких, нежестких задач; различного порядка и пр. (Рунге-Кутты, Гира, Кутты-Мерсона и др.). Определяется сходимость и устойчивость методов. Правильно выбранный метод позволяет проводить расчеты с

наименьшим отклонением от реального результата, с наилучшей сходимостью.

Основная функция данного модуля – это формирование математической модели в виде системы дифференциальных уравнений с начальными данными. В зависимости от характера протекания реакции системы дифференциальных уравнений могут основываться на законах действующих масс, действующих поверхностей, на эмпирических законах.

Так, при рассмотрении изотермической нестационарной реакции, протекающей в закрытой системе, без изменения числа молей, математическое описание примет вид системы дифференциальных уравнений (1) [10, 11]:

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{j=1}^J v_{ij} w_j, \quad i = 1, \dots, I,$$

$$w_j = k_j \cdot \prod_{i=1}^I (x_i)^{\alpha_{ij}} - k_{-j} \cdot \prod_{i=1}^I (x_i)^{\beta_{ij}},$$

$$k_j = k_j^0 \exp\left(-\frac{E_j^+}{RT}\right); \quad k_{-j} = k_{-j}^0 \exp\left(-\frac{E_j^-}{RT}\right). \quad (1)$$

С начальными условиями: при  $t=0$ ,  $x_i(0)=x_i^0$ ; где  $t$  – время реакции, мин или ч;  $v_{ij}$  – коэффициенты стехиометрии;  $J$  – число стадий,  $x_i$  – концентрации реагентов, моль/л;  $I$  – число веществ;  $w_j$  – скорость стадии, 1/мин;  $k_j, k_{-j}$  – константы скорости стадии (приведенные), 1/мин;  $E_j^+, E_j^-$  – энергии активации стадий, ккал/моль;  $T$  – температура, К;  $\alpha_{ij}$  – отрицательные элементы матрицы ( $v_{ij}$ );  $\beta_{ij}$  – положительные элементы ( $v_{ij}$ );  $k_j^0, k_{-j}^0$  – предэкспоненциальные множители, 1/мин;  $R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль\*К).

Система (1) представляет собой задачу Коши [12]. Под прямой задачей определяют расчет концентраций реагентов в зависимости от времени при заданных константах скоростей ( $k_j$ ). Под обратной задачей – расчет таких значений констант скоростей, путем решения системы (1) с которыми приходим к значениям  $x_i$ , максимально приближенным к экспериментальным данным [13, 14].

### 3. Обратная кинетическая задача восстановления кинетических параметров по экспериментальным данным

В данном модуле происходит восстановление кинетических параметров, исходя из соответствия экспериментальных данных и расчетных значений. Вводятся несколько параметров: вид функционала невязки, метод решения обратной задачи.

Функционал невязки выбирается в зависимости от условий проведения эксперимента. Все методы имеют свои преимущества и недостатки [15]. Методы можно разделить на устойчивые к резким выбросам в экспериментальных данных и неустойчивые.

$F = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (x_{ij}^e - x_{ij}^c)^2$  – не устойчивое к резким выбросам в экспериментальных данных.

$F = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |(x_{ij}^e - x_{ij}^c)|$  – устойчивое к резким выбросам в экспериментальных данных.

Очевидно, что в случае когда нет резкого выброса в экспериментальных данных, лучше применять метод наименьших квадратов.

$F = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \psi_j (x_{ij}^e - x_{ij}^c)^2$  (где  $\psi_j$  – весовой коэффициент реагента) – применяется, когда необходимо учитывать значимость и точность отдельных наблюдений.

Следующий параметр – метод решения обратной задачи. Так как обратная задача относится к некорректно поставленным задачам и не имеет единственное решение, то при выборе численного метода расчета необходимо комбинировать методы для глобального поиска и поиска локального экстремума. Наиболее быстрые методы, то есть за меньшие сроки приводящие к требуемому функционалу невязки, – глобальный поиск (global search) и multistart, метод Хука-Дживса (pattern search), генетический алгоритм, симуляция отжига (simulated annealing) и др. [16].

1. Глобальный поиск (global search) и multistart. В основе лежат алгоритмы расчета градиента. Расчет начинается из нескольких начальных точек, с определением локального и глобального решений.

2. Метод Хука-Дживса (pattern search). Реализует алгоритм Хука-Дживса или алго-

ритм прямого поиска. Не накладывает ограничение дифференцируемости функции.

3. Генетический алгоритм. Имитирует принципы биологической эволюции, с изменением популяции отдельных точек. Имеет случайный характер, что позволяет определять глобальный экстремум. Не накладывает ограничение дифференцируемости функции.

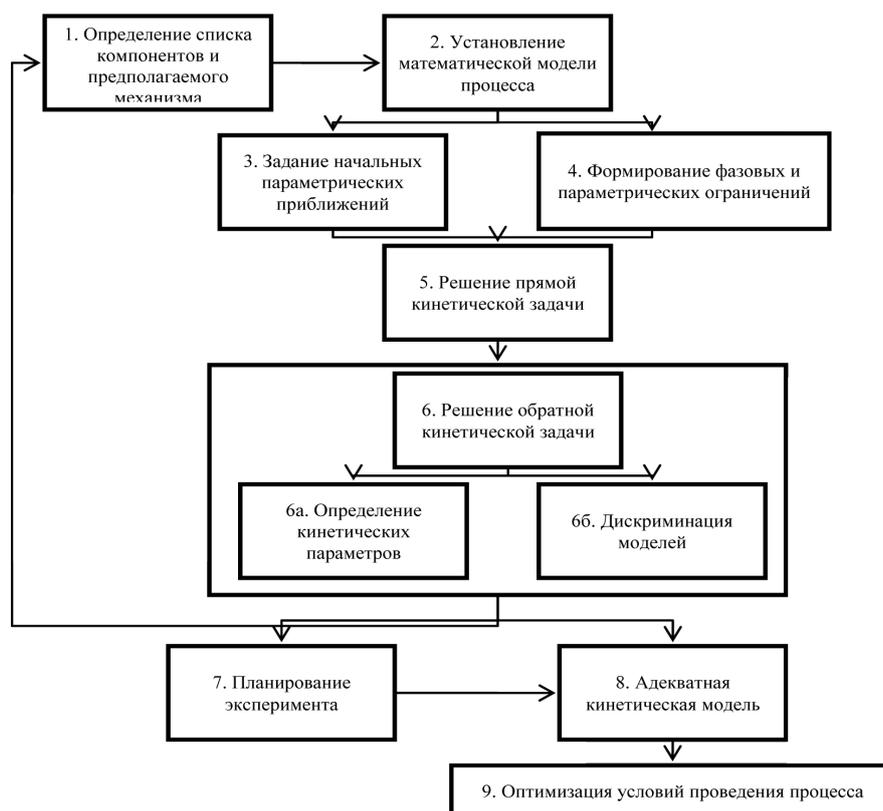
4. Симуляция отжига (simulated annealing). Каждая итерация моделируемого алгоритма отжига стремится улучшить текущий минимум, медленно снижая объем поиска.

Последним модулем является *вывод результатов*:

- вывод концентраций веществ численно в таблицы;
- вывод концентраций веществ графически;
- вывод скоростей стадий численно или графически.

### 4. Схема последовательного анализа химического процесса

На рисунке 2 представлен пошаговый алгоритм построения кинетической модели химической реакции [17]. На первом шаге необходимо определить номенклатуру реагентов процесса, соответствующие начальные данные, условия проведения химической реакции, предполагаемые схемы химических превращений. На втором шаге – определить систему дифференциальных уравнений (1). Затем (шаг 3) задаются начальные приближения кинетических параметров. Одновременно с этим, на 4-м шаге, задаются ограничения на параметры. На 5-м шаге решается прямая кинетическая задача расчета зависимостей изменения концентраций участвующих в реакции веществ.



**Рисунок 2.** Схема последовательного анализа каталитической реакции

Решение обратной задачи (шаг 6) является основным этапом анализа. Позволяет определить адекватность разработанной кинетической модели. На данном шаге рассчитываются значения кинетических параметров. Происходит выбор (дискриминация) моделей для уточнения схемы химических превращений. Решение обратной кинетической задачи позволяет планировать эксперимент (шаг 7) и определять адекватную кинетическую модель (шаг 8), что позволяет проводить оптимизацию химического процесса (шаг 9).

При этом подсистемы информационной системы, такие как модуль решения прямой задачи или модуль решения обратной задачи химической кинетики, позволяют успешно решать частные задачи. Например, разработка кинетических моделей реакций с участием металлокомплексных катализаторов на основе лабораторных данных [19] или обработка данных из нефтеперерабатывающих заводов [20]. С использованием некоторых модулей информационной системы проводилось редуцирование сложных механизмов [21]. Результаты решения частных задач хранятся в базе данных информационной системы, которые в будущем могут использоваться для оптимизации вышеуказанных процессов.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-37-00015 (п. 1-3), 18-07-*

*00341, Стипендии Президента РФ СП-669.2018.5.*

### Список литературы

1. Слинко М.Г. История развития математического моделирования каталитических процессов и реакторов // Теоретические основы химической технологии. – 2007. – Т. 41. - № 1. – С. 16-34.
2. Коледин С.Н., Карпенко А.П., Коледина К.Ф., Губайдуллин И.М. Информационная система для оценки взаимосвязи целевых функций и исследования оптимальных условий проведения сложной каталитической реакции методами многоцелевой оптимизации // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – Т. 13. - № 4. – С. 71-81.
3. Коледина К.Ф., Коледин С.Н., Губайдуллин И.М. Многокритериальная оптимизация условий проведения каталитической реакции дегидрирования этанола в этилацетат // Вестник Башкирского университета. – 2018. – Т. 23. - № 2. – С. 385-389.
4. Гламаздин Е.С., Новиков Д.А., Цветков А.В. Управление корпоративными программами: информационные системы и математические модели. – М.: ИПУ РАН, 2003. –159 с.
5. Новичкова А.В., Бобренева Ю.О., Губайдуллин И.М., Коледина К.Ф. Инфор-

мационный комплекс построения кинетической модели реакции гидроалюминирования олефинов триизобутилалюминием // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – № 4. – Т. 10. – С. 58-63.

6. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями: учеб. пособие для вузов; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Дрофа, 2006. – 175 с.

7. Коледина К.Ф., Губайдуллин И.М., Сафин Р.Р., Ахметов И.В. Информационная система построения кинетической модели каталитической реакции, планирование экономически оптимального химического эксперимента // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – № 3 (61). – С. 79-84.

8. Спивак С.И., Коледина К.Ф., Коледин С.Н., Губайдуллин И.М. Информационно-вычислительная аналитическая система теоретической оптимизации каталитических процессов // Прикладная информатика / Journal of applied informatics. – 2017. – Т. 12. – № 1 (67). – С. 39-49.

9. Коноплева И.А., Хохлова О.А., Денисов А.В. Информационные технологии. – М.: ТК Велби, Изд-во Проспект, 2007 – 304 с.

10. Коледина К.Ф., Коледин С.Н., Щаднева Н.А., Губайдуллин И.М. Кинетика и механизм каталитической реакции спиртов с диметилкарбонатом // Журнал физической химии. – 2017. – Т. 91. – № 3. – С. 422-428.

11. Koledina, K. F. Kinetic model of the catalytic reaction of dimethylcarbonate with alcohols in the presence  $\text{Co}_2(\text{CO})_8$  and  $\text{W}(\text{CO})_6$  / K. F. Koledina, S. N. Koledin, N. A. Schadneva, Y. Yu. Mayakova, I. M. Gubaydullin // Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis. DOI: 10.1007/s11144-017-1181-3

12. Коледин, С.Н. Оптимальное управление и чувствительность оптимума в задачах химической кинетики / С.Н. Коледин, К.Ф. Коледина // Журнал СВМО. 2016. Т. 18. № 3. – С. 137-144.

13. Коледин, С.Н. Определение оптимальных условий каталитических процессов на основе экономических критериев / С.Н. Коледин, К.Ф. Коледина, И.М. Губайдуллин, С.И. Спивак // Химическая промышленность сегодня. №10. 2016г. стр. 24-35.

14. Коледин, С.Н. Планирование экономически оптимального химического эксперимента на основе кинетической модели каталитической реакции взаимодействия спиртов с диметилкарбонатом/ С.Н. Коледин, К.Ф.

Коледина // Журнал СВМО. 2015. Т.17. №2. С.43-50.

15. Нурисламова Л.Ф. Разработка компактной кинетической модели пиролиза пропана методами анализа чувствительности / Л.Ф. Нурисламова - диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: Башкирский государственный университет. Уфа, 2015.

16. Карпенко, А.П. Основные сущности популяционных алгоритмов для задачи глобальной оптимизации/ А.П. Карпенко // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2016. – № 2. – С. 8-17.

17. Димитров, В.И. Простая кинетика / В.И. Димитров – Новосибирск: Наука и жизнь, 1982. – 380с.

18. Новичкова, А.В. Информационные системы моделирования реакционной способности алкенов в реакции гидроалюминирования олефинов триизобутилалюминием. / А.В. Новичкова, Ю.О. Бобренева, И.М. Губайдуллин, К.Ф. Коледина // Электротехнические и информационные комплексы и системы. № 3, т. 10, 2014. С. 55-61.

19. Губайдуллин, И.М. Структурная и параметрическая идентификация кинетических моделей химических реакций с участием металлоорганических соединений на основе информационно-вычислительной аналитической системы / И.М. Губайдуллин, К.Ф. Коледина, С.И. Спивак // Химическая промышленность сегодня. 2014. № 11. С. 18-27.

20. Зайнуллин, Р.З. Кинетика каталитического риформинга бензина // Кинетика и катализ / Р.З. Зайнуллин, К. Ф. Коледина, А. Ф. Ахметов, И. М. Губайдуллин., 2017, т. 58, № 3, С. 1-12.

21. Нурисламова, Л.Ф., Редукция детальных схем химических превращений окислительных реакций формальдегида и водорода на основании результатов анализа чувствительности математической модели / Л.Ф. Нурисламова, И.М. Губайдуллин // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2014. Т. 15. № 4. С. 685-696.

## References

1. Slinko, M. G. The history of the development of mathematical modeling of catalytic processes and reactors / M. G. Slinko // Theoretical foundations of chemical technology. 2007. Vol. 41. No. 1. P. 16-34.

2. Koledin, S.N. Information system for assessing the relationship of objective functions and the study of optimal conditions for a complex catalytic reaction using multi-purpose optimization methods / S.N. Koledin, A.P. Karpenko, K.F.Koledina, I.M. Gubaidullin // *Electrotechnical and information complexes and systems*. 2017. V. 13. No. 4. P. 71-81.
3. Koledina, K.F. Multi-criteria optimization of the conditions for the catalytic reaction of ethanol dehydrogenation to ethyl acetate / K. F. Koledina, S. N. Koledin, I. M. Gubaidullin // *Bulletin of Bashkir University*. 2018. Vol. 23. No. 2, pp. 385-389.
4. Glamazdin, E.S., Management of corporate programs: information systems and mathematical models / E.S. Glamazdin, D.A. Novikov, A.V. Tsvetkov - Moscow: IPU RAS, 2003. - 159 p.
5. Novichkova, A.V. Information complex for constructing a kinetic model for the reaction of hydroalumination of olefins by triisobutylaluminum. / A.V. Novichkova, Yu.O. Bobreneva, I.M. Gubaydullin, K.F. Koledina // *Electrical and information systems and systems*. № 4, t. 10, 2014. p. 58-63
6. Sable, I.M. The choice of optimal parameters in problems with many criteria: study guide for universities / I.M. Sable, R.B. Statnikov. - 2nd ed., Pererab. and add. - M.: Drofa, 2006. -175c.
7. Koledina, K.F. Information system for constructing a kinetic model of a catalytic reaction, planning an economically optimal chemical experiment / S.N. Koledin, I.M. Gubaydullin, R.R. Safin, I.V. Akhmetov // *Control Systems and Information Technologies*, №3 (61), 2015. - P. 79-84.
8. Spivak, S. I. Information-computational analytical system of theoretical optimization of catalytic processes / S. I. Spivak, K. F. Koledina, S. N. Koledin, I. M. Gubaidullin // *Applied Informatics / Journal of applied informatics*. Volume 12. Number 1 (67). 2017. with. 39-49
9. Konopleva, I.A. Information technologies / I.A. Konopleva, O.A. Khokhlova, A.V. Denisov - M.: TK Velbi, Prospect Publishing House. 2007 - 304 p.
10. Koledina, K. F. Kinetics and the mechanism of the catalytic reaction of alcohols with dimethyl carbonate / K. F. Koledina, S. N. Koledin, N. A. Schadneva, I. M. Gubaidullin // *Journal of Physical Chemistry*, 2017, volume 91, № 3, p. 422-428
11. Koledina, K. F. Kinetic model of the catalytic reaction of dimethylcarbonate with alcohols in the presence of Co<sub>2</sub> (CO) 8 and W (CO) 6 / K. F. Koledina, S. N. Koledin, N. A. Schadneva, Y. Yu. Mayakova, I. M. Gubaydullin // *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. DOI: 10.1007 / s11144-017-1181-3
12. Koledin, S.N. Optimal control and optimum sensitivity in problems of chemical kinetics / S.N. Koledin, K.F. Coledina // *Journal SVMO*. 2016. V. 18. No. 3. - P. 137-144.
13. Koledin, S.N. Determination of optimal conditions for catalytic processes based on economic criteria / S.N. Koledin, K.F. Koledina, I.M. Gubaydullin, S.I. Spivak // *Chemical industry today*. №10. 2016 pp. 24-35.
14. Koledin, S.N. Planning an economically optimal chemical experiment based on a kinetic model of the catalytic reaction of the interaction of alcohols with dimethyl carbonate / S.N. Koledin, K.F. Koledina // *Journal SVMO*. 2015. T.17. №2. P.43-50.
15. Nurislamova L.F. Development of a compact kinetic model of propane pyrolysis using sensitivity analysis methods / L.F. Nurislamova - dissertation for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences: Bashkir State University. Ufa, 2015.
16. Karpenko, A.P. Main essences of population algorithms for the global optimization problem / A.P. Karpenko // *Information and mathematical technologies in science and management*. 2016. № 2. p. 8-17.
17. Dimitrov, V.I. Simple kinetics / V.I. Dimitrov - Novosibirsk: Science and Life, 1982. - 380p.
18. Novichkova, A.V. Information systems for modeling the reactivity of alkenes in the reaction of hydroalumination of olefins with triisobutylaluminium. / A.V. Novichkova, Yu.O. Bobreneva, I.M. Gubaydullin, K.F. Koledina // *Electrical and information systems and systems*. № 3, t. 10, 2014. pp. 55-61.
19. Gubaydullin, I.M. Structural and parametric identification of kinetic models of chemical reactions with the participation of organometallic compounds based on information-computational analytical system / I.M. Gubaydullin, K.F. Koledina, S.I. Spivak // *Chemical industry today*. 2014. No. 11. P. 18-27.
20. Zaynullin, R.Z. Kinetics of catalytic reforming of gasoline // *Kinetics and catalysis / R.Z. Zainullin, K. F. Koledina, A. F. Akhmetov, I. M. Gubaidullin.*, 2017, vol. 58, No. 3, P. 1-12.
21. Nurislamova, LF, Reduction of detailed schemes for chemical transformations of oxidative reactions of formaldehyde and hydrogen based on the results of a sensitivity analysis of a mathematical model / L.F. Nurislamova, I.M. Gubaidullin // *Computational methods and programming: new computing technologies*. 2014. Vol. 15. No. 4. P. 685-696.



