

# Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 2, т. 19, 2023

# Electrical and data processing facilities and systems

№ 2, т. 19, 2023

Подписной индекс ПБ092 в каталоге «Почта России».

Научные специальности, по которым ведется прием статей в научный журнал  
«Электротехнические и информационные комплексы и системы»:

- 2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки),
- 2.2.6. Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (технические науки),
- 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки),
- 2.3.2. Вычислительные системы и их элементы (технические науки),
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)
- 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника (технические науки),
- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки).



# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

**№ 2, т. 19, 2023**

---

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

**Учредитель**

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

Международный стандартный сериальный номер ISSN 1999-5458

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)

---

**Журнал включен:**

- в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ);
- 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.

Подписка оформляется через АО «Почта России». Подписной индекс ПБ092.

---

Адрес редакции и издательства:  
450064, Республика Башкортостан,  
г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1  
Тел.: (347) 242-07-59, ies.rusoil.net

Свободная цена. **12+**

Дата выхода в свет: 18.07.2023 г. Формат 60×84/8.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 22,09.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 96.

Адрес типографии: 450064, 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.

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

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

## Редакционная коллегия:

### Главный редактор:

Хакимьянов Марат Ильгизович — д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



### Зам. главного редактора:

Хазиева Р.Т. — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



### Члены редакционной коллегии:

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

Вахеда А. — Ph. D, профессор, Иранский университет науки и технологий (г. Тегеран, Исламская Республика Иран)



Глазырин А.С. — д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, Российская Федерация)



Григорьев М.А. — д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (г. Челябинск, Российская Федерация)



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



Зицмане И. — д-р техн. наук, профессор, Рижский технический университет, эксперт научного совета Латвийской академии наук (г. Рига, Латвия)



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



Кушнир В.Г. — д-р техн. наук, профессор, Костанайский региональный университет имени Ахмета Байтурсынова (г. Костанай, Республика Казахстан)



Лингфей К. — Ph. D, профессор, Нанкинский университет авиации и аэронавтики (г. Нанкин, Китайская Народная Республика)



Метельков В.П. — д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург, Российская Федерация)



Николаев А.А. — канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (г. Магнитогорск, Российская Федерация)



Павлов С.В. — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (г. Уфа, Российская Федерация)



Петроченков А.Б. — д-р техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (г. Пермь, Российская Федерация)



Саттаров Р.Р. — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (г. Уфа, Российская Федерация)



Сафин Р.Р. — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)» (г. Москва, Российская Федерация)



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



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



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



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



Ответственный секретарь: П. И. Васильев  
Технический редактор: С. В. Халитова

# ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

**№ 2, v. 19, 2023**

---

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» (FSBEI HE «USPTU»)

International standard serial number  
ISSN 1999-5458

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

---

**The journal is included:**

- in Russian Index of Scientific Citing (RISC);
- in the «List of peer-reviewed scientific publications, which should be published basic scientific results of theses on competition of a scientific degree of candidate of sciences, on competition of a scientific degree of the doctor of sciences».

Subscription through Russian Post. Subscription Index ПБ092.

---

Address of Editors office and Founder:  
450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.  
Tel. (347) 242-07-59, ies.rusoil.net

Price is free. **12+**

Date of publication 18.07.2023. Paper format 60×84/8.  
Offset printing. 22,09 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 96.

Address of Publishing Office:  
450064, 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 journal «Electrical and Data Processing Facilities and Systems».

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

Replicated in the printing office of the USPTU publishing house from electronic files.