**Осипов В.П.**  
**Osipov V.P.**

кандидат технических наук, доцент,  
ведущий научный сотрудник  
Федерального государственного  
учреждения «Федеральный исследователь-  
ский центр Институт прикладной мате-  
матики им. М.В. Келдыша Российской ака-  
демии наук», отдел № 16 «Проблемы  
математического моделирования и высоко-  
производительных вычислений», г. Москва,  
Российская Федерация



**Посадский А.И.**  
**Posadsky A.I.**

кандидат технических наук,  
руководитель автоматизации  
ООО «Юнэкт ЮНИОН»,  
г. Москва,  
Российская Федерация



**Сивакова Т.В.**  
**Sivakova T.V.**

научный сотрудник  
Федерального государственного  
учреждения «Федеральный исследователь-  
ский центр Институт прикладной  
математики им. М.В. Келдыша Российской  
академии наук», отдел № 16 «Проблемы  
математического моделирования и высоко-  
производительных вычислений», г. Москва,  
Российская Федерация



**Судаков В.А.**  
**Sudakov V.A.**

доктор технических наук, доцент, ведущий  
научный сотрудник Федерального  
государственного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной математики им.  
М.В. Келдыша Российской академии наук»,  
отдел № 16 «Проблемы математического  
моделирования и высокопроизводительных  
вычислений», г. Москва,  
Российская Федерация

УДК 519.816

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-87-93

## КОМБИНИРОВАННАЯ МЕТОДИКА НЕЧЕТКОГО РАНЖИРОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИЙ ПРЕДПОЧТЕНИЙ

Работа посвящена созданию новой методики нечеткого ранжирования альтернатив. Предложено разбивать критериальное пространство на нечеткие области предпочтений. Сформулирован критерий близости нечетких оценок предпочтительности. Для альтернатив,

имеющих близкие нечеткие уровни предпочтительности, предложена процедура уточнения уровня предпочтительности на базе нечеткого взвешенного суммирования. Решение данной задачи позволило повысить различимость альтернатив по предпочтительности. Метод используется, если существует область предпочтений, для которой значений функции принадлежности близко к «1» более, чем для одной альтернативы. Степень различимости альтернатив будет высокой, если для «существенных» различий в значениях критериев функция принадлежности будет «существенно» отличаться. В данном случае термин «существенно» субъективен и зависит от конкретной специфики решаемой задачи и мнения лица, принимающего решение. В работе формализовано правило: «Если значение хотя бы одного критерия существенно отличается, то ранги альтернатив должны существенно отличаться». Для оценки полноты задания нечетких суждений разработаны соответствующие соотношения и правила. Исследованы два подхода к построению функций принадлежности нечетких предпочтений: первый способ – выбор вида функции принадлежности и далее ввод параметров функции принадлежности; второй способ – ввод характерных точек функции принадлежности и построение кусочно-полиномиальной аппроксимации. После ввода предпочтений и предпочтительной настройки метод может проводить ранжирование произвольного количества альтернатив в режиме, приближенном к реальному времени. Через портал <http://ws-dss.com> программисты прикладных систем, ученые, исследователи и студенты могут воспользоваться данным методом нечеткого ранжирования на базе областей предпочтений. Данный портал позволяет организовывать «цепочки» вызовов математических моделей с передачей входных/выходных параметров между ними. Данный метод на базе областей предпочтений апробировался на задаче выбора электронного планшета летчика. С развитием рынка и нормативной базы, регламентирующей одобрение и использование электронных планшетов в авиации, разнообразие применимых моделей постоянно растет. Это приводит к тому, что перед эксплуатантом на этапе разработки плана внедрения возникает непростая задача выбора подходящей для него модели планшетного компьютера, для решения которой в статье применен подход ранжирования планшетных компьютеров на базе нечетких областей предпочтений.

**Ключевые слова:** ранжирование альтернатив, многокритериальный анализ, нечеткие множества, принятие решений, эксперт, критерии, функции предпочтений.

## COMBINED METHOD OF FUZZY RANGE ALTERNATIVES BASED ON PREFERENCE FUNCTIONS

The work is devoted to the creation of a new method of fuzzy ranking alternatives. It is proposed to divide the criterial space into fuzzy areas of preference. A criterion for the proximity of fuzzy preference estimates is formulated. For alternatives that have similar fuzzy levels of preference, a procedure has been proposed to clarify the level of preference based on fuzzy weighted summation. The solution to this problem has increased the visibility of alternatives in preference. The method is used if there is a preference area for which the values of the membership function are close to “1” for more than one alternative. The degree of distinguishability of alternatives will be high if, for “substantial” differences in the values of the criteria, the membership function will be “significantly” different. In this case, the term “substantially” is subjective and depends on the specific specifics of the problem being solved and the opinion of the decision maker. The rule is formalized in the paper: «If the value of at least one criterion is significantly different, then the ranks of the alternatives should be significantly different». To assess the completeness of the task of fuzzy judgments, appropriate correlations and rules have been developed. Two approaches to the construction of membership functions of fuzzy preferences are investigated: the first method is the choice of the type of the membership function and further input of the parameters of the membership function; the second method is the introduction of characteristic points of the membership function and the construction of piecewise polynomial approximation. After entering preferences and pre-setting, the method can rank an arbitrary number of alternatives in a mode close

to real time. Through the portal <http://ws-dss.com>, application programmers, scientists, researchers and students can use this fuzzy ranking method based on preference areas. This portal allows you to organize "chains" of calls of mathematical models with the transfer of input / output parameters between them. This method, on the basis of preference areas, was sampled on the task of choosing a pilot's electronic tablet. With the development of the market and the regulatory framework governing the approval and use of electronic tablets in aviation, the variety of applicable models is constantly growing. This leads to the fact that the operator at the stage of developing an implementation plan faces the difficult task of choosing a tablet computer model that is suitable for him, for which the article uses an approach to ranking tablet computers based on fuzzy preference areas.

**Key words:** ranking of alternatives, multi-criteria analysis, fuzzy sets, decision-making, expert, criteria, functions of preferences.

В последнее время в России и за рубежом интенсивно развиваются нечёткие методы многокритериального анализа альтернатив. Развитие средств вычислительной техники и компьютерных сетей позволяет существенно упростить получение экспертных мнений широкого круга специалистов в различных областях деятельности. Эксперт зачастую не может однозначно дать четкую оценку объекту экспертизы, а иногда не может однозначно определить отношение предпочтения между двумя объектами. Более естественными зачастую являются интервальные оценки тех или иных характеристик объектов экспертизы. Ценной информацией от эксперта может быть оценка степени его уверенности в том, что оценка принимает то или иное значение. Для подобных оценок хорошо подходит аппарат теории нечетких множеств, предложенный Лотфи Заде [1]. Применение теории нечетких множеств при принятии решений последние десятилетия пользуется возрастающей популярностью. Стоит отметить работы А.Н. Борисова из Рижского университета [2]. Авторами также проводились и продолжают проводиться исследования в области индивидуальных функций нечетких предпочтений, построенных на базе нечетких областей [3, 4]. Вопросы оптимизации решений с нечетко описанными множествами допустимых решений детально исследуются в работе Орловского С.А. [5]. В работах В.Д. Ногина разрабатываются нечеткие методы выбора на базе принципа Парето и методов нечеткой качественной важности критериев [6]. В работах А.И. Орлова анализируются нечеткие подходы к экспертному оцениванию [7, 8].

В работе [3] предложено для всех критериев ввести нечеткие шкалы, состоящие из нечетких градаций (интервалов значений с нечеткими границами). Пересечение нечетких градаций в рамках одного критерия допускается с учетом ограничений на минимальную и максимальную степень принадлежности произвольного значения. ЛПР (лицо, принимающее решение) оценивает в нечеткой шкале предпочтений некоторые из комбинаций нечетких значений критериев. Далее проводится проверка полноты модели предпочтений: для всех точек критериального пространства уровень предпочтений должен быть не ниже заданного. Данная модель позволяет в автоматическом режиме проводить оценку произвольного количества альтернатив. По всем областям предпочтений метод позволяет построить функции принадлежности альтернатив. На вход модели многокритериальной оценки подаются четкие и/или нечёткие значения критериев. Для получения итогового ранжирования альтернатив следует: или дефазифицировать нечеткие ранги альтернатив, или определить нечеткое отношение доминирования для всех пар альтернатив.

Пусть для случая  $n$  критериев и  $m$  конкретных оцениваемых альтернатив мы получили  $m$  функций принадлежности соответствующим всем альтернативам (1):

$$p_t = f_t(y, x_1^t, x_2^t, \dots, x_n^t), \quad (1)$$

где  $t$  – это номер альтернативы ( $t=1 \dots m$ ).

Степень различимости альтернатив будет высокой, если для «существенных» различий в значениях критериев функция принадлежности будет «существенно» отличаться. В данном случае термин «существенно» субъ-

ективен и зависит от конкретной специфики решаемой задачи и мнения лица, принимающего решения.

Для оценки близости двух функций принадлежности  $f_1$  и  $f_2$  используются метрики различных функциональных пространств. Например (2) или (3):

$$\|f_1 - f_2\| = \sup |f_1(y) - f_2(y)| \quad (2)$$

или

$$\|f_1 - f_2\| = \sqrt{\int (f_1(y) - f_2(y))^2 dy} \quad (3)$$

Поскольку значениям критериев в общем виде тоже соответствуют функции принадлежности, то имеет смысл использовать правило: «Если значение хотя бы одного критерия существенно отличается, то ранги альтернатив должны существенно отличаться». Лексический термин «существенно отличается» может быть выражен в виде следующей функции принадлежности (4):

$$\mu(\|f_1 - f_2\|) = \begin{cases} 0, & \|f_1 - f_2\| \leq \alpha, \\ \frac{\|f_1 - f_2\| - \alpha}{\beta - \alpha}, & \alpha < \|f_1 - f_2\| < \beta, \\ 1, & \|f_1 - f_2\| \geq \beta. \end{cases} \quad (4)$$

Константы  $\alpha$  и  $\beta$  выбираются исходя из специфики решаемой задачи (для многих практических задач хорошее приближение  $\alpha = 0.3$  и  $\beta = 0.7$ ). Для проверки вышеуказанного правила на близость двух альтернатив  $t_1$  и  $t_2$  следует произвести расчет степени уверенности в истинности посылки по формуле (5):

$$d(t_1, t_2) = \min_i \mu(\|f_{t_1}(x_i^{t_1}) - f_{t_2}(x_i^{t_2})\|) \quad (5)$$

Для следствия следует вычислить принадлежность по формуле (6):

$$u(t_1, t_2) = \mu(\|f_{t_1}(y^{t_1}) - f_{t_2}(y^{t_2})\|) \quad (6)$$

И если существуют такие  $t_1, t_2$ , что  $d > u$ , то необходимо уточнить функцию предпочтений с помощью количественных нечетких методов.

Наиболее распространённым количественным нечетким методом является нечеткое взвешенное суммирование. Для всех кри-

териев назначаются нечеткие веса  $w_i$  с функцией принадлежности  $\mu_i(w)$ , а для значений критериев также задана функция принадлежности:  $\lambda_i(x)$ .

Взвешенная сумма для случая обычных (четких) чисел (7):

$$s = S(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (7)$$

Она может быть модернизирована для случая нечетких чисел с помощью принципа обобщения. Для компонентов суммы функция принадлежности вычисляется по формуле (8):

$$z_i(g_i) = \sup_{g=w_i x_i} \min(\mu_i(w_i), \lambda_i(x_i)) \quad (8)$$

А функция принадлежности взвешенной суммы примет вид (9):

$$r(s) = \sup_{s=\sum_{i=1}^n g_i} \min_i(z_i(g_i)) \quad (9)$$

Интегральная оценка альтернативы в предложенном методе состоит из двух компонент нечеткого уровня предпочтительности  $u$  и нечеткого результата взвешенного суммирования  $s$ . Интегральный ранг альтернативы  $I = u + s$  для нечеткого случая находится также с помощью принципа обобщения. Функция принадлежности для него (10):

$$\varphi(I) = \sup_{I=u+s} \min(p(u), r(s)) \quad (10)$$

Использование данного интегрального критерия позволяет повысить различимость рангов альтернатив.

Сочетание нечетких областей предпочтений с процедурой нечеткого взвешенного суммирования на едином критериальном пространстве позволяет говорить об оригинальности метода. Научной новизной, на взгляд авторов, обладает процедура определения критерия различимости альтернатив на нечетких областях предпочтений.

Наиболее принципиальным моментом при проектировании пользовательских интерфейсов для работы с нечеткими суждениями является интерфейс ввода и редактирования функции принадлежности. Возможны два подхода к его построению:

1. Двухэтапная процедура: выбор вида функции принадлежности и далее ввод параметров функции принадлежности.

2. Поточечная процедура: ввод характерных точек функции принадлежности, и далее точки связываются полиномами порядка  $n$ .

Первая процедура может вызывать затруднения у лица, принимающего решения, со слабой математической подготовкой, хотя в некоторых случаях она более быстрая, чем второй подход. Второй подход более универсален и позволяет задать произвольную кривую с требуемой степенью точности. Обычно точки соединяются линейными

отрезками, так как требуемая точность на начальном этапе ввода предпочтений не слишком высока.

На рисунке показан фрагмент веб-интерфейса по вводу функции принадлежности вторым способом. Пользователь может указать мышью произвольные точки, по которым строится функция. При необходимости положение характерных точек можно изменить, используя перетаскивание мышью.

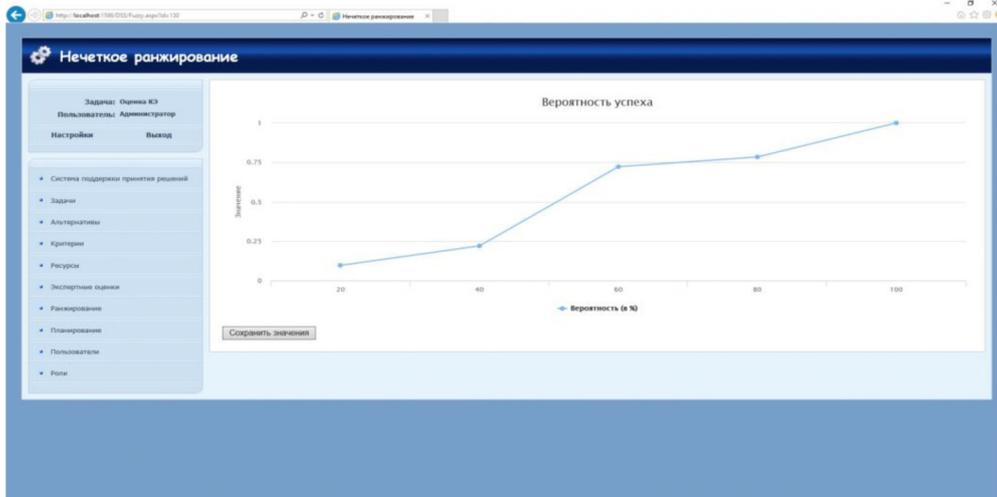


Рисунок. Веб-интерфейс ввода и редактирования функции принадлежности

Каждая функция принадлежности должна иметь уникальный символьный идентификатор (имя), понятный пользователю и отражающий ее физический смысл. В системе поддержки принятия решений должна поддерживаться база данных таких функций принадлежности. Далее при задании и весов и градаций шкал критериев пользователю должен быть доступен выбор:

1. Выбрать функцию принадлежности из справочника.
2. Создать новую функцию принадлежности.
3. Указать «четкое» значение.

Гибкость предложенной схемы позволяет уменьшить количество функций принадлежности, которые необходимо ввести пользователю в интерфейс. Например, нечеткое число «около 0,3» может использоваться и для указания весов нескольких критериев, и для указания нечетких их значений.

Данный метод нечеткого ранжирования альтернатив апробировался на задаче выбора планшетного компьютера пилота воздушного судна [9]. Электронные планшеты лётчика

(англ. Electronic Flight Bag (EFB)) получили повсеместное распространение в авиации как устройство помощи пилоту, поскольку позволяют повысить качество и оперативность принятия решений на взлете и посадке, удобны в эксплуатации, обладают невысоким весом, для них разработано и постоянно совершенствуется специализированное программное обеспечение. Использование EFB сертифицировано авиационными службами в большинстве развитых стран. Существует множество различных моделей планшетных компьютеров, представленных в настоящее время на рынке. Они различаются техническими характеристиками, размерами и ценой. Разнообразие применимых моделей постоянно растет с развитием в авиации нормативной базы, которая регламентирует использование электронных планшетов. Это ведет к тому, что на фазе создания плана внедрения EFB возникает нетривиальная задача выбора наиболее эффективной и экономически выходной модели планшетного компьютера.

Множество планшетов представлено большим числом моделей именитых производи-

телей на базе операционных систем iOS, Windows и Android. В случае если авиакомпания проводит коммерческие авиаперевозки, то допустимо использовать только сертифицированные авиационными властями модели. К сертифицированным моделям относятся iPad и Window Surface Pro. Window Surface Pro используются в качестве EFB только некоторыми крупными авиакомпаниями, а iPad используются большинством авиакомпаний мира, в том числе и многими российскими. Поэтому при разработке модели выбора планшетов анализировались модели iPad, представленные на коммерческом рынке. Система ценностей, которая отражена в соответствующей функции принадлежности для нечетких областей предпочтений и в соответствующих нечетких оценках альтернатив, базируется на следующих суждениях:

1. Пространство кабины пилотов летательных аппаратов сильно ограничено, поэтому работа с большими планшетами является затруднительной.

2. Комфортное восприятие информации определяется размерами экрана. Возможны затруднения при восприятии информации, если экран планшета меньше 9 дюймов. Комфортное восприятие информации обеспечивают средние экраны (9-11 дюймов) и большие экраны (более 12 дюймов).

3. Существенное значение придается наличию в 3G/LTE-Интернета на планшете, а также встроенного модуля GPS/ГЛОНАСС.

4. Предпочтительный объем памяти определяется тем, планируется ли в фото- и видеосъемка с планшета, требуется ли многократное резервирование документов, требуется ли сохранение аудио- и видеоматериалов.

5. Новизна модели напрямую определяет срок использования планшета. С высокой вероятностью планшет, выпущенный более 3-х лет назад, потребует замены через 2-3 года.

### Список литературы

1. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях / Вопросы анализа и процедуры принятия решений. – М.: Мир, 1976. – С. 172 – 215.

2. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечетких

На портале <http://ws-dss.com> размещена в открытом доступе разработанная программная реализация нечеткого метода ранжирования. Данный портал позволяет публиковать в сети Интернет консольные программные реализации математических моделей на языках C++, R, Ruby, а также дает возможность подключать другие веб-сервисы и организовывать последовательность вызовов группы математических моделей с передачей входных/выходных параметров между ними. Диспетчер очередей Sidekiq реализует обработку моделей и позволяет масштабировать потоки обработчиков моделей на большом числе узлов вычислительного кластера. Данный подход соответствует унифицированной методологии поддержки принятия решений на базе концепции расширяемого программирования [10].

### Вывод

На базе нечетких предпочтений ЛПР в нечетких областях и нечетких весов критериев изложенный метод поддержки принятия решений позволяет ранжировать произвольное количество альтернатив в автоматическом режиме. Для повышения качества принимаемых решений разработаны правила и соотношения, позволяющие оценить полноту задания нечетких суждений.

Благодаря portalу <http://ws-dss.com> исследователи, разработчики прикладных систем, студенты и ученые получили доступ к реализации метода нечеткого ранжирования на базе областей предпочтений. Разработчики прикладных решений могут воспользоваться этим методом путем обращения к RESTful API интерфейсу, который опубликован в открытом доступе на данном портале.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ № 17-71-30014.*

моделей. Примеры использования. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.

3. Осипов В.П., Судаков В.А. Многокритериальный анализ решений при нечетких областях предпочтений // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2017. № 6. 16 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-6>

4. Бомас В.В., Судаков В.А. Поддержка субъективных решений в многокритериальных задачах. – М.: Изд-во МАИ, 2011. – 173 с.

5. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука, 1981. – 208 с.

6. Ногин В.Д. Принцип Эджворта-Парето и относительная важность критериев в случае нечеткого отношения предпочтения // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2003. – Т. 43 – № 11, С. 1676-1686.

7. Орлов А.И. Экспертные оценки: Учебное пособие. – М.: 2002 – 31 с.

8. Орлов А.И. Теория принятия решений. Учебное пособие. – М.: Март, 2004. – 656 с.

9. Dutov A.V., Nesterov V.A., Sudakov V.A., Sypalo K.I. Fuzzy Preference Domains and Their Use for Selecting an Electronic Flight Bag for Flight Crews // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2018. – Vol. 57 – № 2. – P. 230–238. ISSN 1064-2307. DOI: 10.1134/S1064230718020065.

10. Осипов В.П., Сивакова Т.В., Судаков В.А. Предпосылки унификации программных средств поддержки принятия решений // Программные продукты и системы. – 2013. – № 3. С. 147-150.

11. Судаков В.А., Посадский А.И. Веб-сервисы поддержки принятия решений WS-DSS для нечеткого многокритериального анализа альтернатив // Научный и интеллектуальный потенциал: Сборник статей Международной научно-практической конференции. – Самара: Центр научных исследований и консалтинга. – 2017. – С. 87-89.

12. Асаи К., Ватада Д., Иваи С. и др. Прикладные нечеткие системы/ под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. – М.: Мир, 1993. – 368 с.

13. Mamdani E. Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant / Proceedings of IEEE. – Vol. 121 – № 12. – 1974. – P. 1585-1588.

### References

1. Bellman R., Zade L. Prinjatje reshenij v raspjlyvchatyh uslovijah / Voprosy analiza i procedury prinjatija reshenij. – М.: Mir, 1976. S. 172 – 215.

2. Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I.P. Prinjatje reshenij na osnove nechetkih modelej. Primery ispol'zovanija. – Riga: Zinatne, 1990. – 184 s.

3. Osipov V.P., Sudakov V.A. Mnogokriterial'nyj analiz reshenij pri nechetkih oblastjah predpochtenij // Preprinty IPM im. M.V.Keldysha. 2017. № 6. 16 s. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-6>

4. Bomas V.V., Sudakov V.A. Podderzhka subjektivnyh reshenij v mnogokriterial'nyh zadachah. – М.: Izd-vo MAI, 2011. – 173 s.

5. Orlovskij S.A. Problemy prinjatija reshenij pri nechetkoj ishodnoj informacii. – М.: Nauka, 1981. – 208 s.

6. Nogin V.D. Princip Edzhvorta-Pareto i otnositel'naja vazhnost' kriterijev v sluchae nechetkogo otnoshenija predpochtenija // Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoj fiziki. 2003. – t. 43 – № 11, S. 1676-1686.

7. Orlov A.I. Ekspertnye ocenki. Uchebnoe posobie. – М.: 2002 – 31 s.

8. Orlov A.I. Teorija prinjatija reshenij. Uchebnoje posobie. – М.: Mart, 2004. – 656 s.

9. Dutov A.V., Nesterov V.A., Sudakov V.A., Sypalo K.I. Fuzzy Preference Domains and Their Use for Selecting an Electronic Flight Bag for Flight Crews // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2018. – Vol. 57 – № 2. – P. 230–238. ISSN 1064-2307. DOI: 10.1134/S1064230718020065.

10. Osipov V.P., Sivakova T.V., Sudakov V.A. Predposylki unifikacii programmyh sredstv podderzhki prinjatija reshenij // Programmnye produkty i sistemy. – 2013. – №3. S. 147-150.

11. Sudakov V.A., Posadskij A.I. Veb-servisy podderzhki prinjatija reshenij WS-DSS dlja nechetkogo mnogokriterial'nogo analiza al'ternativ // Nauchnyj i intellektual'nyj potencial // Sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – Samara: Centr nauchnyh issledovanij i konsaltinga – 2017. - P. 87-89.

12. Asai K., Vatada D., Ivai S. i dr. Prikladnye nechetkie sistemy pod red. T. Tjerano, K. Asai, M. Sugeno. – М.: Mir, 1993. – 368 s.

13. Mamdani E. Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant / Proceedings of IEEE. – Vol. 121 – № 12. – 1974. – P. 1585-1588.



**Тимофеев А.О.**  
**Timofeev A.O.**

*ассистент кафедры информационно-измерительной техники ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация*



**Ясовеев В.Х.**  
**Yasoveev V.Kh.**

*доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-измерительной техники, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 621.3.083

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-94-99

## **БЕСПРОВОДНОЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ ДАТЧИК ПОЛОЖЕНИЯ ШТОКА СКВАЖИННОЙ ШТАНГОВОЙ ГЛУБИННОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ**

Современное развитие технической диагностики состояния скважинных штанговых насосных установок (СШНУ) является одним из важнейших компонентов автоматизированных систем диагностики и управления процессом нефтедобычи. Системы диагностики и управления позволяют добиться не только снижения удельной себестоимости нефтедобычи, но и повысить надежность и ремонтпригодность установок в целом.

Одним из направлений диагностики является динамометрирование – получение значений механических нагрузок, приложенных к балансиру станка-качалки, в зависимости от местоположения штока станка-качалки. Такие значения формируют в виде динамограмм и проводят их анализ по существующим методикам.

Главным компонентом для определения местоположения штока станка-качалки является датчик положения штока станка-качалки. Климатические и технологические особенности применения датчиков положения обуславливают требования к конструкции, герметичности, автономности и сроку службы таких датчиков. В статье рассматриваются возможные типы первичных преобразователей, их достоинства и недостатки. Также приводится обоснование выбора типов первичных преобразователей, на основе которых разработана конструкция представленного датчика. Далее рассматриваются варианты размещения датчика на станке-качалке, их преимущества и недостатки, а также описываются типовые способы определения положения с учетом их недостатков.

В статье описана предлагаемая конструкция датчика положения, выполненного на основе магниторезистивного датчика, показаны её достоинства и преимущества по сравнению с существующими типовыми датчиками, описан выбор наиболее подходящей интегральной микросхемы для реализации первичного преобразователя. Наряду с этим, в статье рассмотрены физические особенности применения магниторезистивных датчиков, их погрешности и чувствительность первичного преобразователя в зависимости от изменения величины внешнего магнитного поля, создаваемого перемещаемым постоянным магнитом.

Таким образом, представлен обоснованный выбор типа первичного преобразователя датчика положения, его конструкция и техническая реализация, описана зависимость выходного напряжения микросхемы от величины внешнего магнитного поля, а также погрешность и чувствительность первичного преобразователя выбранного типа. Представленный датчик может быть использован для определения положения штока СШНУ с учетом вышеуказанных требований.

**Ключевые слова:** динамометрирование, датчик положения, скважинная штанговая насосная установка, магниторезистивные преобразователи, бесконтактные датчики перемещения.

## WIRELESS CONTACTLESS SENSOR STOCK PALACES WELL ROD DEEP-PUMP INSTALLATION

Modern development of technical diagnostics of the downhole sucker rod pumping units (DSRPU) is one of the major components of the automatic diagnostics and oil production process control systems. The systems for diagnostics and control may not only produce a reduction of oil production cost, but also improve the reliability and maintainability of the systems in a whole.

One of the areas of diagnosis is dynamometer carding – obtaining mechanical load values applied to the horsehead of the sucker rod pump, depending on the location of the rod pumping unit. Such values are formed in a dynamometer card and are conducted by developed techniques.

The main component for positioning the sucker rod pumping beam is a beam position sensor. Climatic and technological features of position sensors implementation affect the design, integrity, autonomy and durability requirements of such sensors. This article focuses on the possible types of displacement detection transducers, its advantages and disadvantages. The substantiation of selection of primary converter types on which basis the design of the developed sensor is also given. Next, the sensor placement options are described on the beam unit, its advantages and disadvantages, typical methods for determining the position with regard to their deficiencies are also set out.

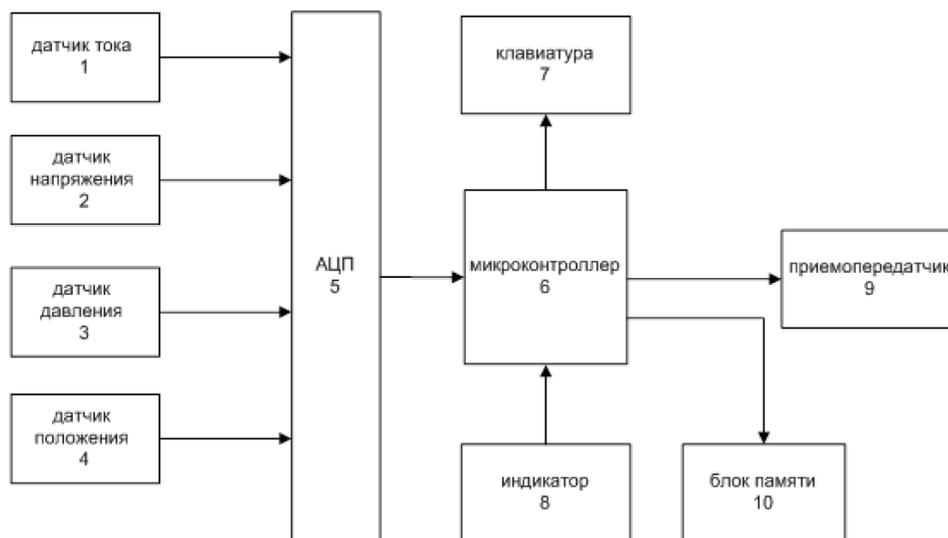
The article figures out the proposed structure of the position sensor based on the basis of the magnetoresistive sensor, shows its benefits and advantages compared to existing types of sensors, describes selection of the most suitable for integrated circuit implementation of primary transducer. Along with this, the article discusses the physical features of the application of magnetoresistive sensors, accuracy and sensitivity of the primary converter from the external magnetic field change created by the permanent magnet motion.

Thus, a reasonable choice of primary transducer type for position sensor design is represented, the design and technical implementation is described, the dependence of output voltage from the external magnetic field, sensitivity and accuracy of the primary transducer are given. The represented sensor can be used to determine the position of the sucker rod of DSRPU in accordance with the requirements.

**Key words:** dynamometer carding, downhole sucker rod pumping unit, beam unit, magnetoresistive transducers, wireless displacement sensors.

Получение достоверной информации в реальном времени о состоянии скважинной штанговой глубиннонасосной установки (СШНУ) является одним из ключевых условий её эффективного функционирования. Так, построение информационно-измерительных систем, использующих автономные датчики, является одним из направлений развития автоматизированных систем управления процессами нефтедобычи [1]. В частности, для диагностирования

неуравновешенности станка-качалки СШНУ используется специализированная информационно-измерительная система (ИИС), структурная схема которой приведена на рисунке 1 [2].



**Рисунок 1.** Структурная схема ИИС для диагностики неуравновешенности станка-качалки СШНУ

Одним из основных компонентов данной системы является датчик положения, который позволяет фиксировать перемещение штока станка-качалки.

В настоящее время существует тенденция к уменьшению массогабаритных показателей датчиков – современные технологии позволяют использовать множество датчиков в микроминиатюрном исполнении (влажности, давления, температуры, ускорения). Данная статья рассматривает создание беспроводного бесконтактного датчика положения, выполненного на основе интегрального магниторезистивного преобразователя.

Среди наиболее информативных способов получения информации о состоянии СШНУ выделяют динамометрирование и ваттметрирование. Динамометрирование позволяет оценить состояние подземного оборудования СШНУ, в то время как ваттметрирование направлено главным образом на диагностику наземного оборудования СШНУ [2]. Характерной особенностью ваттметрирования является определение энергетических параметров наземного оборудования путем анализа электрических характеристик (напряжения, тока и мощности) в цепи электрооборудования. На основе данных параметров можно сделать вывод об эффективности ШСНУ в целом.

Для построения ваттметрограмм и динамограмм требуется определение параметров движения установки ШГН, которые включают в себя длину хода, частоту и период

качаний, моменты прохождения штоком нижней и верхней мертвых точек. Для определения этих параметров применяются различные устройства: датчики угла наклона, концевые выключатели, потенциометрические датчики, бесконтактные датчики положения, линейные акселерометры [3, 4].

Для обоснования выбора датчиков положения сформулируем требования к таким датчикам. Во-первых, датчик должен иметь высоконадежную конструкцию: иметь прочный корпус с минимумом сочленений, не иметь проводных соединений, быть герметичным. Во-вторых, датчик не должен требовать специальной настройки, а срок его службы должен быть не менее трёх лет.

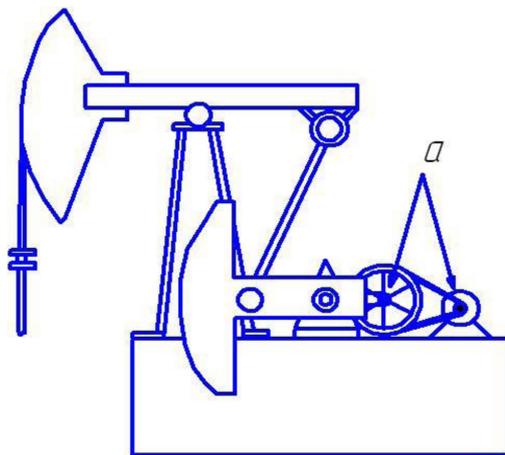
С учетом предъявляемых требований, рассмотрим возможные варианты бесконтактных датчиков положения. Достоинством оптических датчиков является высокая точность. Их недостатком является невозможность работы в загрязненных условиях, высокое энергопотребление. Достоинством ультразвукового датчика является большой диапазон измерения, но недостатком является высокое энергопотребление. Достоинством вихретоковых и магнито-стрикционных датчиков является высокая точность измерения. Их недостатком является сложность обеспечения высоконадежной конструкции. Достоинством датчиков индуктивного типа является большой диапазон измерения, однако недостатком является высокое энергопотребление и большие мас-

согабариты. К достоинству акселерометров можно отнести большой диапазон и высокую точность измерения. Их существенным недостатком является низкая чувствительность к малым значениям перемещения. Достоинством датчиков типа на основе эффекта Холла является небольшое энергопотребление и массогабариты, а также высокая точность. Их недостатком является необходимость компенсации температурного дрейфа. Достоинством магниторезистивных датчиков является небольшое энергопотребление и массогабариты, высокая точность; их недостатком является необходимость компенсации температурного дрейфа.

Исходя из вышеизложенного, для создания бесконтактного датчика положения целесообразно применение следующих типов датчиков: датчик Холла, магниторезистив-

ный датчик. Требования, предъявляемые к такому датчику, следующие: датчик должен работать при температуре окружающего воздуха от  $-45$  до  $+50$  °С, иметь срок службы не менее 5 лет, потреблять не более 0,3 Вт, иметь массу не более 1 кг, иметь диапазон измерения от 0 до 10 м с погрешностью не более 0,5 % [5].

Конструкция датчика положения обуславливается как местом размещения, так и требованиями к метрологическим, эксплуатационным и другим характеристикам. Применяемые в настоящее время датчики положения балансира станка-качалки (герконы и датчики Холла) располагают на выходном валу редуктора (см. рис. 2). Указанное расположение датчиков определяется прежде всего доступностью укладки проводов от них.



**Рисунок 2.** Расположение датчиков положения, а – место установки датчиков Холла

Типовая схема устройства определения положения в этом случае состоит из датчика положения, расположенного на неподвижной основе, и постоянного магнита, закрепленного на валу редуктора электродвигателя. Сам способ определения параметров движения заключается в определении количества оборотов вала редуктора, на основании которых определяется количество циклов качания. Описанный способ имеет следующие недостатки:

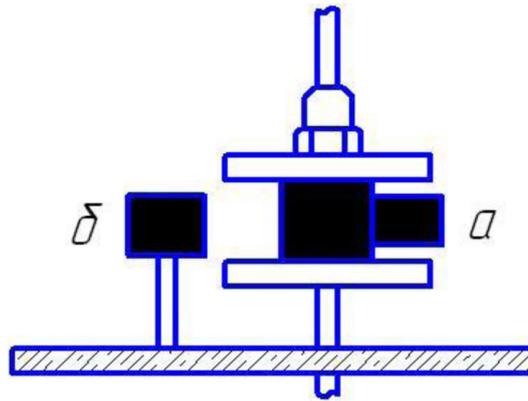
1) устройство определения положения, выполненное на герконе или датчике Холла, требует точной настройки (должно быть точное совмещение датчика и магнита с минимальным зазором между ними), которая может быть нарушена при проведении ремонтных работ или при сильных вибрациях;

2) описанный способ имеет ограниченную область применения: для применения на станках-качалках других типов требуется дополнительная информация о взаиморасположении между углом поворота вала редуктора и подвесом штанг.

На основании приведенного анализа авторами был разработан магниторезистивный датчик перемещения, лишенный вышеперечисленных недостатков.

### **Конструкция устройства определения положения**

Устройство определения положения состоит из датчика положения, расположенного на подвесе станка-качалки, и постоянного магнита, установленного на полированный шток станка-качалки (см. рис. 3).



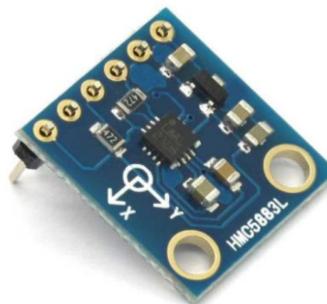
**Рисунок 3.** Расположение магниторезистивного датчика перемещения (а) и постоянного магнита (б)

Магниторезистивный датчик положения представляет собой плату с электронными радиоизделиями (ЭРИ), помещенную в корпус из немагнитного материала (пластик).

Преимуществами датчика такой конструкции являются: отсутствие влияния расстояния от магнита до датчика, отсутствие влияния магнитного дрейфа, повышенный диапазон рабочих температур ( $-50 \dots 145 \text{ }^\circ\text{C}$ ),

результаты измерения датчиками напрямую зависят от направления поля, но не от его интенсивности.

В качестве первичного преобразователя используется интегральная микросхема (ИМС) HMC5883L, представляющая собой высокочувствительный трёхосевой компас с цифровым интерфейсом I2C.

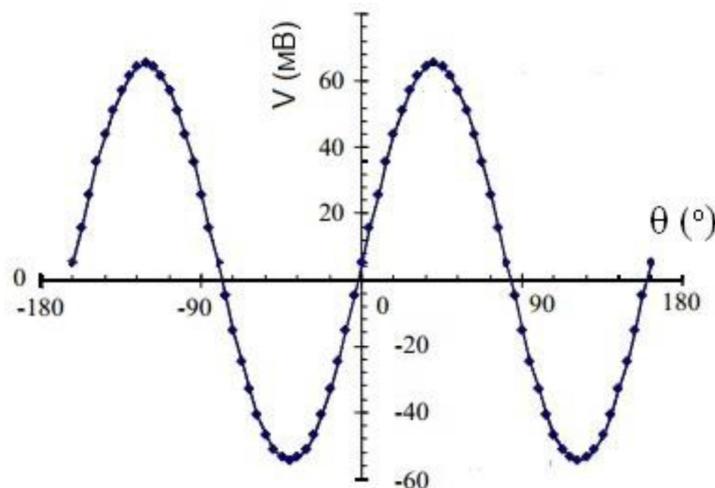


**Рисунок 4.** Фотография устройства с микросхемой HMC5883L

Выходное напряжение микросхемы ( $V_o$ ) определяется в соответствии с выражением:

$$V_o = V_s \cdot S \cdot \sin(2\theta), \quad (1)$$

где  $V_s$  – напряжение источника питания;  $S$  – постоянная, зависящая от рода материала;  $\theta$  – угол между током и вектором намагниченности.



**Рисунок 5.** Форма выходного сигнала с датчика перемещения в зависимости от значения угла поворота  $\theta$

В зависимости от величины внешнего магнитного поля сопротивление чувствительного элемента магниторезистивного датчика определяется из выражения:

$$R = R_0 + \Delta R \cdot \cos^2 \theta, \quad (2)$$

где  $R_0$  – сопротивление чувствительного элемента в отсутствие поля;  $\Delta R$  – изменение сопротивления во внешнем поле;  $\theta$  – угол между током и вектором намагниченности.

Форма выходного сигнала при измерении перемещения эталонного магнита показана на рисунке 6.

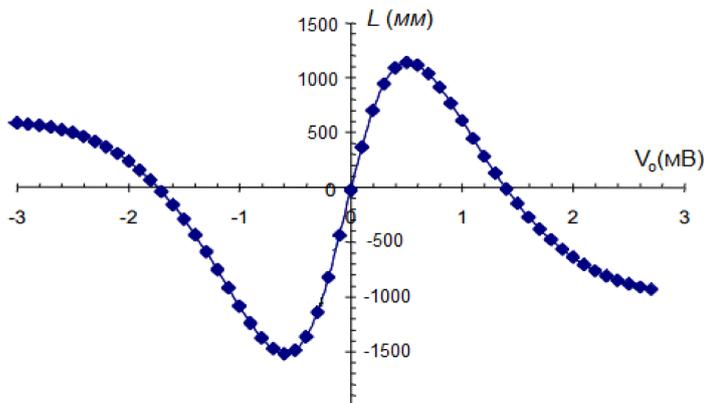


Рисунок 6. Форма выходного сигнала с датчика перемещения в зависимости от значения линейного перемещения L

### Выводы

Таким образом, обоснован выбор магниторезистивного датчика в качестве первичного преобразователя положения, описана конструкция устройства определения положения, и выбрана наиболее подходящая микросхема (НМС5883L), которая является основой разрабатываемого датчика.

### Список литературы

1. Тимофеев А.О., Ясовеев В.Х. Автономный датчик усилия системы динамометрирования штанговой скважинной глубиннонасосной установки // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19 – № 4 (70). – С. 34-39.
2. Патент РФ № 2016103551, 03.02.2016. Способ определения неуравновешенности станка-качалки скважинной штанговой насосной установки // Патент России № 2621435. 2016. Бюл. № 16. / Тимофеев А.О., Ясовеев В.Х.
3. Тахаутдинов Ш.Ф. и др. Обработка практических динамограмм на ПЭВМ. – Казань: Новое Знание, 1997. – 76 с.
4. Чаронов В.Я. Автоматизация работы основного оборудования и проблемы энергосбережения на объектах нефтегазодобычи / В.Я. Чаронов. – Альметьевск: Татнефть, 1998. – С. 20–26.
5. Гудинаф Ф. Интегральные акселерометры // Электроника. – 1993. – № 7–8. – С. 50–57.
6. McCoy. Method and apparatus for measuring pumping rod position and other aspects of a pumping system by use of an

accelerometer Pat. USA № 5406482, pr. 11.04.95.

7. Doscher J. Accelerometer Design and Applications. Analog Devices. – 1998.

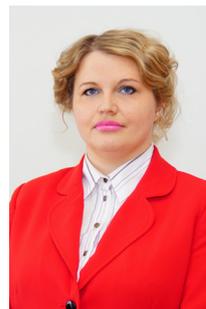
### References

1. Timofeev A.O., Jasoveev V.H. Avtonomnyj datchik usilija sistemy dinamometrirovaniya shtangovoj skvazhinnoj glubinnonasosnoj ustanovki // Vestnik UGATU. – 2015. – Т. 19 – № 4 (70). – P. 34-39.
2. Patent RF № 2016103551, 03.02.2016. Sposob opredelenija neuravnoveshennosti stanka-kachalki skvazhinnoj shtangovoj nasosnoj ustanovki // Patent Rossii № 2621435. 2016. Bjul. № 16. / Timofeev A.O., Jasoveev V.H.
3. Tahautdinov Sh.F. i dr. Obrabotka prakticheskikh dinamogramm na PJeVM. – Kazan': Novoe Znanie, 1997. – 76 p.
4. Charonov V.Ja. Avtomatizacija raboty osnovnogo oborudovaniya i problemy energosberezhenija na ob'ektah neftegazodobychi. – Al'met'evsk: Tatneft', 1998. – P. 20–26.
5. Gudinaf F. Integral'nye akselerometry // Elektronika. – 1993. - № 7–8. – P. 50–57.
6. McCoy. Method and apparatus for measuring pumping rod position and other aspects of a pumping system by use of an accelerometer. Pat. USA № 5406482, pr. 11.04.95.
7. Doscher J. Accelerometer Design and Applications. Analog Devices. – 1998.