## Editorial board:

### Editor-in-chief:

Marat I. Khakimyanov — Dr. Sci. Tech.,  
Associate Professor,  
FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological  
University» (Ufa, Russian Federation)



### Deputy editor-in-chief:

Khazieva R.T. — Cand. Sci. Tech.,  
Associate Professor,  
FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological  
University» (Ufa, Russian Federation)



### Members of editorial board:

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



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



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



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



Glazyrin A.S. — Dr. Sci. Tech., Professor,  
FSAEI HE «National Research Tomsk Polytechnic University» (Tomsk, Russian Federation)



Grigorev M.A. — Dr. Sci. Tech., Professor,  
FSAEI HE «South Ural State University» (Chelyabinsk, Russian Federation)



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



Kushnir V.G. — Dr. Sci. Tech., Professor,  
Akhmet Baitursynov Kostanay Regional University (Kostanay, Kazakhstan)



Lingfei X. — Ph. D., Professor, Nanjing University Aeronautics and Astronautics  
(Nanjing, Chinese People's Republic)



Metelkov V.P. — Dr. Sci. Tech., Professor, FSAEI HE «Ural Federal University  
named after the first President of Russian Federation B.N. Yeltsin» (Yekaterinburg, Russian Federation)



Nikolaev A.A. — Cand. Sci. Tech., Associate Professor,  
FSBEI HE «Nosov Magnitogorsk State Technical University» (Magnitogorsk, Russian Federation)



Pavlov S.V. — Dr. Sci. Tech., Professor,  
FSBEI HE «Ufa University of Science and Technology» (Ufa, Russian Federation)



Petrochenkov A.B. — Dr. Sci. Tech., Professor,  
FSBEI HE «Perm National Research Polytechnic University» (Perm, Russian Federation)



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



Safin R.R. — D. Sci. Tech., Professor, FSBEI HE «Russian Biotechnological University»  
(Moscow, Russian Federation)



Sattarov R.R. — Dr. Sci. Tech., Professor,  
FSBEI HE «Ufa University of Science and Technology» (Ufa, Russian Federation)



Urakseev M.A. — Dr. Sci. Tech., Professor,  
FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)



Vahedi A. — Ph. D., Professor, Iran University of Science & Technology  
(Tehran, Islamic Republic of Iran)



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



**Assistant editor:** P. I. Vasiliev  
**Technical editor:** S. V. Khalitova

---

# СОДЕРЖАНИЕ

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Гизатуллин Ф. А., Габидуллина З. Г., Лобанов А. В.</i> Резонансные явления в системах зажигания авиационных двигателей	7
<i>Юдинцев А. Г., Дмитриев В. М., Ганджа Т. В., Шурыгин Ю. А.</i> Алгоритм определения параметров регулятора, удовлетворяющих требованиям переходного процесса в понижающем преобразователе постоянного напряжения	16
<i>Глазырин А. С., Кладиев С. Н., Тимошкин В. В., Боловин Е. В., Козлова Л. Е., Набунский И. А., Раков И. В., Попов С. С.</i> Настройка и исследование режимов работы наблюдателя угловой частоты вращения регулируемого электропривода постоянного тока	30
<i>Демин А. Ю., Пашали Д. Ю., Юшкова О. А.</i> Токовихревой способ выявления дефектов многослойных крупногабаритных изделий	43
<i>Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е., Месропян А. В., Гарипов И. Р., Пронин Е. А.</i> Параметризация вентиляторного узла внешней системы охлаждения электродвигателя	51
<i>Королев В. И.</i> Методы прогнозного мониторинга технического состояния электрических машин	62
<i>Купцов Д. В., Хазиева Р. Т.</i> Анализ схемотехнических решений и способов повышения энергетической эффективности зарядных устройств	73
<i>Овчинников А. В., Новикова К. О., Фетисов В. С.</i> Подзарядка беспилотных летательных аппаратов с вертикальным взлетом-посадкой на контактных платформах с адаптируемой шириной контактных полос	80
<i>Сираев Ф. Ф., Хазиева Р. Т.</i> Использование широтно-импульсной модуляции для управления резонансным инвертором	90
<i>Сорокин А. В., Шабанов В. А.</i> Двухсторонний метод определения места однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью	98
<i>Стыскин А. В., Рогинская Л. Э., Янгиров И. Ф., Горбунов А. С., Каримов Р. Д., Максудов Д. В.</i> Разработка методики расчета параметрических трансформаторов	110
<i>Шабанов В. А., Степанова В. Д.</i> Графоаналитическое исследование режимов однофазного замыкания на землю	123