**Лихачев Е.А.**  
**Likhachev E.A.**

*старший преподаватель  
кафедры информационно-измерительной  
техники, факультет авионики,  
энергетики и инфокоммуникаций  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
авиационный технический университет,  
г. Уфа,  
Российская Федерация*



**Зайцева А.А.**  
**Zajceva A.A.**

*доцент, кандидат технических наук  
кафедры информационно-измерительной  
техники, факультет авионики,  
энергетики и инфокоммуникаций  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
авиационный технический университет,  
г. Уфа,  
Российская Федерация*

УДК 621.317.791

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-100-105

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ САУ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА**

Развитие и совершенствование вертолетной техники невозможно без широкого применения систем автоматического управления. Объясняется это, с одной стороны, сложностью рабочих процессов, протекающих в двигателе и вертолете в целом как объекте управления, а с другой – необходимостью оптимизации этих процессов для получения приемлемых удельных характеристик (удельные расход топлива и тяга, заданная надежность, эргономичность и др.), определяющих совершенство вертолета.

Системы автоматического управления (САУ) двигателями должны удовлетворять ряду требований, важнейшими из которых являются:

- обеспечение необходимого качества регулирования по основным параметрам рабочего процесса;
- выдерживание оптимальных сочетаний параметров рабочего процесса, при которых получаются приемлемые удельные характеристики; защита двигателя от недопустимых рабочих режимов;
- обеспечение требуемой надежности двигателя и согласование характеристик двигателя с характеристиками вертолета.

Эти требования, хотя и противоречивы, но должны быть удовлетворены комплексно.

В данной статье рассматривается САУ силовой установки вертолета «ROTORFLY». На данном типе воздушного судна устанавливается поршневой горизонтально-оппозитный поршневой двигатель внутреннего сгорания «Rotax». С учётом специфики работы силовой установки, возникает необходимость стабилизации частоты вращения несущего винта (НВ) на различных высотах полета.

**Ключевые слова:** САУ, вертолет, силовая установка, несущий винт, нечёткие множества, частота вращения несущего винта, мощность, датчик оборотов двигателя; датчик оборотов несущего винта; датчик крутящего момента; система управления с фаззи-модулем.

## A MATHEMATICAL MODEL OF THE ACS FREQUENCY OF ROTATION OF THE ROTOR OF THE HELICOPTER

The development and improvement of helicopter technology is impossible without the widespread use of automatic control systems. This is explained, on the one hand, by the complexity of the working processes occurring in the engine and the helicopter as a whole as a control object, and on the other – the need to optimize these processes to obtain acceptable specific characteristics (specific fuel consumption and thrust, specified reliability, ergonomics, etc.), determining the perfection of the helicopter.

Automatic control systems (ACS) engines must meet a number of requirements, the most important of which are:

- ensuring the necessary quality of regulation on the main parameters of the working process;
- maintaining optimal combinations of parameters of the working process, at which acceptable specific characteristics are obtained; protection of the engine from unacceptable operating conditions;
- ensuring the required reliability of the engine and matching the characteristics of the engine with the characteristics of the helicopter.

These requirements, although contradictory, must be met in a comprehensive manner.

This article examines the ACS of the power plant of the helicopter "ROTORFLY". This type of aircraft is equipped with a horizontal-opposed piston internal combustion engine "Rotax". Given the specifics of the power plant, there is a need to stabilize the rotor speed at different altitudes.

**Key words:** guns, helicopter, power plant, rotor fuzzy sets, the frequency of rotation of the rotor, the power, of the engine speed sensor; speed sensor rotor; the torque sensor; the control system with a fuzzy module

Проектирование систем автоматического управления авиационными двигателями основано на синтезе структуры и параметров систем и способах технической реализации схем с учетом свойств реальных элементов. Техническая реализация связана с анализом датчиков информации, решающих и других элементов с указанием способов формирования этих элементов для получения необходимых статических и динамических характеристик.

Несущий винт предназначен для создания на всех режимах полета тяги, необходимой для поддержания вертолета в воздухе и для придания ему поступательного движения, т.е. для создания подъемной силы и горизонтальной составляющей тяги, а также для осуществления продольного и поперечного управления вертолетом.

Продольное и поперечное управление вертолетом осуществляется за счет изменения положения плоскости несущего винта действием органов управления. При этом тяга винта меняет свое направление, а следовательно, меняют свою величину и направление ее составляющие: подъемная сила и горизонтальная тяга.

Режим работы несущего винта вертолета определяется положением несущего винта относительно воздушного потока, при этом различают два основных режима работы: осевого обтекания и косоуго.

Режим осевого обтекания — такой режим работы несущего винта, при котором невозмущенный воздушный поток набегаёт на винт параллельно оси и перпендикулярно плоскости вращения. Этот режим возникает при висении, вертикальном подъеме (спуске) вертолета, при работе несущего винта на стоянке.

Коэффициент режима работы несущего винта. Отношение скорости потока, лежащего в плоскости вращения, к окружной скорости конца лопасти представляет собой коэффициент, характеризующий режим работы несущего винта:

$$\mu = \frac{V \cos A}{\omega R}.$$

При горизонтальном полете  $\cos A \approx 1$  угол атаки несущего винта невелик, и можно принять:  $\mu = V/\omega R$ .

Величина  $\omega$  показывает степень эффекта косоуго обтекания и зависит от скорости

полета. При вертикальном полете или висении (режим осевого обтекания)  $\omega=0$ . В горизонтальном полете на максимальной скорости у современных вертолетов может достигать величины 0,35—0,40.

Постановка задачи регулирования частоты вращения несущего винта вертолета включает в себя требования эргономичности, безопасности и низкой стоимости. В условиях быстро развивающегося научно-технического прогресса становится актуальной задача гибкости и адаптивности систем. Сроки разработки систем в современных условиях рынка значительно сократились. В

связи с этим становится привлекательным использование нечеткой логики.

Классические методы управления хорошо работают при полностью детерминированном объекте управления и детерминированной среде, а для систем с неполной информацией и высокой сложностью объекта управления оптимальными являются нечеткие методы управления.

Формулируем постановку задачи управления частотой вращения несущих винтов с использованием нечеткого регулятора.

Таблица 1. Постановка задачи управления, результат и эффективность фазы управления

Постановка задачи	Результат	Эффективность
Эволюции вертолета сопровождаются изменением частоты вращения НВ. Коррекция частоты вращения должна произвестись в возможно короткое время	Улучшение эффективности управления частотой вращения НВ	Улучшение эргономичности управления
При эволюциях вертолета должны быть учтены многие факторы, связанные с высотой, скоростью полета и перегрузками	Фазы управления позволяют устранить зависимость частоты вращения НВ от высоты, скорости полета и перегрузок	Безопасность
Традиционные системы требуют длительного времени на разработку и поддержку	Разработка и поддержка фазы системы не требует много времени	Низкая стоимость

Система управления имеет в своем составе ручку общего шага (РОШ), которой изменяют общий шаг винтов; датчик РОШ, который преобразует угол поворота РОШ в электрический сигнал; датчик дроссельной заслонки, который преобразует угол поворота дроссельной заслонки в электрический

сигнал обратной связи; шагового двигателя, который отклоняет дроссельную заслонку на угол, заданный САУ; датчик оборотов двигателя; датчик оборотов несущего винта; датчик крутящего момента; систему управления с фаззи-модулем.



Рисунок 1. Структурная схема системы автоматического управления частоты вращения несущего винта

САУ построена по электродистанционному принципу и имеет двухуровневую иерархическую структуру. Структурная схема САУ состоит из датчиков частоты вращения двигателя, несущего винта, датчика крутящего момента, датчиков положения РОШ, дроссельных заслонок, датчика статического атмосферного давления, установленного внутри блока управления и приводов дроссельных заслонок, и привода муфты сцепления. Управление приводами осуществляет контроллер нечеткой логики посредством прошитой в него программы с фаззи-правилами. Кроме того, предусмотрен вывод информации на внешние устройства о высоте полета, крутящем моменте и частотах вращения по стандартному интерфейсу I2C.

Полное математическое описание статики и динамики двигателя и ее системы автоматического регулирования является достаточно сложной задачей, решение которой выходит за пределы задач динамики полета вертолета. При решении этих задач, как правило, используются упрощенные уравнения. Эти уравнения, в целом, должны обеспечивать учет особенностей работы системы автоматического регулирования, приемистости и ограничения мощности при изменении условий полета.

Рассмотрим упрощенную систему уравнений, которые обеспечивают решение рассматриваемой задачи. При этом принято, что автоматическое регулирование частоты вращения коленвала двигателя обеспечивается статической системой. Эти уравнения можно представить в следующем виде:

$$\frac{dN_{дв}}{dt} = \frac{1}{T_{дв}} (- (N_{дв} - N_{двбал}) - k_{\omega} \Delta\omega + f(\varphi_{ош})),$$

где  $N_{двбал}$  – мощность двигателя на исходном установившемся режиме;

$T_{об}$  – постоянная времени, характеризующая суммарное эквивалентное запаздывание в переходных процессах двигателя и системы автоматического регулирования частоты вращения;

$k_{\omega}$  – передаточное число, характеризующее влияние изменения частоты вращения несущих винтов на мощность двигателя;

$\Delta\omega = \omega - \omega_0$  – рассогласование по частоте вращения несущего винта;

$\omega_0$  – частота вращения несущего винта, соответствующая исходной настройке регу-

лятора частоты вращения коленвала двигателя;

$\omega$  – текущее значение частоты вращения несущего винта;

$f(\varphi_{ош})$  – коррекция от рычага общего шага, которая обеспечивает сведение до минимума статической ошибки системы автоматического регулирования частоты вращения коленвала двигателя при увеличении мощности двигателя.

В процессе математического моделирования уравнений необходимо отдельно учитывать у двигателей ограничения по максимальной (взлетной) мощности и по минимальной мощности на режиме полетного малого газа:

$$N_{дв \min \text{ в с}} \leq N_{дв} \leq N_{взл}.$$

Ограничения в пределах взлетной мощности и мощности на режиме полетного малого газа вычисляются на основе климатических характеристик двигателей  $N_{дв \text{ взл}} = f(H, t_H)$ ,  $N_{дв \text{ мин}} = f(H, t_H, n)$  в зависимости от барометрической высоты и температуры наружного воздуха.

Здесь  $n$  – относительная величина частоты вращения коленвала двигателя и несущих винтов (отношение текущей величины частоты вращения к номинальной).

Должны быть также учтены характеристики приемистости двигателя в виде ограничения скорости изменения мощности. Эти ограничения в упрощенной постановке могут быть представлены в следующем виде:

$$\left| \frac{dN_{дв}}{dt} \right| \leq \left| \left( \frac{dN_{дв}}{dt} \right)_{\text{max}} = f(N_{дв}) \right|.$$

Также немаловажное значение при математическом моделировании имеет такое явление как перетяжеление несущих винтов.

Под перетяжелением несущих винтов понимают нерасчетное уменьшение их тяги при увеличении общего шага, сопровождающееся уменьшением числа оборотов несущих винтов вследствие несоответствия мощности, подводимой к винтам, и мощности, потребной на их вращение.

Перетяжеление несущих винтов на вертолете может наступить по двум причинам. В первом случае перетяжеление наступает, если рычаг «шаг-газ» отклоняется вверх в темпе, не соответствующем приемистости двигателей. При этом рост мощности двигателей отстает от увеличения мощности,

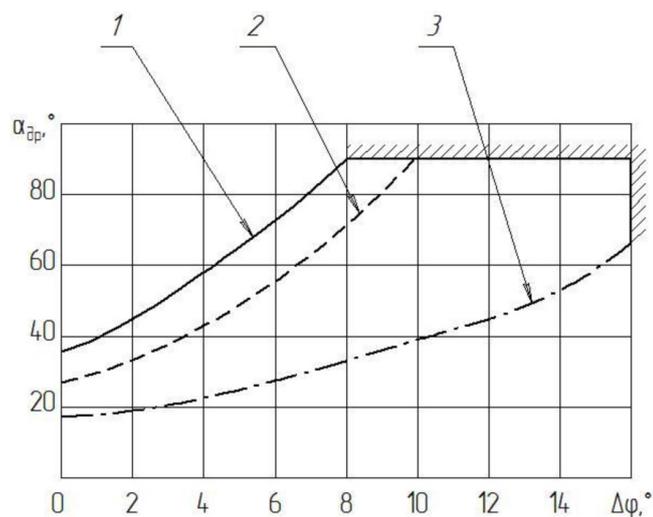
потребной для вращения винтов, а под действием неуравновешенных моментов сопротивления вращению число оборотов винтов уменьшается, что приводит к падению тяги.

Данный случай перетяжеления принципиально возможен на любом из режимов полета, но наиболее опасен при взлете и посадке и на малых высотах, потому что при уменьшении тяги винтов происходит резкое снижение («просадка») вертолета. К перетяжелению несущих винтов может привести и поспешность в отделении вертолета от земли. Если рычаг «шаг-газ» при отрыве поднимается за время менее 5—7 сек, то вертолет может не отделиться от земли, так как мощность, подводимая к винту, будет недостаточна. А если и произойдет отрыв вертолета за счет увеличения углов атаки элементов лопастей и кратковременного увеличения тяги, то в дальнейшем под воздействием увеличившихся

моментов сопротивления вращению достигнутое число оборотов уменьшается, и вертолет начинает энергично снижаться.

При невмешательстве пилота в управление произойдет грубый удар о землю, увеличивающий нагрузки на конструкцию вертолета.

Перетяжеление несущих винтов возможно и в том случае, если пилот поднимает рычаг «шаг-газ» с нормальным темпом, но на чрезмерно большую величину. Увеличение общего шага при полностью открытых дроссельных заслонках приводит к уменьшению числа оборотов винтов, и мощность двигателя уменьшается. Величина общего шага, соответствующего полному открытию дроссельных заслонок, может быть определена по характеристике системы «шаг-газ» (рис. 2).



**Рисунок 2.** Характеристика системы «шаг-газ»:

1 — максимальная коррекция, 2 — взлетные обороты, 3 — минимальная коррекция

На графике видно, что при максимальной коррекции дроссельные заслонки полностью открываются при увеличении минимального общего шага на  $8^\circ$ . Больше изменение шага приведет к перетяжелению несущих винтов.

Если корректор установить в положение 2 (рис. 2), то в этом случае взлетный режим достигается при увеличении общего шага примерно на  $10^\circ$  от минимального. Попытка увеличить общий шаг еще больше приведет к уменьшению оборотов несущих винтов. Наиболее характерны такие случаи при взлетно-посадочных операциях и полетах на малых высотах. Например, при эксплуатации вертолета на площадках с размерами меньше

минимально допустимых на взлете пилот может произвольно «перетянуть» рычаг «шаг-газ» для получения более крутой траектории подъема. На посадке при чрезмерно крутой траектории и значительной вертикальной скорости снижения запаса мощности для гашения скорости может не хватить, а попытка продолжать увеличивать общий шаг также вызовет уменьшение оборотов винтов. Подобные случаи особенно вероятны при малых запасах мощности, например, при эксплуатации вертолетов с весом, близким к максимально допустимому для данных атмосферных условий, при вертикальных

режимах полета, полетах на малых скоростях, на больших высотах.

При минимальной коррекции дроссельные заслонки прикрываются и откроются полностью на большем общем шаге (рис. 2). Но при работе двигателей на «тяжелых винтах» эффективная мощность уменьшается, и требуемая для полета тяга может быть не получена, что вызовет снижение вертолета. Подобные случаи могут наступить, когда число оборотов несущих винтов своевременно не увеличивают, например, при гашении скорости на посадке.

### Выводы

В данной работе спроектирована САУ частоты вращения винта вертолета на основе контроллера нечеткой логики. Применение нечеткой логики позволяет, не имея математической модели процесса регулирования, обеспечить гибкую реакцию на изменение окружающих условий. Это дает возможность применения вышеуказанной модели на объектах с различными техническими характе-

ристиками. Адаптивная система обладает рядом преимуществ, таких как:

- меньший вес изделия;
- повышенная надежность (за счет малого количества элементов по сравнению с пропорционально-импульсно-дифференциальными (ПИД) регуляторами);
- возможность адаптивной настройки системы под особенности объекта управления без изменения структуры схемы.

Данная САУ отличается высокой технологичностью за счет большой степени использования микросхем. Использование бесконтактных и телеметрических датчиков делает систему удобной в обслуживании.

Математическое моделирование проектируемой системы произведено с помощью пакета прикладных программ Matlab. Рассмотрены частотные характеристики разомкнутой системы. Проведено исследование системы на устойчивость. По переходному процессу определены показатели качества системы.

### Список литературы

1. Овчаренко В.Н., Феофилов Е.Б. Полет // Общероссийский научно-технический журнал. Идентификация параметров линеаризованной модели продольного движения соосного вертолета. – 2013. - № 11. – С. 46-52.
2. Матвеев А.М., Акимов А.И., Акопов М.Г., Алексеев Н.В. Самолеты и вертолеты. – Т. IV-21. Проектирование, конструкции и системы самолетов и вертолетов. – Кн. 2. – М.: Машиностроение, 2004. – 753 с.
3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
4. Шелухин О.И. Моделирование информационных систем. — М.: Горячая линия-Телеком, 2012. — 536 с.
5. Кулагин В.В. и др. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок : Учебник для студентов вузов / под ред. В.В. Кулагина. – М.: Машиностроение. – Кн. 1, 2, 2003. – 616 с., Кн. 3, 2005. – 464 с.
6. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления : учебное пособие. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2004. — 752 с.; ил.

### References

1. Ovcharenko V.N., Feofilov E.B. Polet. Obshherossijskij nauchno-tehnicheskij zhurnal. Identifikacija parametrov linearizirovannoj modeli prodol'nogo dvizhenija soosnogo vertoleta. – 2013. - № 11. – P. 46-52.
2. Matveenko A.M., Akimov A.I., Akopov M.G., Alekseev N.V. Samolety i vertolety. – Vol. IV-21. Projektirovanije, konstrukcii i sistemy samoletov i vertoletov. – Book 2. – M.: Mashinostrojenije, 2004. – 753 p.
3. Leonenkov A.V. Nechetkoje modelirovanije v srede MATLAB i fuzzyTECH, SPb.: BHV-Peterburg, 2005. – 736 p.
4. Sheluhin O.I. Modelirovanie informacionnyh sistem. — M.: Gorjachaja linija-Telekom, 2012. — 536 p.
5. Kulagin V.V. i dr. Teorija, raschet i projektirovanije aviacionnyh dvigatelej i energeticheskijh ustanovok : Uchebnik dlja studentov vuzov / pod red. V.V. Kulagina. – M.: Mashinostroenie. – Book 1, 2, 2003. – 616 p., Book 3, 2005. – 464 p.
6. Besekerskij V.A., Popov E.P. Teorija sistem avtomaticheskogo upravlenija : uchebnoe posobije. — 4-e izd., pererab. i dop. — SPb.: Professija, 2004. — 752 p.; il.



**Ярославкина Е.Е.**  
**Yaroslavkina E.E.**

кандидат технических наук,  
доцент, заведующий  
кафедрой «Информационно-  
измерительная техника»,  
ФГБОУ ВО «Самарский  
государственный  
технический университет»,  
г. Самара,  
Российская Федерация



**Мельникова Д.А.**  
**Melnikova D.A.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Автоматизация и управле-  
ние технологическими  
процессами», ФГБОУ ВО  
«Самарский государственный  
технический  
университет», г. Самара,  
Российская Федерация



**Муратова В.В.**  
**Muratova V.V.**

старший преподаватель  
кафедры «Информационно-  
измерительная техника»,  
ФГБОУ ВО «Самарский  
государственный техниче-  
ский университет»,  
г. Самара,  
Российская Федерация

УДК 627.311

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-106-111

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СТЕНД ПРИЕМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Среди многочисленных проблем развития Единой электроэнергетической системы (ЕЭС) России одной из главных задач является обеспечение и поддержание надежности её работы. Под надёжностью в данном случае понимается выполнение в полном объёме функций предупреждения и устранения аварий и нештатных ситуаций.

Для реализации данных задач в автоматизированные системы управления технологическими процессами энергообъектов добавляют информационно-измерительные системы (ИИС), главной функцией которых является измерение, запись, а также первичная обработка текущих значений напряжения и тока; позиция контактов реле защит в различных режимах работы систем и их присоединений, таких как предаварийный, аварийный и послеаварийный, формирование осциллограмм протекающих процессов и протоколов аварий, также определение и наблюдение за параметрами нормального режима работы сети.

В статье рассматривается разработка автоматизированного стенда для испытаний погружных электродвигателей. Проведение приемо-сдаточных испытаний силового электрооборудования очень сложная задача в связи с тем, что необходимо оперативно измерять мгновенные значения информативных параметров для предотвращения аварийных режимов высоковольтного оборудования. При проведении испытаний электродвигателей очень важно контролировать информативные параметры. В роли носителей информации в АИИС применяют действующие (среднеквадратические) значения тока и напряжения, активную и реактивную мощности, которые называют интегральными характеристиками периодических сигналов (ИХПС), а также частоту. Для решения поставленной задачи предлагается применение аппроксимационного подхода при измерении интегральных характеристик периодического сигнала.

В статье описывается сущность аппроксимационного подхода, основанного на применении априорной информации о характере сигнала при дальнейшей замене интегральных преобразований арифметическими операциями с точечными оценками. Рассматривается разработанный метод на основе аппроксимационного подхода и интеллектуального

измерительного преобразователя для оперативного и точного контроля информативных параметров при испытании погружных электродвигателей за время не более полупериода, что позволяет не допустить аварийных и предаварийных режимов работы. Приводятся основные выводы по внедрению разработанного метода определения интегральных характеристик.

**Ключевые слова:** аппроксимационный метод измерений, активная мощность, гармонические сигналы, мгновенные значения, дополнительные сигналы, фазосдвигающий блок, гармоническая модель, погрешность, интегральные характеристики периодических сигналов, интеллектуальный измерительный преобразователь, реактивная мощность.

## STAND OF RECEIVING-CONTINUOUS TESTS OF SUBMERSIBLE ELECTRIC MOTORS

Among numerous problems there is development of the Uniform Electrical Power System of Russia, one of the main tasks is providing and maintenance of reliability of work of EEC. Reliability, in this case, is understood as performance in full of functions prevention and elimination of accidents and emergency situations.

For realization of these tasks add the it is information-measuring systems (IIIMS) which main function is measurement, record and also preprocessing of the current values of tension and current to automated process control systems of power facilities; a position of contacts of the relay of protection in various operating modes of systems and their accessions, such, as preemergency, emergency and postemergency, formation of oscillograms of the proceeding processes and protocols of accidents, also definition and observation of parameters of a normal working hours of network.

In article development of the automated stand for tests of submersible electric motors is considered. Carrying out acceptance tests of power electric equipment very difficult task because it is necessary to measure quickly instant values of informative parameters, for prevention of emergency operation of the high-voltage equipment. When carrying out tests of electric motors it is very important to control informative parameters. As data carriers in AIIS the operating (mean square) values of current and tension, active and jet apply of power which call the integrated characteristics of periodic signals (ICPS) and also frequency. For the solution of an objective it is offered applications of approximating approach at measurement of integrated characteristics of a periodic signal.

In article the essence of the approximating approach based on application of prior information on the nature of a signal at further replacement of integrated transformations with arithmetic operations with dot estimates is described. The developed method on the basis of approximating approach and the intelligent measuring converter for operating and exact control of informative parameters at test of submersible electric motors in time no more half-cycle is considered that allows not to allow emergency and preemergency operation of work. The main conclusions on introduction of the developed method definitions of integrated characteristics are given.

**Key words:** approximation measurement method, effective power, harmonic signals, instantaneous values, additional signals, phase-shifting unit, harmonic model, error, integral characteristics of periodic signals, intelligent transducer, reactive power.harmonic signals, instantaneous values, additional signals, phase-shifting blocks, harmonic model, error.

Силовое электрооборудование является сложным электроэнергетическим объектом, который имеет большое число контролируемых параметров. В нефтяной промышленности при добыче нефти основным электрооборудованием являются погружные электродвигатели (ПЭД), обладающие высокой мощностью, насосы, а также устройства

автоматического управления, релейной защиты и различной противоаварийной автоматики.

ПЭД является высоковольтным оборудованием, и выход его из строя электродвигателя может привести к аварийной ситуации и большим финансовым потерям. В процессе испытания электродвигателей необходимо

мгновенно определять повышенное напряжение и процессы разрушения, связанные с тепловыми процессами нагрева обмоток, а также пробой электричества высокого напряжения, для исключения дальнейшего разрушения электродвигателя.

Поэтому при испытании электродвигателей очень важно контролировать возникновение аварийного режима с помощью оперативного измерения информативных параметров за время не более полупериода питающей сети. Необходимость оперативного контроля заключается в минимизации возможного ущерба при испытании неисправного электродвигателя [1-4].

При проведении приемо-сдаточных испытаний ПЭД необходимо контролировать информативные параметры, такие как среднеквадратическое значение (СКЗ) тока и напряжения, активные и реактивные мощности, которые называются интегральными характеристиками периодических сигналов (ИХПС), а также сопротивление изоляции.

Современное электроизмерительное оборудование, которое позволяет измерить параметры электродвигателей, не обеспечивает нужное быстродействие и требуемую точность для проведения испытаний. Используемые в настоящее время быстродействующие системы защит не обладают необходимой точностью, поэтому приемо-сдаточные стенды оснащаются как системами измерения электрических параметров, так и системами оперативной защиты.

В статье рассматривается разработка автоматизированного информационного-измерительного преобразователя (АИИП), позволяющего оперативно, с высокой точностью, контролировать информативные параметры при испытании ПЭД за время не более полупериода, что позволяет не допустить аварийных и предаварийных режимов работы.

В разработанном АИИП применяется аппроксимационный подход для нахождения интегральных характеристик. Применение аппроксимационного подхода приводит к результативному решению и дает общеметодологическую платформу для приведения к единому виду измерительных средств и их дальнейшему метрологическому анализу [5-7].

Сущность аппроксимационного подхода заключается в следующем: когда измерительный сигнал аппроксимируется моделью, тогда, измеряя  $m$  значений сигнала при различных, в общем случае произвольных, значениях аргумента  $t$ , возможно скомпоновать систему  $m$  уравнений, которая решена относительно этих параметров:

$$\begin{cases} x_M(t_1, \alpha_1, \dots, \alpha_m) = x(t_1); \\ \dots \\ x_M(t_m, \alpha_1, \dots, \alpha_m) = x(t_m) \end{cases}$$

Применение априорной информации о характере сигнала дает возможность произвести замену интегральных преобразований арифметическими операциями с точечными оценками. Такой подход дает возможность произвести обобщение известных методов, алгоритмов и средств измерений интегральных характеристик сигналов, а также разрабатывать совершенно новые [6, 7].

В общем случае, качество решения аппроксимационных задач оценивается результирующей погрешностью, которая включает в себя все, что определяет какое-либо несоответствие модели с моделируемой зависимостью [8]. Когда сигналы случайные, это интегральные, среднеквадратические характеристики. В случае квазидетерминированных сигналов есть вероятность получения более грубых характеристик равномерного приближения, но для выявления такого вида оценок необходимо знать реальную аппроксимирующую зависимость.

В АИИП реализован метод определения параметров по мгновенным значениям входных сигналов на основе формирования дополнительных сигналов (ДопС) напряжения и использования их характерных точек.

Разработанный метод измерения ИХПС исключает погрешность по модулю фазосдвигающего блока (ФБ), поскольку при его реализации используются только мгновенные значения (МгЗ) входных сигналов, и не предусматривает формирование дополнительных интервалов времени [9].

Метод основан на том, что формируют первый и второй ДопС напряжения, которые сдвинуты относительно входного по фазе на углы  $\Delta\alpha$  и  $2\Delta\alpha$  соответственно в сторону

опережения. В момент, когда происходит переход второго дополнительного напряжения через ноль, измеряют первые МгЗ входного напряжения и тока. В момент перехода первого ДопС напряжения через ноль измеряют вторые мгновенные значения входного

напряжения и тока. ИХПС определяют по измеренным МгЗ входного напряжения и тока.

Графики процессов, поясняющие метод, приведены на рисунке 1.

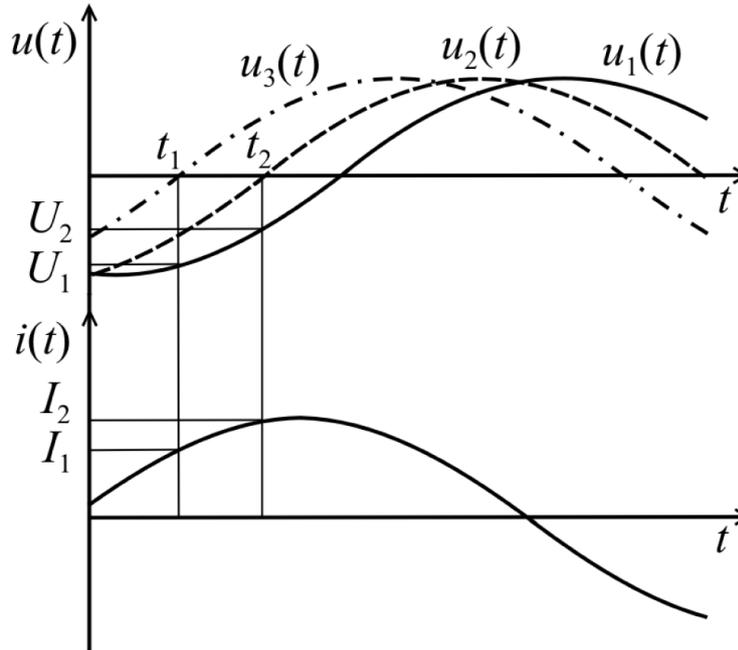


Рисунок 1. Графики процессов, поясняющие принцип работы ИИП

Если входной сигнал напряжения и тока соответствуют модели гармонического сигнала  $u_1(t) = U_{m1} \sin \omega t$  и

$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ , то ДопС напряжения

примут вид:  $u_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \Delta\alpha)$ ,

$u_3(t) = U_{m3} \sin(\omega t + 2\Delta\alpha)$ ,

где  $U_{m1}$ ,  $U_{m2}$  и  $U_{m3}$  – амплитудные значения входного и дополнительных напряжений.

В момент времени (МВ)  $t_1$ , когда второе дополнительное напряжение переходит через ноль из отрицательной полуволны в положительную, МгЗ напряжения и тока будут равны  $U_1 = U_{m1} \sin(-2\Delta\alpha)$  и  $I_1 = I_m \sin(\varphi - 2\Delta\alpha)$ .

В МВ  $t_2$ , когда первый ДопС напряжения переходит через ноль из отрицательной полуволны в положительную, мгновенные значения напряжения и тока принимают вид:  $U_2 = U_{m1} \sin(-\Delta\alpha)$  и  $I_2 = I_m \sin(\varphi - \Delta\alpha)$ .

Если использовать МгЗ сигналов при угле

сдвига ФБ  $\Delta\alpha \leq \frac{\pi}{2}$ , то после преобразований

получим выражения для определения основных ИХПС:

$$U_{СКЗ} = \frac{\sqrt{2}U_2}{\sqrt{4U_2^2 - U_1^2}}; \quad (1)$$

$$I_{СКЗ} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ I_2^2 + \frac{(2I_1U_2 - I_2U_1)^2}{4U_2^2 - U_1^2} \right]}; \quad (2)$$

$$P = \frac{U_2 [I_2U_1 - I_1U_2]U_1 - 2U_2^2I_2}{4U_2^2 - U_1^2}; \quad (3)$$

$$Q = \frac{(I_2U_1 - I_1U_2)U_2}{\sqrt{4U_2^2 - U_1^2}}. \quad (4)$$

Схема ИИП, с помощью которой может быть реализован рассматриваемый выше метод, показана на рисунке 2.

В состав АИИП входят: ППН, ППТ – первичный преобразователь напряжения и тока, ФБ – фазосдвигающий блок, Н-О – нуль-орган, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, КНТ – контроллер.

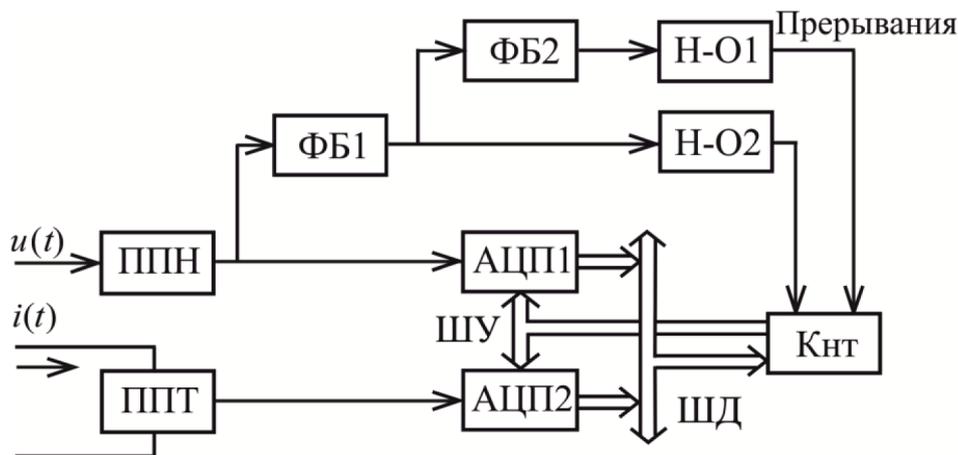


Рисунок 2. Схема АИИП, реализующая метод

В основу функционирования разработанной ИИП контроля электрических параметров электродвигателей заложен метод измерения интегральных характеристик по МгЗ сигналам, разделенным в пространстве. Разработанная система позволяет измерять весь комплекс ИХПС, а также частоту входных сигналов.

#### Выводы

Разработанная система прошла успешное внедрение на стенде приемо-сдаточных испытаний погружных электродвигателей в г. Отрадном.

#### Список литературы

1. ГОСТ 26772-85. Машины электрические вращающиеся. Обозначение выводов и направление вращения. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 21 с.
2. ГОСТ 11828-86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 31 с.
3. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 39 с.
4. ГОСТ 30195-94. Электродвигатели асинхронные погружные. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1994. – 31 с.
5. Мелентьев В.С., Батищев В.И. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 240 с.

Экспериментальные исследования показали, что разработанный ИИП обеспечивает измерение частоты и СКЗ напряжения и тока с основной относительной погрешностью менее 0,5 %, а активной и реактивной мощности – с основной приведенной погрешностью менее 0,5 %.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-08-00253, 16-08-00252).*

6. Батищев В.И., Мелентьев В.С. Использование аппроксимационного подхода для сокращения времени обработки измерительной информации // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий. Инфо-2007: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Сочи: ИПУ РАН, 2007. – С. 67-71.
7. Ланге П.К., Ярославкина Е.Е. Аппроксимационные методы и средства обработки измерительных сигналов. – LAP Lambert Academic Publishing ru, 2017. – 237 с.
8. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
9. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Метод измерения параметров гармонических сигналов на основе использования характерных точек дополнительных сигналов напряжения // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 4 (6).

### References

1. GOST 26772-85. Mashiny elektricheskije vrashhajushhiesja. Oboznachenije vyvodov i napravlenie vrashhenija. – M.: IPK Izdatel'stvo standartov, 1985. – 21 p.
2. GOST 11828-86. Mashiny elektricheskije vrashhajushhiesja. Obshhije metody ispytaniy. – M.: Izdatel'stvo standartov, 2003. – 31 p.
3. GOST 7217-87. Mashiny elektricheskije vrashhajushhiesja. Metody ispytaniy. – M.: Izdatel'stvo standartov, 2003. – 39 p.
4. GOST 30195-94. Elektrodvigateli asinhronnye pogruzhnye. Obshhije tehnikeskije uslovija. – M.: Izdatel'stvo standartov, 1994. – 31 p.
5. Melent'ev V.S., Batishhev V.I. Approksimacionnyje metody i sistemy izmerenija i kontrolja parametrov periodicheskikh signalov. – M.: FIZMATLIT, 2011. – 240 p.
6. Batishhev V.I., Melent'ev V.S. Ispol'zovanie approksimacionnogo podhoda dlja sokrashhenija vremeni obrabotki izmeritel'noj informacii / Innovacii v uslovijah razvitija informacionno-kommunikacionnyh tehnologij. Info-2007: Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. – Sochi: IPU RAN, 2007. – P. 67-71.
7. Lange P.K., Jaroslavkina E.E. Approksimacionnyje metody i sredstva obrabotki izmeritel'nyh signalov. – LAP Lambert Academic Publishing ru, 2017. – 237 p.
8. Novickij P.V. Ocenka pogreshnostej rezul'tatov izmerenij. – L.: Energoatomizdat, 1985. – 248 p.
9. Melent'ev V.S., Ivanov Ju.M., Muratova V.V. Metod izmerenija parametrov garmonicheskikh signalov na osnove ispol'zovanija harakternyh toчек dopolnitel'nyh signalov naprjazhenija // Izmerenija. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'. – 2013. – № 4 (6).



**Грахов П.А.**  
**Grakhov P.A.**

*кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
авиационный  
технический университет», г. Уфа,  
Российская Федерация*



**Федин А.В.**  
**Fedin A.V.**

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

УДК 621.313

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-112-121

## **УСТРОЙСТВА УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПЛАСТИН**

В статье рассмотрены вопросы построения исполнительных устройств угловых перемещений на основе изгибных деформаций, возникающих в двухслойных магнитострикционных пластинах с неоднородными в слоях (противоположными по знаку) магнитострикционными свойствами. В магнитострикционном исполнительном устройстве с балочной шарнирной установкой активного элемента – магнитострикционной пластины и чисто угловом позиционировании исполнительного органа прецизионной системы управления – оценочно определены достигаемый диапазон угловых перемещений и быстродействие: как величина, обратная собственной частоте механической системы привод – инерционная нагрузка.

Предложен формальный критерий эффективности, пропорциональный объему активного элемента исполнительного устройства, позволяющий при заданных параметрах диапазона, быстродействия и ограничениях по габаритам магнитострикционного привода предварительно выбрать размеры и исследовать возможности конструктивной схемы. В результате анализа выявлены положительные и отрицательные особенности функционирования магнитострикционных исполнительных устройств, определяющие границы их области применения. Предложены направления разработки одноступенчатых магнитострикционных устройств на основе многоэлементных схем и продольной неоднородности активного элемента. Практическая значимость работы состоит в предложенных вариантах двухэлементных последовательно-связанных магнитострикционных исполнительных устройств с неоднородными элементами. Оценочный анализ, на основе критерия эффективности, определил их характеристики, выявил возможность осуществления в них кинематической компенсации возникающих температурных изгибных деформаций пластин и способность к нечетному управлению угловыми перемещениями, а также способы уменьшить продольные габариты привода. Предложены схемы параллельно-связанных исполнительных устройств, в которых реализуется силовая компенсация температурных изгибных деформаций магнитострикционных пластин, исчезает необходимость в шарнирной установке нагрузки, обеспечивая более высокую точность привода. Анализ статических характеристик параллельно-связанной схемы устройства, полученных в результате моделирования, подтвердил целесообразность поиска алгоритмов построения схем при раздельном и совместном действии внешнего

момента сил с целью обеспечения температурной стабильности характеристик и в целом перспективность применения магнестрикционных устройств на основе изгибных деформаций для отработки угловых перемещений объектов.

**Ключевые слова:** угловые перемещения, магнестрикционный, изгибные деформации, диапазон, быстродействие, температурные деформации, многоэлементные схемы, последовательно-связанные устройства, параллельно-связанные устройства, температурная стабильность.

## THE DEVICES OF ANGULAR DISPLACEMENTS BASED ON MAGNETOSTRICTIVE PLATES

This paper is devoted to the design issues of executive devices of small angular movements based on flexural deformations arising in two-layer magnetostrictive plates with magnetostrictive properties that are heterogeneous in layers (opposite in sign). In the magnetostrictive executive device with a beam-pivotally installation of the active element – magnetostrictive plate and pure angular displacement of the executive body for the precision control system the achievable range for angular displacements and operational speed are estimated as the reciprocal of eigenfrequency of the mechanical system «drive - inertial load». The formal performance criterion is proposed that is proportional to the volume of the active element in the executive device providing the pre-selection of dimensions and the possibilities exploration of the design scheme for given parameters of range, operational speed and dimension limitations of the magnetostrictive drive. The positive and negative operation features of the magnetostrictive executive device are analyzed and the boundaries of their application field are determined. The design trends for single-stage magnetostrictive devices based on multi-element circuits and the longitudinal heterogeneity of the active element are proposed. The practical significance of the work consists in the proposed variants of two-element series-connected magnetostrictive executive devices with heterogeneous elements. Evaluation analysis based on the efficiency criterion determined their characteristics, the implementation possibility of the kinematic compensation of arising temperature flexural deformations of the plates and the ability to oddly control of angular displacements, as well as techniques for reducing the longitudinal dimensions of the drive. The construction schemes for the parallel-coupled executive devices are proposed implementing the force compensation of the temperature flexural deformations of magnetostrictive plates, and the necessity elimination of the beam-pivotally installation for the load providing higher accuracy of the drive. The static characteristics analysis of a parallel-coupled circuit of device obtained from the simulation confirmed the feasibility of search for the constructing algorithms for circuits with separate and joint action of an external torque to ensure the temperature stability of the characteristics, and the application perspectives of magnetostrictive devices based on flexural deformations for the objects angular displacements.