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Беляев А. С., Филипас А. А.</i> Исследование работы системы опорного обезвешивания на примере математического и натурального моделирования	135
<i>Соловьев Б. А., Гамисония Г. К., Саъдулов Р. Ш.</i> Технологии автоматизации как ключевой компонент пути развития производства Индустрии 4. 0	145
<i>Филипченко А. С.</i> Классификация специализированных вычислительных систем на транспорте	159
<i>Шулаева Е. А., Данилов В. И.</i> Разработка образовательного приложения, моделирующего процессы промышленного производства в игровом двигателе UNITY 3D PERSONAL	170
<b>Об авторах</b>	181

---

# Content

## ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Gizatullin F. A., Gabidullina Z. G., Lobanov A. V.</i> Resonance phenomena in aircraft engine ignition systems	7
<i>Yudintsev A. G., Dmitriev V. M., Gandzha T. V., Shurygin Yu. A.</i> Algorithm for determining the regulator parameters meeting the requirements of the transient process in a step-down DC voltage converter	16
<i>Glazyrin A. S., Kladiev S. N., Timoshkin V. V., Bolovin E. V., Kozlova L. E., Nabunskiy I. A., Rakov I. V., Popov S. S.</i> Setup and investigation of the operation modes of the speed observer in a controlled DC electric drive	30
<i>Demin A. Yu., Pashali D. Yu., Yushkova O. A.</i> Eddy current method for defect detecting in multilayer large-scale objects	43
<i>Ismagilov F. R., Vavilov V. E., Mesropyan A. V., Garipov I. R., Pronin E. A.</i> Parameterization of the fan assembly of the external electric motor cooling system	51
<i>Korolev V. I.</i> Methods of predictive monitoring of the technical condition of electrical systems	62
<i>Kuptsov D. V., Khazieva R. T.</i> Analysis of circuit solutions and ways to increase energy efficiency	73
<i>Ovchinnikov A. V., Novikova K. O., Fetisov V. S.</i> Recharge of VTOL UAVs on landing platforms with adaptable contact band width	80
<i>Siraev F. F., Khazieva R. T.</i> Using pulse width modulation to control the resonant inverter	90
<i>Sorokin A. V., Shabanov V. A.</i> A two-way method for determining the location of a single-phase earth fault in networks with an isolated neutral	98
<i>Styskin A. V., Roginskaya L. E., Yangirov I. F., Gorbunov A. S., Karimov R. D., Maksudov D. V.</i> Development of a method for calculation of parametric transformers	110
<i>Shabanov V. A., Stepanova V. D.</i> Graphoanalytical study of single-phase earth fault modes	123

## DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Belyaev A. S., Filipas A. A.</i> Research of the operation of the support weightening system on the example of mathematical and natural modeling	135
<i>Solovev B. A., Gamisonia G. K., Sayduloev R. Sh.</i> Automation technologies as a key component of the Industry 4.0 manufacturing development path	145
<i>Filipchenko A. S.</i> Classification of specialized computing systems in transport	159
<i>Shulaeva E. A., Danilov V. I.</i> Development of an educational application simulating industrial production processes in the UNITY 3D PERSONAL game engine	170
<b>About the autors</b>	181

Научная статья

УДК 621.43.044.1

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-7-15

## РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЗАЖИГАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ



**Фарит Абдулганеевич Гизатуллин**

**Farit A. Gizatullin**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры электротехники и электрооборудования предприятий,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия



**Зульфья Газинуровна Габидуллина**

**Zulfya G. Gabidullina**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры электромеханики, Передовая инженерная школа  
«Моторы будущего», Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия



**Андрей Владимирович Лобанов**

**Andrey V. Lobanov**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электромеханики, Передовая инженерная школа  
«Моторы будущего», Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия

### Актуальность

Анализ научно-технической литературы в области разработок и исследований систем зажигания авиационных двигателей показывает, что проявления резонансных процессов в нелинейных разрядных цепях емкостных систем зажигания при наличии двух накопителей энергии — накопительного конденсатора и катушки индуктивности — не исследованы с выдачей рекомендаций по согласованию параметров накопителей энергии. Эта задача имеет существенный практический интерес с точки зрения оптимизации параметров разрядных цепей, повышения энергетической эффективности и воспламеняющей способности систем зажигания.

### Цель исследования

Выявление возможности повышения эффективности емкостных систем зажигания на основе использования проявления резонансных процессов в нелинейных разрядных цепях, содержащих два накопителя энергии.

### Методы исследования

Исследования проведены с привлечением теоретического описания процессов при разряде предварительно заряженного конденсатора

### Ключевые слова

система зажигания,  
резонансные явления,  
емкость, индуктивность,  
энергия искровых  
разрядов, напряжение  
и ток разряда

на цепь  $R-L$  с последующим экспериментальным подтверждением предполагаемых закономерностей, связанных с проявлением резонанса напряжений в разрядной цепи с элементом, имеющим падающую вольтамперную характеристику.

#### Результаты

Исследованы проявления резонансных явлений в емкостной системе зажигания при разряде конденсатора на нелинейную цепь. Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что зависимости напряжения в искровом разряде, тока и энергии разрядов от величины емкости накопительного конденсатора при фиксированной индуктивности разрядной цепи имеют неравномерный характер с точками перегиба, соответствующими равенству индуктивного и емкостного сопротивлений. Показано, что энергетическая эффективность разрядной цепи может сохраняться практически неизменной при уменьшении более, чем в 1,5 раза величины емкости накопительного конденсатора в области проявления резонансных процессов.

Полученные результаты позволяют согласовывать параметры емкостных систем зажигания, определять оптимальные значения индуктивности разрядных цепей при заданной величине емкости накопительных конденсаторов для обеспечения максимальной энергетической эффективности и воспламеняющей способности.

**Для цитирования:** Гизатуллин Ф. А., Габидуллина З. Г., Лобанов А. В. Резонансные явления в системах зажигания авиационных двигателей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 2. Т. 19. С. 7-15. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-7-15>.

Original article

## RESONANCE PHENOMENA IN AIRCRAFT ENGINE IGNITION SYSTEMS

#### The relevance

An analysis of scientific and technical literature in the field of development and research of aircraft engine ignition systems shows that the manifestations of resonant processes in nonlinear discharge circuits of capacitive ignition systems in the presence of two energy storage devices - a storage capacitor and an inductor coil have not been studied with the issuance of recommendations for matching the parameters of energy storage devices. This problem is of significant practical interest from the point of view of optimizing the parameters of the discharge circuits, increasing the energy efficiency and igniting ability of ignition systems.

#### Aim of research

Revealing the possibilities of increasing the efficiency of capacitive ignition systems based on the use of the manifestation of resonant processes in nonlinear discharge circuits containing two energy storage devices.

#### Research methods

Studies have been carried out involving a theoretical description of the processes during the discharge of the former charged capacitor to the  $R-L$  circuit, followed by experimental confirmation of the assumptions of the alleged states, described with the alleged resonance of occurrence in the discharge circuit using a similar falling current-voltage characteristic.

#### Ключевые слова

ignition system, resonance phenomena, capacitance, inductance, spark discharge energy, discharge voltage and current

## Results

The manifestations of resonant phenomena in a capacitive ignition system during the discharge of a capacitor on a non-linear circuit  $R-L$  are investigated. It is theoretically substantiated and experimentally proved that the dependences of the voltage in the spark discharge, the current and the energy of the discharges on the capacitance of the storage capacitor at a fixed inductance of the discharge circuit are uneven with inflection points corresponding to the equality of the inductive and capacitive resistances. It is shown that the energy efficiency of the discharge circuit can remain practically unchanged with a more than 1.5-fold decrease in the capacitance of the storage capacitor in the region of manifestation of resonant processes.