**Key words:** angular movements, magnetostrictive, flexural deformations, range, operational speed, temperature deformations, multi-element circuits, series-connected devices, parallel-coupled devices temperature stability.

Исполнительные устройства (ИУ) со стабильными характеристиками, осуществляющие угловые перемещения инерционных объектов ( $10^{-5} \div 10^{-3}$  кг м<sup>2</sup>) в диапазоне долей градуса с точностью и быстродействием на уровне долей угловых минут и десятков миллисекунд соответственно, востребованы в станкостроении, в робототехнике, в оптико-

механических, измерительных, медицинских системах и т.д. [1, 2].

Основой построения ИУ могут служить изгибные деформации, возникающие в двухслойной магнестрикционной пластине (МП) с неоднородными в слоях (противоположными по знаку) магнестрикционными свойствами. При протекании тока  $I(t)$  по обмотке, имеющей  $w$  витков, появляется маг-

нитное поле, которое вызывает различные по знаку (метки «+» или «-») магнестрикционные деформации слоев МП и изгиб (рис. 1)

активного элемента (условно показан пунктиром).

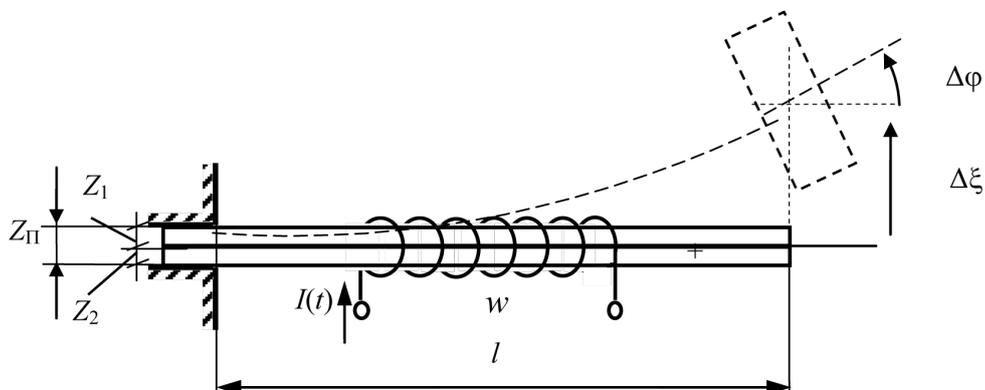


Рисунок 1. ИУ с консольной установкой МП

При консольной заделке установленный на свободном конце МП объект не только смещается по оси ординат на  $\Delta\xi$  [3], но и поворачивается на угол  $\Delta\phi$  [4].

Магнестрикционное исполнительное устройство (МСИУ) угловых перемещений объекта без линейных смещений реализуется при балочной установке МП на неподвижных шарнирах (рис. 2) [4]. Объект закреплен на связанной с МП поворотной части правого шарнира. Угол поворота составляет (оценочно)  $\Delta\phi \approx 0,75(|\lambda_1| + |\lambda_2|)l/Z_{\Pi}$ , где

$\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $l$  и  $Z_{\Pi}$  – магнестрикция слоев,

длина и толщина МП соответственно. Параметры  $l$  и  $Z_{\Pi}$  расположены в плоскости,

перпендикулярной оси вращения объекта. Меньшая чем  $l$  ширина МП  $b$  дает возможность встроить МСИУ в системы, критичные к этому габариту. Быстродействие определяет  $f_c$  собственная частота механической системы ИУ-нагрузка (инерционность  $J_{\Sigma} \approx 0,243 \cdot J_{ИУ} + J_H$ , где  $J_H, J_{ИУ}$  – моменты инерции нагрузки и активного элемента) [5]. При кратности  $J_H/J_{ИУ}$  более двух ИУ близок к системам с сосредоточенными параметрами и  $f_c \approx (K_{\phi ИУ}/J_H)^{1/2}/2\pi$ . Жесткость активного элемента  $K_{\phi ИУ} \approx E_{\Sigma} b Z_{\Pi}^3/6l$  ( $b$ ,  $E$  – ширина и эквивалентный модуль упругости материалов).

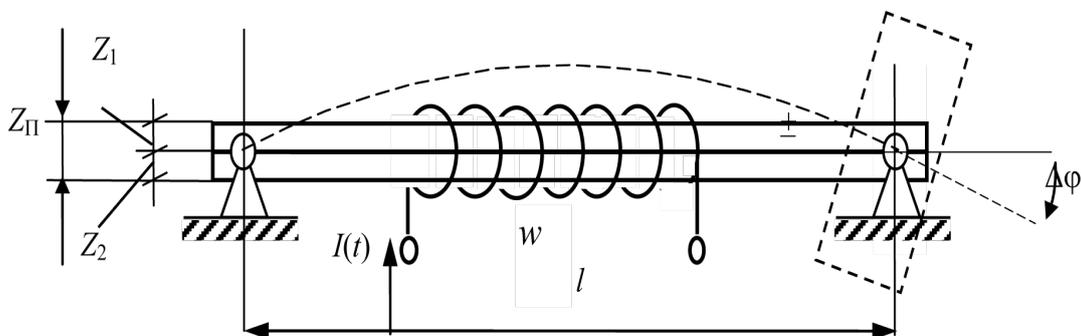


Рисунок 2. МСИУ с балочной шарнирной установкой МП

Величины  $\Delta\varphi$  и  $K_{\varphi ИУ}$  позволяют предва- рительно выбрать параметры активного эле- мента МСИУ по моменту инерции нагрузки  $J_H$ . По заданному диапазону  $\Delta\varphi$  и константам материалов МП рассчитывается отношение  $l/Z_{II}$  и, сохраняя это значение, определяются необходимые габариты  $l$ ,  $b$  и  $Z_{II}$  по жесткости  $K_{\varphi ИУ}$  и инерционности нагрузки  $J_H$  (требуе- мому быстродействию МСИУ). Быстродействие, с учетом возможности кор- рекции динамических свойств ИУ [5], опре- деляет период  $T \approx l/f_c$ .

Формальный критерий эффективности ИУ  $F = \Delta\varphi \cdot f_c = C(lbZ_{II}/J_H)^{1/2}$  пропорционален корню из объема активного элемента, отне- сенному к моменту инерции нагрузки, и позволяет оценить варианты МСИУ с нагруз- кой.

МСИУ (рис. 2) имеют ряд особенностей: без магнитной поляризации угловое переме- щение осуществляется в одну сторону (чет- ность магнитоstriction), шарнир, фиксиру- ющий ось вращения, должен обеспечивать точное движения объекта в минутном диа- пазоне. Желательно жесткое крепление МП на основании, но другая форма деформирования уменьшает значение  $\Delta\varphi$ . При изменении температуры биметаллический прогиб МП, определяемый разностью температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР)  $\alpha$  материалов слоев, вызывает допол- нительные перемещения объекта  $\Delta\varphi_{\Theta}$ . Меняются распределения упругих напряже- ний по толщине МП и константы магнито- стрикционных материалов (двухканальное поведение МСИУ [4, 6]). Прогиб отсутствует, при равных в слоях значениях  $\alpha$ , но не для самых эффективных материалов. Не всегда приемлемо применение двухдвигательной схемы ИУ [5] с широкодиапазонным приво- дом «грубой» ступени, выбирающим медлен-

ные перемещения объекта  $\Delta\varphi_{\Theta}$ , вызванные температурными деформациями МП точной ступени.

Варианты ИУ на основе МП, кинематиче- ская схема которых может исключить биме- таллический прогиб, учесть четность эффекта и другие особенности целесообразно искать в направлении применения многоэле- ментных схем и продольной неоднородности активного элемента.

Анализ схем последовательного и парал- лельного включения МП по отношению к результирующему угловому перемещению объекта проведем, оценивая диапазон, быстродействие, точность и габариты ИУ.

МСИУ по рисунку 2 уже можно полагать «двухэлементным» последовательно-связан- ным ИУ. Левая половина МП, не участвуя в повороте объекта, перемещает правую вверх относительно основания, «компенсируя» ее смещение  $\Delta\xi$ . Поворот на угол  $\Delta\varphi$  проис- ходит за счет изгиба правой половины МП, как при консольной установке и активной длине, равной  $l/2$ .

Такие же значения диапазона  $\Delta\varphi$  и быстродействия (объем активного элемента не меняется) достигаются в имеющем после- довательно-связанную продольную схему МСИУ (рис. 3). Две МП с инверсным распо- ложением слоев (продольно неоднородный активный элемент) связаны соединительным шарниром. Конец левой МП жестко закреп- лен. Вторая МП правым концом, где распо- ложена поворотная часть неподвижного шар- нира, жестко связана с перемещаемым объектом. Подбором соотношения ТКЛР материалов слоев МП можно осуществить кинематическую компенсацию биметалличе- ского прогиба  $\Delta\varphi_{\Theta}$ .

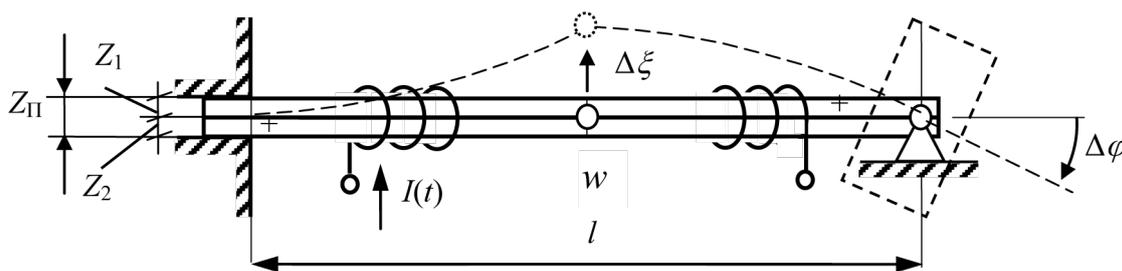


Рисунок 3. Схема МСИУ со связанным соединительным шарниром продольно-неоднородным активным элементом

Повысить значение критерия  $F$ , удваивая объем активного элемента при неизменном продольном габарите  $l$  ИУ, можно выбрав другое размещение МП [7, 9]. В схеме (рис. 4) МП расположены параллельно одна над другой с общей обмоткой и связаны посредством соединительного и неподвижного шарниров. В отношении углового движения объекта МП включены последовательно: нижняя правым концом закреплена на основании, а верхняя, также правым концом, жестко связана с нагрузкой (поворотной частью неподвижного шарнира). При намагничивании, за счет обратного расположения слоев, происходит противоположный изгиб МП (пунктир-

ные кривые), и объект поворачивается на угол  $\Delta\varphi \approx 1,5(|\lambda_1| + |\lambda_2|)l/Z_{II}$ . Здесь, обеспечив диапазон  $\Delta\varphi$  и быстродействия на уровне МСИУ по рисунку 3, можно снизить продольные габариты активного элемента в два раза.

Выполнение соотношения ТКЛР материалов слоев:  $\alpha_1 - \alpha_2 \approx \alpha_3 - \alpha_4$  (рис. 4) вызывает при изменении температуры одинаковый по величине и знаку биметаллический прогиб обеих МП, обеспечивая кинематическое вычитание деформаций, но немного снижает диапазон перемещений.

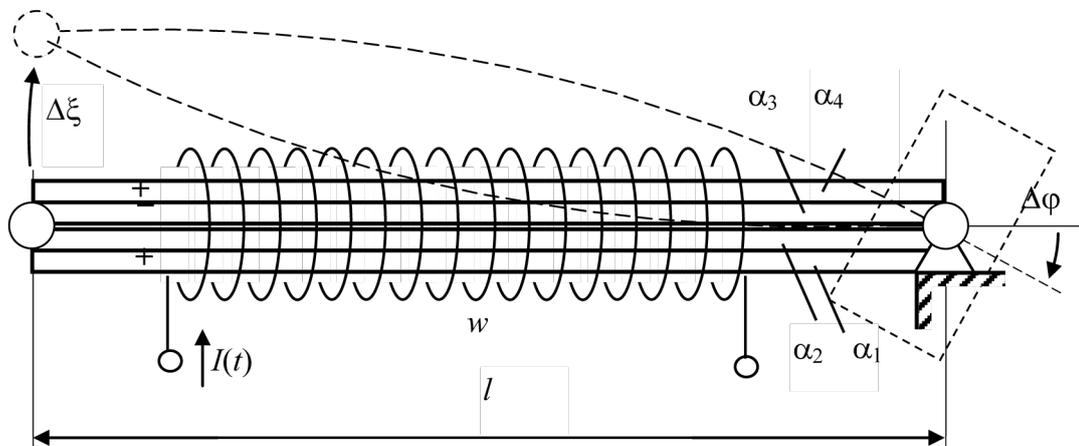


Рисунок 4. МСИУ с соединительным шарниром и двумя МП с кинематической компенсацией теплового прогиба

МП могут располагаться рядом в одной плоскости, с общим левым соединительным шарниром размером по ширине чуть более двух  $b$ . Поперечная протяженность шарнира вызывает снижение жесткости.

Нечетное управление перемещениями и кинематическую компенсацию биметаллического прогиба можно организовать в после-

довательной продольной схеме МСИУ (рис. 5), где связаны соединительным шарниром две одинаковые МП (из сплавов с максимальной  $\lambda$ ) с отдельными электромагнитными системами (в МП выполнены окна и уложены обмотки).

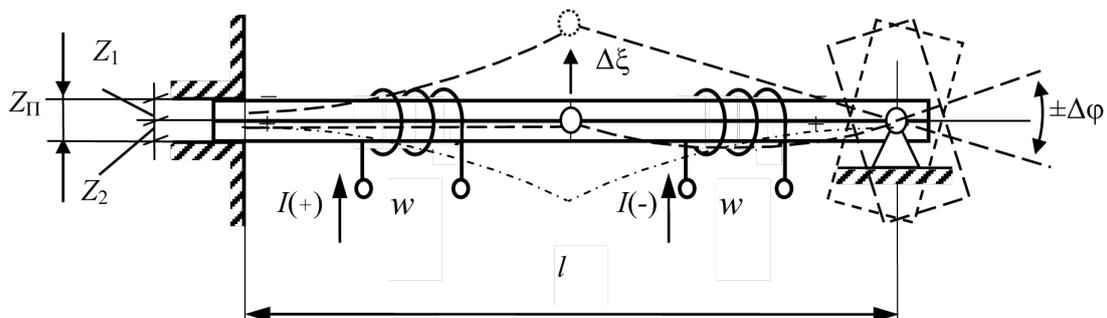


Рисунок 5. Схема МСИУ с двумя элементами с отдельным намагничиванием из МП обратно неоднородных продольно связанных соединительным шарниром

Механически последовательно связанные, активные элементы кинематически «работают» встречно. Объект поворачивается по часовой стрелке изменением тока  $I_{(+)}$  перемещением на  $\Delta\xi$  соединительного шарнира при изгибе левой МП, в другую сторону, за счет прогиба правой МП, – при изменении тока  $I_{(-)}$  (показаны пунктиром). Равный биметаллический прогиб обеих МП (показано штрихпунктиром) обеспечивает их кинематическое вычитание, не перемещая объект при изменении температуры. Диапазон  $\Delta\varphi \approx \pm 0,375(|\lambda_1|+|\lambda_2|)l/Z_{II}$  и быстродействие соответствуют МСИУ по рисунку 3.

Одинаковые МП расположены одна над другой с образованием пространства для укладки обмоток раздельных электромагнитных систем в схеме (рис. 6). Соединительный шарнир заменен подвижным с вертикальным звеном. Правый конец нижней МП закреплен на основании, а неподвижный шарнир, связанный с верхней МП (рис. 6) смещается вверх. Нечетные перемещения объекта диапазона  $\pm\Delta\varphi \approx 0,75(|\lambda_1|+|\lambda_2|)l/Z_{II}$  сочетаются с синхронным прогибом МП и вычитанием температурных деформаций. Быстродействие соответствует МСИУ по рисунку 4. МП можно располагать рядом в одной плоскости с общим соединительным шарниром.

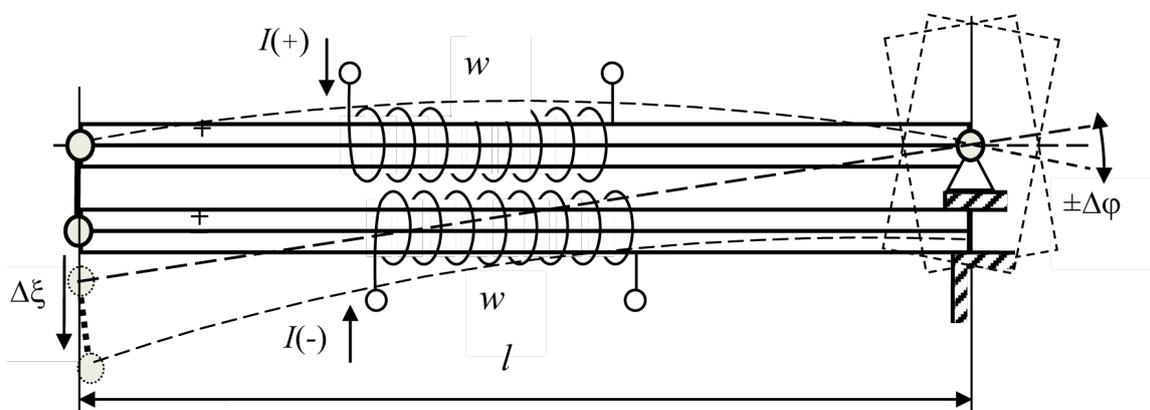


Рисунок 6. Двухэлементный МСИУ с подвижным шарниром и нечетным управлением

В вариантах последовательно-связанных ИУ необходима шарнирная установка объекта, что ограничивает точность и плавность перемещения. Увеличение количества последовательно-связанных МП возможно, но такое МСИУ следует отнести к приборному классу устройств.

К параллельно-связанной двухэлементной схеме МСИУ (рис. 7), где в отношении оси углового движения объекта обе МП включаются механически параллельно, приводит размещение в продольном направлении еще одного ИУ (по рис. 2) и объединение их ближних шарниров – балочной установки двухслойной МП на трех шарнирах. В левой и правой половинах МП сформированы раздельные электромагнитные системы. На поворотной части центрального шарнира закреплен объект. Нечетное управления ана-

логично МСИУ по рисунку 5. Половины МП работают встречно. Изгиб МП левой половины показан точками, а правой – пунктиром. Пассивные части МП – дополнительная упругая нагрузка. При неизменном значении критерия F (объема активного элемента) диапазон в два раза меньше ( $\pm\Delta\varphi \approx 0,187 (|\lambda_1|+|\lambda_2|)l/Z_{II}$ ), быстродействие вдвое больше (жесткость активного элемента выше в 4 раза), чем в ИУ по рисунку 2, и в этой схеме реализуется силовая компенсация перемещений  $\Delta\varphi_{\Theta}$ , создаваемых деформациями двух половин МП при изменении температуры [6].

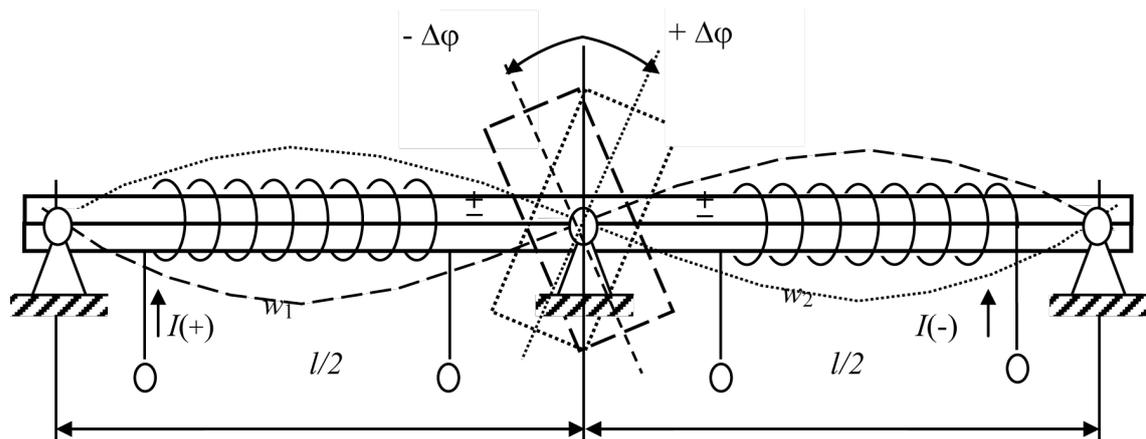


Рисунок 7. Параллельно-связанный МСИУ с установкой МП на трех шарнирах

Продольные габариты ИУ по рисунку 7 можно уменьшить вдвое, развернув половины с обмотками вокруг центрального шарнира (см. рис. 5), но объединение шарниров не происходит. МП можно расположить в одной плоскости, с отдельными левыми шарнирами и с общим правым. Поворотная

часть размером по ширине более двух  $b$  жестко связана с обеими МП.

Балочную параллельно-связанную схему МСИУ (рис. 8) образует продольно-неоднородная (с инверсным расположением слоев) МП.

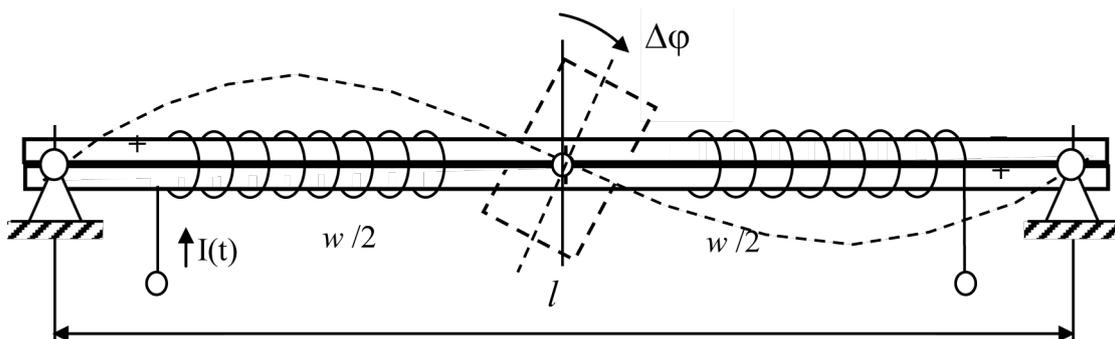


Рисунок 8. Параллельно-связанный МСИУ с балочной шарнирной установкой продольно-неоднородной МП

Перемещаемый объект закреплен в центре (месте соединения половин МП) [6], и удастся обойтись без шарнира. При намагничивании обе МП деформируются с разным знаком, но, параллельно работая, плавно поворачивают объект. Диапазон и быстродействие соответствуют ИУ по рисунку 6, но есть температурные перемещения  $\Delta\varphi_{\theta}$ , и движение объекта в одну сторону.

Параллельно-связанная четырехэлементная схема МСИУ, где обеспечивается силовая компенсация перемещений  $\Delta\varphi_{\theta}$ , четный вид характеристик ИУ и крепление объекта без шарнира [7], приведены на рисунке 9. Слои в МП расположены по окружности с чередованием в них попарно согласных и обратных знаков магнитострикции. Магнитные

системы образованы из половин МП (1а-2а) и (1б-2б) и магнитных «шунтов» (3а) и (3б) с обмотками  $w_{(+)}$  и  $w_{(-)}$ , которые могут располагаться и на шунтах 3, снижая инерционность системы МСИУ – нагрузка. Соединение двух одинаковых МП (длиной  $l$ ) в центре исключает перемещение объекта при встречном тепловом прогибе частей МП. Увеличение  $F$  при длине МП, равной  $l$ , и диапазоне перемещений МСИУ на уровне ИУ по рисунку 7 повышает быстродействие в корень из двух раз. При позиционировании ряда объектов [2] (поворотный предметный столик) такое МСИУ характеризуется хорошей несущей способностью и формоустойчивостью. Количество МП (значение критерия  $F$ ) можно увеличивать.

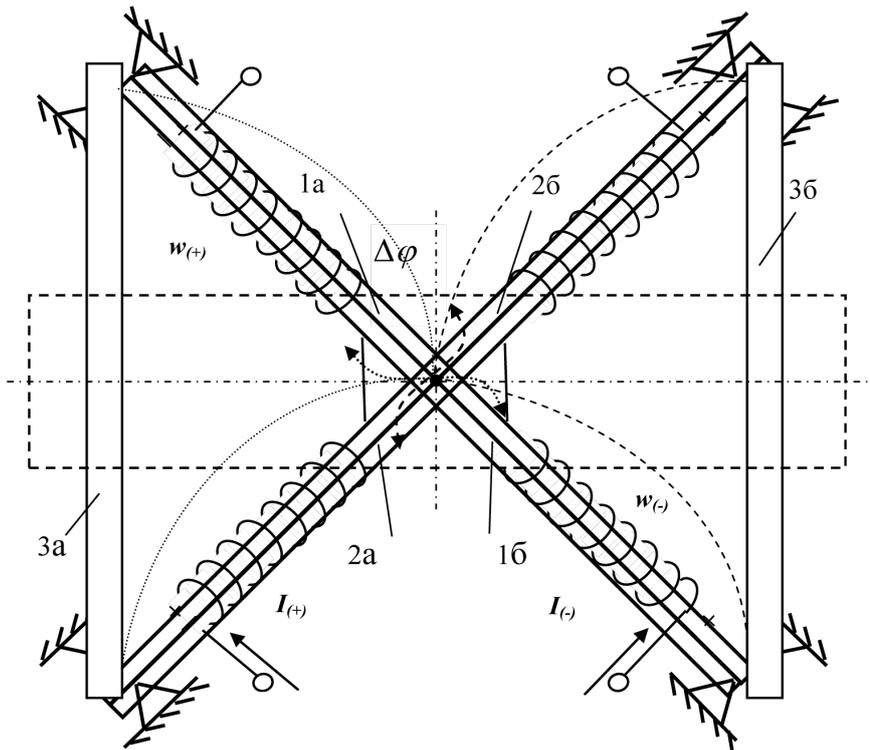


Рисунок 9. МСИУ с нечетным управлением и силовой компенсацией теплового прогиба

Перспективным представляется развитие МСИУ по рисункам 4 и 6 (при грамотном решении соединительного псевдосфероида) как многоэлементных последовательно-параллельных связанных схем.

Реализация предложенных МСИУ, обеспечение точности и стабильности эксплуатационных характеристик возможны с опорой на разработанное математическое описание [4, 6]. Модель МСИУ, как электромеханического преобразователя при учете изменений температуры, нелинейности электромагнитных и

магнитомеханических параметров, изменения упругих и магнитных свойств в слоях МП по толщине, позволяет рассчитать статические характеристики для ИУ по рисунку 9 (рис. 10) с одним активным слоем МП из пермендюра К49Ф2 (магнитострикция  $\lambda_1 \approx 70 \cdot 10^{-6}$ ) и размерами  $l=0,1$  м,  $b=0,01$  м,  $Z_{II}=0,001$  м, при комнатной температуре (кривая 1) и ее повышении на  $\Delta\Theta=60^\circ\text{C}$  (кривые 2-4).

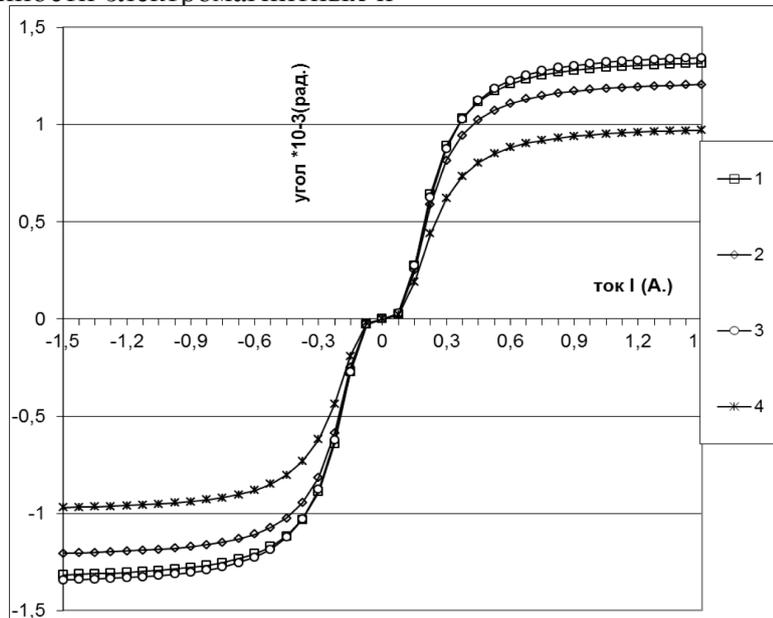


Рисунок 10. Статические характеристики МСИУ угловых перемещений по рисунку 9

Оценочный диапазон ИУ ( $\pm \Delta\varphi \approx 0,187\lambda_1 / Z_{11} = \pm 1,309 \cdot 10^{-3}$  рад) близок к полученному при моделировании (см. рис. 10). Выбор материала пассивного слоя со значением ТКЛР как и у пермендюра ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 9,2 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) или выше ( $\alpha_2 = 12,2 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) с увеличением температуры на  $\Delta\Theta = 60^\circ\text{C}$  приводит к снижению  $\Delta\varphi$  на 7-8 % (кривая 2) и на 20 % (кривая 4). А выбор ТКЛР ниже чем у пермендюра ( $\alpha_2 = 6,2 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) не вызывает при изменении температуры

заметного расхождения характеристик (кривые 1 и 3). В параллельно-связанных схемах реализуется силовая компенсация биметаллического прогиба и стабильность характеристик к изменению температуры.

Результаты анализа математического моделирования [4] позволяют искать другие варианты развития схемных решений МСИУ угловых перемещений с учетом возможности наведения предварительных постоянных или изменяемых упругих напряжений.

### Список литературы

1. Афонин С.М. Схемы пьезодвигателей нано- и микроперемещений для прецизионных электромеханических систем // Датчики и системы. – 2004. - № 9. – С. 2-5.
2. Цодиков С.Ф., Раховский В.И. Магнотриксционные силовые приводы для суперпрецизионного позиционирования // Измерительная техника. – 1997. - № 5. – С. 56-62.
3. Михайлов О.П., Рогачев Э.Б., Ивенский Ю.Н. и др. Электромагнитные и магнитные устройства в станкостроении. – М.: Машиностроение, 1974. – 184 с.
4. Грахов П. А., Федин А.В., Ясовеев В.Х. Характеристики устройств угловых перемещений на основе магнотриксционных пластин при действии предварительных упругих напряжений // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2015. – Т. 11. - № 4. – С. 107-114.
5. Никольский А.А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.
6. Грахов П.А., Федин А.В. Моделирование устройств угловых перемещений на основе магнотриксционных пластин с учетом упругих напряжений // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. - № 1. – С. 9-17.
7. Патент на изобретение № 2292611 РФ. Магнотриксционное устройство угловых перемещений и способ управления им / Грахов П.А., Федин А.В. – Опубл. 27.01.2007. Бюл. № 3.
8. Патент на полезную модель № 169443 РФ. Магнотриксционное устройство угло-

вых перемещений / Ясовеев В.Х., Грахов П.А., Федин А.В., Хайбуллин Х.М., Мухаметьянов И.Р. – Дата публикации 17.03.2017 г.

9. Патент на полезную модель № 181378 РФ. Магнотриксционное устройство угловых перемещений / Ясовеев В.Х., Грахов П.А., Федин А.В., Мухаметьянов И.Р., Хайбуллин Х.М. – Дата публикации 11.07.2018 г.

### References

1. Afonin S.M. Shemy p'jezodvigatelej nano- i mikroperemeshhenij dlja precizionnyh elektromehaničeskikh sistem // Datchiki i sistemy. – 2004. - № 9. – P. 2-5.
2. Codikov S.F., Rahovskij V.I. Magnotrikscionnyje silovye privody dlja superprecizionnogo pozicionirovanija // Izmeritel'naja tehnika. – 1997. - № 5. – P. 56-62.
3. Mihajlov O.P., Rogachev Je.B., Ivenskij Ju.N. i dr. Elektromagnitnyje i magnitnyje ustrojstva v stankostrojenii. – M.: Mashinostrojennje, 1974. – 184 p.
4. Grahov P.A., Fedin A.V., Jasovejev V.H. Harakteristiki ustrojstv uglovyh peremeshhenij na osnove magnotrikscionnyh plastin pri dejstvii predvaritel'nyh uprugih naprjazhenij // Elektrotehničeskije i informacionnyje kompleksy i sistemy. – 2015. – T. 11. - № 4. – P. 107-114.
5. Nikol'skij A.A. Točnyje dvuhkanal'nyje sledjashhije elektroprivody s p'ezokompensatorami. – M.: Energoatomizdat, 1988. – 160 p.
6. Grahov P.A., Fedin A.V. Modelirovanije ustrojstv uglovyh peremeshhenij na osnove magnotrikscionnyh plastin s učetom uprugih

naprjazhenij // Elektro-tehnicheskiye i informacionnyje kompleksy i sistemy. – 2013. – Т. 9. - № 1. – P. 9-17.

7. Patent na izobretenije № 2292611 RF. Magnitostrikcionnoje ustrojstvo uglovyh peremeshhenij i sposob upravlenija im / Grahov P.A., Fedin A.V. – Opubl. 27.01.2007. Bjul. № 3.

8. Patent na poleznuju model' № 169443 RF. Magnitostrikcionnoje ustrojstvo uglovyh peremeshhenij / Jasovejev V.H., Grahov P.A.,

Fedin A.V., Hajbullin H.M., Muhamet'janov I.R. – Data publikacii 17.03.2017 g.

9. Patent na poleznuju model' № 181378 RF. Magnitostrikcionnoje ustrojstvo uglovyh peremeshhenij / Jasovejev V.H., Grahov P.A., Fedin A.V., Muhamet'janov I.R., Hajbullin H.M. – Data publikacii 11.07.2018 g.



**Мухамадиев А.А.**  
**Mukhamadiev A.A.**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры информа-  
ционно-измерительной  
техники,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный  
авиационный  
технический университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Шайхутдинов И.И.**  
**Shaikhutdinov I.I.**  
генеральный директор  
АО «СибКом»  
г. Уфа  
Российская Федерация



**Ясовеев В.Х.**  
**Yasoveev V.Kh.**  
доктор технических наук,  
профессор,  
заведующий кафедрой  
информационно-измери-  
тельной техники,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный  
авиационный  
технический университет»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация

УДК 550.83

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-122-127

## АНАЛИЗ ПРИБОРНОЙ БАЗЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ФЛЮИДОВ

В работе рассматривается проблема разработки и совершенствования приборной базы для проведения геофизических исследований с целью повышения качества получаемой информации. Показано, что одним из важнейших геофизических исследований является изучение пластовых флюидов. Приведен анализ современного состояния разработок в области спектральных приборов для определения коллекторских свойств пластов. Показаны достоинства спектральных методов анализа сред различной природы. Выявлены и описаны основные достоинства инфракрасной (ИК) спектроскопии. Разработана структурная схема ИК спектрометра, описаны основные элементы и принцип действия. Предложено и научно обосновано применение акустооптического монохроматора. Описан разработанный монохроматор с электронным управлением, состоящий из акустооптического перестраиваемого фильтра, драйвера, соединительных кабелей и программного обеспечения. Представлена структурная схема и фотографии основных узлов монохроматора. Описан принцип действия акустооптического монохроматора. Результатом предложенных технических решений является создание портативных устройств с широким спектральным диапазоном, спектральным разрешением, значительным быстродействием, повышенной точности, чувствительности и пригодных для полевых условий.

**Ключевые слова:** флюиды, спектральный анализ, инфракрасная спектроскопия, акустооптический монохроматор, акустооптический перестраиваемый фильтр, оптический блок.

## ANALYSIS OF THE INSTRUMENTATION BASE FOR THE STUDY OF FLUIDS

The paper deals with the problem of developing and improving the instrumentation base for conducting geophysical surveys in order to improve the quality of the information received. It is shown that one of the most important geophysical studies is the study of reservoir fluids. The analysis of the current state of development in the field of spectral instruments for determining reservoir properties of the layers. The advantages of spectral methods for analyzing media of various nature are shown. The main advantages of infrared spectroscopy are identified and described. The structural scheme of the IR spectrometer has been developed, the main elements and the principle of operation have been described. The use of an acousto-optic monochromator is proposed and scientifically substantiated. An electronically controlled monochromator, consisting of a tunable acousto-optic filter, driver, connecting cables and software, is described. A block diagram and photographs of the main monochromator nodes are presented. The principle of action of an acousto-optic monochromator is described. The result of the proposed technical solutions is the creation of portable devices with a wide spectral range, spectral resolution, significant speed, increased accuracy, sensitivity and suitable for field conditions.

**Key words:** fluids, spectral analysis, infrared spectroscopy, acousto-optic monochromator, acousto-optic tunable filter, optical unit.

Ежегодно глубина бурения скважин наращивает метры проходки, что приводит не только к увеличению и повышению информативности промыслово-геофизических исследований, но и к усложнению реализации геофизических методов исследования скважин расширенного комплекса. Проблема разработки и совершенствования приборной базы для проведения геофизических исследований является весьма актуальной, так как приводит к повышению качества получаемой информации, а следовательно, имеет большой экономический эффект.

Одним из важнейших геофизических исследований является изучение пластовых флюидов. Для исследования их характеристик применяются различные методы и приборы. В основном все они требуют извлечение проб из скважины для последующего их исследования на поверхности. В условиях, когда происходит значительное повышение глубины и сложности профиля скважин, отбор проб и их доставка являются весьма затратными. В связи с этим задача разработки и совершенствования приборов для проведения геофизических исследований непосредственно в скважине является весьма актуальной. В данной работе проводится анализ современного состояния разработок в области спектральных приборов для определения коллекторских свойств пластов.

Приборы разрабатываются для получения высококачественных представительных проб пластовых флюидов. Метод опробования пластов позволяет получать ключевую петрофизическую информацию для определения объема залежи, продуктивности пласта, типа и состава подвижных флюидов и предсказания поведения залежи при ее разработке.

В последнее время широкое распространение получили спектральные методы анализа сред различной природы. Спектральный анализ – это физический метод определения состава вещества, основанный на изучении спектров испускания, поглощения, отражения и люминесценции. Атомы каждого элемента испускают излучение с определенной длиной волны, что, в свою очередь, позволяет определить, какие элементы входят в состав данного вещества. Спектры определяются свойствами электронных оболочек атомов и молекул и воздействием структуры и массы атомных ядер на положение энергетических уровней. В результате приборы спектрального типа исследуют излучение от объекта исследования как сигнал, обладающий определенной информацией, описывающей его свойства и характеристики.

Различают атомный и молекулярный спектральный анализ, задачи которых состоят в определении состава вещества. Учитывая, что такие химические соединения, как  $H_2O$ ,

$\text{CH}_4$ , сырая нефть имеют легко узнаваемый отклик при инфракрасном воздействии, то наиболее подходящим является применение инфракрасной спектроскопии, входящей в молекулярный спектральный анализ.

Инфракрасный молекулярный спектральный анализ позволяет исследовать молекулярные спектры, потому что в инфракрасной области располагаются основные колебательные и вращательные спектры молекул. В результате анализа исследуются инфракрасные спектры поглощения и излучения. При воздействии инфракрасного излучения на вещество происходит его поглощение на определенных частотах, которые совпадают с рядом собственных колебательных и вращательных частот микрочастиц или с колеба-

тельными частотами самой кристаллической решётки, что приводит к падению интенсивности инфракрасного излучения и образованию полос поглощения.

Взаимосвязь между интенсивностью излучения, проходящего через исследуемое вещество, и длиной волны и другими величинами, которые характеризуют вещество его поглощающее, описывается обобщённым законом Бугера – Ламберта – Бера [1, 2].

В общем случае, структурная схема ИК спектрометра представляет собой следующий вид (см. рис. 1).

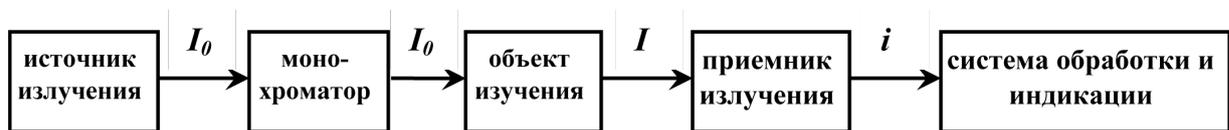
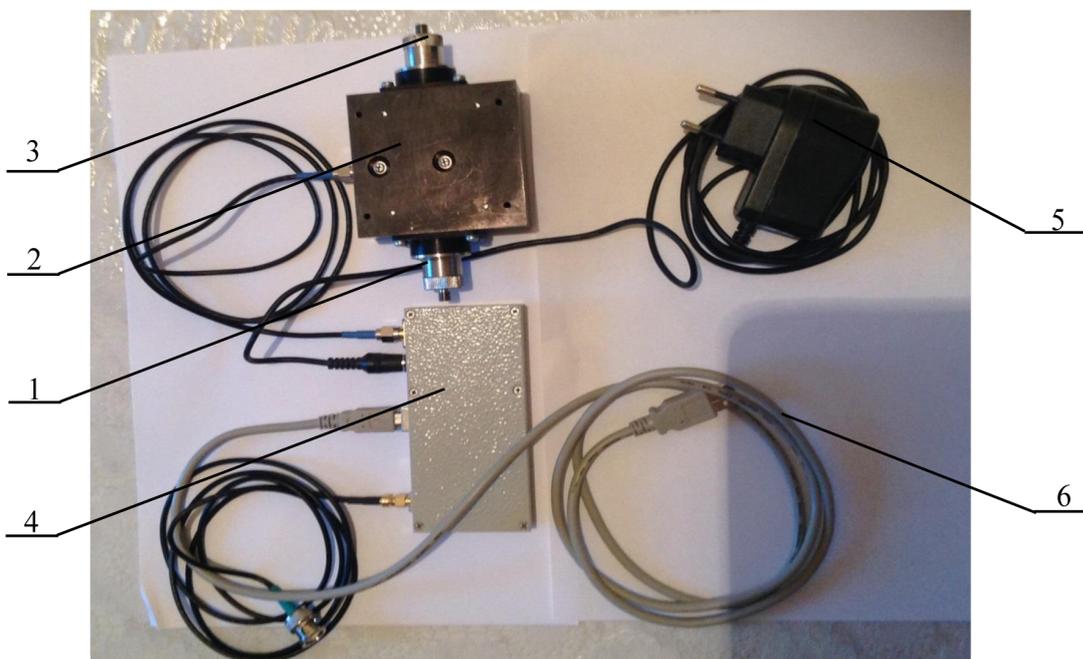


Рисунок 1. Структурная схема ИК спектрометра

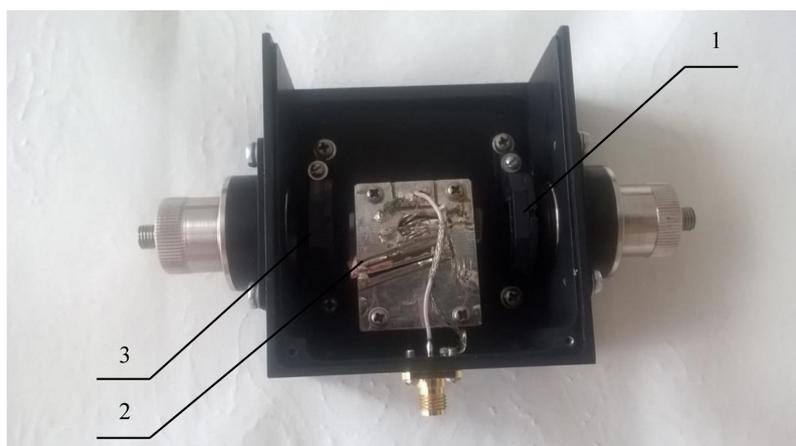
Ключевым элементом, обеспечивающим характеристики спектрометра, является монохроматор. Монохроматор представляет собой прибор, предназначенный для выделения монохроматического излучения с очень маленьким разбросом частот, а в идеале – с одной частотой (длиной волны). Монохроматор выделяет узкие интервалы длин волн из спектра оптического излучения. Конструктивно монохроматор состоит из набора оптических и механических элементов, а возможность сканирования спектра обеспечивается путём поворота диспергирующего элемента с помощью специального передаточного механизма. Однако большое количество оптико-механических элементов значительно усложняет конструкцию, снижает качество управления и ухудшает технические характеристики устройства. Дальнейшее совершенствование монохроматора не позволяет на известных принципах построения значительно улучшить его характеристики, поэтому для выполнения предназначенных функций предлагается использовать акустооптический эффект, а именно, заменить традиционные оптико-механические на акустооптические элементы. Преимуществом акустооптических элемен-

тов является отсутствие механически движущихся элементов, высокое быстродействие, высокая надежность, хорошая чувствительность, высокая точность, универсальность, селективность, малые габаритные размеры [3].

Использование акустооптического монохроматора (АОМХ) позволит выделять из широкого спектрального диапазона электромагнитного излучения узкую линию, длина волны и интенсивность которой изменяются в соответствии с электронным управляющим сигналом (рис. 2-4). Одним из важнейших составляющих АОМХ является драйвер, обеспечивающий электронное управление.



**Рисунок 2.** Акустооптический монохроматор:  
 1 – входной оптический разъем монохроматора; 2 – акустооптический перестраиваемый фильтр с входным и выходным поляризатором; 3 – выходной оптический разъем монохроматора;  
 4 – драйвер акустического сигнала; 5 – блок питания; 6 – соединительные кабели



**Рисунок 3.** Акустооптический перестраиваемый фильтр с входным и выходным поляризатором: 1 – входной поляризатор; 2 – акустооптический перестраиваемый фильтр (АОПФ); 3 – выходной поляризаторы



**Рисунок 4.** Драйвер акустического сигнала

Принцип действия монохроматора следующий. Переменное электрическое поле (управляющий сигнал), приложенное к пьезопреобразователю, возбуждает акустическую волну, которая распространяется в призме из  $\text{TeO}_2$ , вызывая периодические возмущения показателя преломления, т.е. создавая в среде фазовую дифракционную решетку. На этой решетке происходит дифракция света, распространяющегося в кристалле под определенным углом и имеющего определенное состояние поляризации, формируемое входным поляризатором. В результате дифракции поляризация световой волны меняется на ортогональную, так что на выходе кристалла продифрагировавший и непродифрагировавший пучки расходятся на угол не менее  $6,4^\circ$  (величина угла зависит от длины волны фильтруемого излучения), при этом продифрагировавший пучок распространяется по траектории падающего, а непродифрагировавший отклоняется в сторону. Конструкция такова, что падающий плоскополяризованный световой пучок ортогонален входной грани кристалла  $\text{TeO}_2$ , а плоскость его поляризации ортогональна основанию корпуса оптического блока АОМХ, именно для такой геометрии обеспечивается режим большой угловой апертуры. Плоскости поляризации входного и выходного поляризаторов установлены ортогонально. Следовательно, выходной поляризатор пропускает продифрагировавший пучок и блокирует непродифрагировавший. Драйвер имеет возможность перестройки на произвольный шаг в рабочем частотном диапазоне. Перестройка длины волны пропускания АОПФ осуществляется изменением частоты управляющего электрического сигнала. Связь длины волны и частоты определяется выражением

$$f = K_1 \times \Delta n / \lambda, \quad (1)$$

где  $K_1 = 6,17286 \times 10^5$  МГц×нм;

### Список литературы

1. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия: основы, техника, аналитическое применение. – М.: Мир, 1982. – 328 с.
2. Отто М. Современные методы аналитической химии / пер. с нем. под ред. А.В. Гармаша. – М.: Техносфера, 2006. – 416 с.

$\Delta n = (n_e - n_o)$ ,  $n_e$ ,  $n_o$  – показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей, соответственно, для кристаллического  $\text{TeO}_2$  [4].

Проведя анализ различных методов спектрометрии и устройств на их основе, можно отметить те или иные достоинства и недостатки. В таблице 1 проведены сравнительные характеристики спектрометров, основанных на различных принципах действия.

Применение акустооптической спектрометрии для решения задач оперативного анализа среды является относительно молодым и очень перспективным направлением. Информация о существующих акустооптических устройствах, опубликованная в научнотехнической литературе и периодических изданиях, носит образно-абстрактный характер, сами же они направлены на решение общих задач. Нет четкой функциональной направленности для решения конкретных проблем, не обобщены технические решения построения, принципы проектирования, не описаны конструктивные и функциональные возможности. Отсутствие экспериментальных и теоретических исследований не позволяет проектировать с заданными характеристиками и интегрировать их в уже существующие.

Таким образом, основные пути улучшения характеристик – создание портативных устройств с широким спектральным диапазоном, спектральным разрешением, значительным быстродействием, повышенной точности, чувствительности и пригодности для полевых условий. Все эти обстоятельства делают актуальными необходимость решения данных вопросов и создания приборов, обладающих улучшенными характеристиками, на что и направлена данная работа.

3. Мухамадиев А.А., Солодовников А.В. Спектральный акустооптический метод анализа и его аппаратная реализация. // Мировое сообщество: проблемы и пути решения: Сб. науч. ст. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2006. - № 19112. <http://ntcup.ru>. – 272.

4. Мухамадиев А.А., Фаррахов Р.Г. Калибровка акустооптического монохрома-

тора с электронным управлением // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016. – Т. 12. - № 2. – С. 75-79.

### References

1. Smit A. Prikladnaja IK-spektroskopija: osnovy, tehnika, analiticheskoje primenenije. – M.: Mir, 1982. – 328 p.
2. Otto M. Sovremennyye metody analiticheskoj himii / per. s nem. pod red. A.V. Garmasha. – M.: Tehnosfera, 2006. – 416 p.
3. Muhamadiev A.A., Solodovnikov A.V. Spektral'nyj akustoopticheskij metod analiza i jego apparatnaja realizacija. // Mirovoje soobshhestvo: problemy i puti reshenija: Sb. nauch. st. – Ufa: Izd-vo UGNTU, 2006. - № 19112. <http://ntcup.ru>. – 272.
4. Muhamadiev A.A., Farrahov R.G. Kalibrovka akustoopticheskogo monohromatora s elektronnyim upravlenijem // Elektrotehnicheskije i informacionnyje komplekxy i sistemy. – 2016. – Т. 12. - № 2. – P. 75-79.

---

## ОБ АВТОРАХ

### **Азнагулов Айнур Иршатович**

аспирант кафедры «Электрические машины и электрооборудование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: shamilsiraev@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Андреева Елена Григорьевна**

доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», e-mail: lenandr02@yandex.ru, г. Омск, Российская Федерация

### **Ахмеджанов Фарит Маратович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и сервис в технических науках», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: farakhm@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Вавилов Вячеслав Евгеньевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: s2\_88@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Веселов Алексей Михайлович**

магистрант кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: s2\_88@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Габитов Салих Азатович**

магистрант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: koledinakamila@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Герасимов Вячеслав Евгеньевич**

аспирант, кафедра «Электроэнергетика» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», e-mail: alextmn86@mail.ru, г. Тюмень, Российская Федерация

### **Гиниятуллин Вахит Мансурович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: fentazer@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Грахов Павел Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: walther@inbox.ru, г. Уфа, Российская Федерация

---

**Губайдуллин Ирек Марсович**

доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории математической химии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтехимии и катализа Российской академии наук, e-mail: irekmars@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Дмитриев Алексей Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт, строительные и дорожные машины», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», e-mail: alextmn86@mail.ru, г. Тюмень, Российская Федерация

**Зайцева Алина Александровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: jenekap41@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Зиганшин Тимур Рахимович**

аспирант кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: timurz2009@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Ивашкин Олег Николаевич**

электромонтёр по ремонту и обслуживанию электрооборудования, ООО «Газпром добыча Ямбург», Газопромысловое управление, e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru, г. Новый Уренгой, Российская Федерация

**Исмагилов Флюр Рашитович**

доктор технических наук, профессор, завдующий кафедрой «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: elm.ugatu@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

**Коледин Сергей Николаевич**

старший преподаватель кафедры «Математика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: koledinakamila@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Коледина Камила Феликсовна**

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории математической химии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение Институт нефтехимии и катализа Российской академии наук, e-mail: koledinakamila@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Копытов Сергей Михайлович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», e-mail: skopytov@mail.ru, г. Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация

**Крымский Виктор Григорьевич**

доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и сервис в технических системах», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: vikrmysky@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

---

**Линенко Андрей Владимирович**

доктор технических наук, профессор, декан энергетического факультета, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: [linenko-bsau@ya.ru](mailto:linenko-bsau@ya.ru), г. Уфа, Российская Федерация

**Лихачев Евгений Александрович**

старший преподаватель кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: [jenekap41@mail.ru](mailto:jenekap41@mail.ru), г. Уфа, Российская Федерация

**Лукьянов Валерий Владимирович**

аспирант кафедры «Электрические машины и электрооборудование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: [shamilsiraev@yandex.ru](mailto:shamilsiraev@yandex.ru), г. Уфа, Российская Федерация

**Мельникова Дарья Александровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет», e-mail: [melnikovada1988@mail.ru](mailto:melnikovada1988@mail.ru), г. Самара, Российская Федерация

**Минияров Айбулат Халяфович**

аспирант кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: [s2\\_88@mail.ru](mailto:s2_88@mail.ru), г. Уфа, Российская Федерация

**Муллаянова Алина Фиратовна**

аспирант лаборатории математической химии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтехимии и катализа Российской академии наук, e-mail: [irekmars@mail.ru](mailto:irekmars@mail.ru), г. Уфа, Российская Федерация

**Муратова Вера Владимировна**

старший преподаватель кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет», e-mail: [muratova1991@yandex.ru](mailto:muratova1991@yandex.ru), г. Самара, Российская Федерация

**Муфтахов Тимур Ильдарович**

студент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: [fentazer@mail.ru](mailto:fentazer@mail.ru), г. Уфа, Российская Федерация

**Мухамадиев Айдар Асхатович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: [aidar80@mail.ru](mailto:aidar80@mail.ru), г. Уфа, Российская Федерация

**Осипов Владимир Петрович**

кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, отдел № 16 «Проблемы математического моделирования и высокопроизводительных вычислений», Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт

---

прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, e-mail: osipov@keldysh.ru, г. Москва, Российская Федерация

**Пашкин Василий Валериевич**

инженер-энергетик, ООО «Газпром добыча Ямбург», Газопромысловое управление, e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru, г. Новый Уренгой, Российская Федерация

**Плосков Алексей Николаевич**

инженер-проектировщик электротехнического отдела, АО «НИПИГАЗ», alextmn86@mail.ru, г. Тюмень, Российская Федерация

**Посадский Алексей Игоревич**

кандидат технических наук, руководитель автоматизации ООО «Юнэкт ЮНИОН», e-mail: sivakova15@mail.ru, г. Москва, Российская Федерация

**Саттаров Роберт Радикович**

доктор технических наук, профессор кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: timurz2009@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Семина Ирина Александровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», e-mail: lenandr02@yandex.ru, г. Омск, Российская Федерация

**Сивакова Татьяна Владимировна**

научный сотрудник, отдел № 16 «Проблемы математического моделирования и высокопроизводительных вычислений», Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, e-mail: sivakova15@mail.ru, г. Москва, Российская Федерация

**Сираев Шамил Флюрович**

старший преподаватель кафедры «Электроснабжение и применение электрической энергии в сельском хозяйстве», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: shamilsiraev@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Судаков Владимир Анатольевич**

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, отдел № 16 «Проблемы математического моделирования и высокопроизводительных вычислений», Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, e-mail: sivakova15@mail.ru, г. Москва, Российская Федерация

**Тимофеев Александр Олегович**

аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: aleck07@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Ульянов Александр Владимирович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

---

«Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация

**Уразбахтин Руслан Рустемович**

студент кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: s2\_88@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Федин Андрей Владимирович**

аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: walther@inbox.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Шабанов Виталий Алексеевич**

кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Шайхутдинов Ильшат Ирекович**

генеральный директор АО «СибКом», e-mail: yasov@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Ярославкина Екатерина Евгеньевна**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет», e-mail: k0046979@yandex.ru, г. Самара, Российская Федерация

**Ясовеев Васих Хаматович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: yasov@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

---

## ABOUT THE AUTHORS

### **Akhmedzhanov Farit M.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Management and Service of the Technical Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: farakhm@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

### **Andreeva Elena G.**

Dr. Sci. Tech., Professor of Electrical Engineering Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Omsk state technical university», e-mail: lenandr02@yandex.ru, Omsk, Russian Federation

### **Aznagulov Aynur I.**

Post-Graduate Student of Electrical Machinery and Electrical Equipment Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», e-mail: shamilsiraev@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

### **Dmitriev Alexey A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Road Transport, Construction and Road Machines Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tyumen Industrial University», e-mail: s2\_88@mail.ru, Tyumen, Russian Federation

### **Fedin Andrey V.**

Postgraduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: walther@inbox.ru, Ufa, Russian Federation

### **Gabitov Salih A.**

Undergraduate, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: koledinakamila@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Gerasimov Vyacheslav E.**

Post-Graduate Student of Power Industry, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tyumen Industrial University», e-mail: s2\_88@mail.ru, Tyumen, Russian Federation

### **Giniyatullin Vakhit M.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Computer Science and Engineering Cybernetics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: fentazer@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Grakhov Pavel A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Theoretical Foundations of Electrical Engineering Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: walther@inbox.ru, Ufa, Russian Federation

### **Gubaydullin Irek M.**

Dr. Sci. Phys.-Math., Assistant Professor, Senior Researcher of Laboratory «Mathematical chemistry», Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Petrochemistry and Catalysis, Russian Academy of Sciences, e-mail: irekmars@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Ismagilov Flur R.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Head Chair of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: elm.ugatu@gmail.com, Ufa, Russian Federation

### **Ivashkin Oleg N.**

Electrician for Repair and Maintenance of Electrical Equipment, LLC «Gazprom Dobycha Yamburg», Gas Field Directorate, e-mail: shabanovval@mail.ru, Novyy Urengoy,

---

Russian Federation

**Koledin Sergey N.**

Senior Lecturer of Mathematics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: koledinakamila@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Koledina Kamila F.**

Cand. Sci. Phys.-Math., Researcher of Laboratory «Mathematical Chemistry», Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Petrochemistry and Catalysis Russian Academy of Sciences, e-mail: koledinakamila@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Kopytov Sergey M.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Industrial Electronics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Komsomolsk-na-Amure state university», e-mail: skopytov@mail.ru, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation

**Krymsky Viktor G.**

Dr. Sci. Tech., Professor of Management and Service in the Technical Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: vikrymsky@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Likhachev Evgeniy A.**

Senior Lecturer of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: jenekap41@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Linenko Andrey V.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Dean of the Faculty of Energy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», e-mail: linenko-bsau@ya.ru, Ufa, Russian Federation

**Lukyanov Valery V.**

Post-Graduate Student of Electrical Machinery and Electrical Equipment Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», e-mail: shamilsiraev@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

**Melnikova Darya A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Automation and Process Control Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Samara State Technical University», e-mail: melnikovada1988@mail.ru, Samara, Russian Federation

**Miniyarov Aibulat Kh.**

Post-Graduate Student of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: s2\_88@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Muftakhov Timur I.**

Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: fentazer@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Mukhamadiev Aydar A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: aidar80@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Mullayanova Alina F.**

Post-Graduate Student of Laboratory «Mathematical chemistry», Federal State Budgetary

---

Institution of Science Institute of Petrochemistry and Catalysis, Russian Academy of Sciences, e-mail: irekmars@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Muratova Vera V.**

Senior Lecturer, of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Samara State Technical University», e-mail: muratova1991@yandex.ru, Samara, Russian Federation

**Osipov Vladimir P.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor, Leading Researcher, Department № 16 «Problems of Mathematical Modeling and High-performance Computing», Federal State Budgetary Institution of Science «Institute of Applied Mathematics of the M.V. Keldysh» Russian Academy of Sciences, e-mail: osipov@keldysh.ru, Moscow, Russian Federation

**Pashkin Vasilij V.**

Power Engineer, LLC «Gazprom Dobycha Yamburg», Gas Field Directorate, e-mail: shabanovva1@mail.ru, Novyy Urengoy, Russian Federation

**Ploskov Alexey N.**

Design Engineer of The Electrical Department, JSC "NIPIGAZ", e-mail: s2\_88@mail.ru, Tyumen, Russian Federation

**Posadsky Alexey I.**

Cand. Sci. Tech., Head of Automation LLC «YUNEKT UNION», e-mail: sivakova15@mail.ru, Moscow, Russian Federation

**Sattarov Robert R.**

Dr. Sci. Tech., Professor of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: timurz2009@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

**Semina Irina A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electrical Engineering Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Omsk state technical university», e-mail: lenandr02@yandex.ru, Omsk, Russian Federation

**Shabanov Vitaliy A.**

Cand. Sci. Tech., Professor, Head of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: shabanovva1@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Shaikhutdinov Ilshat I.**

General Director of JSC «SibCom», e-mail: yasov@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Siraev Shamil F.**

Senior Lecturer of Power Supply and Use of Electrical Energy in Agriculture Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», e-mail: shamilsiraev@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

**Sivakova Tatiana V.**

Researcher, Department № 16 «Problems of Mathematical Modeling and High-performance Computing», Federal State Budgetary Institution of Science «Institute of Applied Mathematics of the M.V. Keldysh» Russian Academy of Sciences, e-mail: sivakova15@mail.ru, Moscow, Russian Federation

**Sudakov Vladimir A.**

Dr. Sci. Tech., Assistant Professor, Leading Researcher, Department № 16 «Problems of Mathematical Modeling and High-performance Computing», Federal State Budgetary Institution

---

of Science «Institute of Applied Mathematics of the M.V. Keldysh» Russian Academy of Sciences, e-mail: sivakova15@mail.ru, Moscow, Russian Federation

**Timofeev Aleksandr O.**

Post-Graduate Student of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: aleck07@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Ulianov Aleksandr V.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Industrial Electronics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Komsomolsk-na-Amure state university», e-mail: skopytov@mail.ru, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation

**Urazbakhtin Ruslan R.**

Student of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: s2\_88@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Vavilov Vyacheslav Ye.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: s2\_88@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Veselov Aleksey M.**

Undergraduate of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: s2\_88@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Yaroslavkina Ekaterina E.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor, Head of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Samara State Technical University», e-mail: k0046979@yandex.ru, Samara, Russian Federation

**Yasoveev Vasikh Kh.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: yasov@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Zajceva Alina A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: jenekap41@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Ziganshin Timur R.**

Post-Graduate Student of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: timurz2009@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

---

## **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: uop-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.**