The results obtained make it possible to coordinate the parameters of capacitive ignition systems, to determine the optimal values of the inductance of the discharge circuits for a given value of the capacitance of storage capacitors to ensure maximum energy efficiency and igniting capacity.

**For citation:** Gizatullin F. A., Gabidullina Z. G., Lobanov A. V. Rezonansnyye yavleniya v sistemakh zazhiganiya aviatsionnykh dvigateley [Resonance Phenomena in Aircraft Engine Ignition Systems]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 2, Vol. 19, pp. 7-15. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-7-15>.

## Введение

Возможности проявления резонансных явлений связаны со схемотехникой преобразователей в составе систем зажигания и с особенностями разрядных цепей.

В качестве преобразователей для импульсных искровых систем зажигания используются, в основном, три типа преобразователей. К ним относятся электромагнитные вибрационные преобразователи: индукционные катушки с электромагнитными прерывателями, однотактные обратнотокковые транзисторные преобразователи на биполярных или полевых транзисторах и повышающие трансформаторы со схемами умножения напряжения [1–3]. Первые два типа преобразователей питаются от бортсети постоянного тока, третий тип — от источников переменного напряжения.

Повышающие трансформаторы со схемами умножения напряжения в качестве преобразователей для систем зажигания используются ограниченно по причине необходимости на борту самолетов

во время запуска двигателей источников переменного тока, как правило, 115 В, 400 Гц, несмотря на то, что они являются более предпочтительными с точки зрения стабильности одного из основных параметров систем зажигания — частоты следования разрядов в свечах зажигания. Это обусловлено стабильностью параметров сети переменного тока. Напряжение и частота в бортсети переменного тока изменяются не более, чем на 10 %, в то время как напряжение источников постоянного тока — аккумуляторных батарей может изменяться от 15 до 30 В.

Повышающие трансформаторы со схемами умножения напряжения, содержащие конденсаторы, индуктивности и ферромагнитные сердечники, обуславливают появление следующих видов резонансов: резонанса напряжений и феррорезонанса токов, которые влияют на процессы заряда накопительных конденсаторов в разрядных цепях емкостных систем зажигания. Названные виды резонанса в системах зажигания с питанием от сети переменного тока исследованы в доста-

точной степени и учитываются при проектировании систем зажигания.

Преобразователи с питанием от бортовой сети постоянного тока не испытывают существенного влияния резонансных явлений несмотря на то, что резонанс в той или иной степени проявляется в первичных и вторичных цепях при наличии искрогасительных конденсаторов.

Возможные проявления резонансных процессов в разрядных цепях емкостных систем зажигания независимо от типа применяемого преобразователя зависят от схемотехнических особенностей разрядных цепей с различными свечами. С этих позиций разрядные цепи можно разделить на два вида. Первый вид не содержит катушек индуктивности последовательно с коммутирующим разрядником и свечой. При этом собственная индуктивность разрядной цепи ограничивается индуктивностью кабеля, соединяющего разрядную цепь со свечой. Второй вид разрядной цепи содержит сосредоточенную индуктивность — отдельную катушку индуктивности или вторичную обмотку импульсного трансформатора в составе высоковольтного активизатора, как совокупности импульсного трансформатора и вспомогательного конденсатора [1, 4]. Существуют емкостные системы зажигания, которые в обязательном порядке содержат катушку индуктивности в разрядной цепи. В этих системах зажигания в качестве коммутирующих элементов используются не искровые разрядники, а твердотельные коммутаторы — тиристоры [5].

Наличие отдельных катушек индуктивности при использовании искровых разрядников в качестве коммутаторов зависит от особенностей механизмов воспламенения горючих смесей и стабилизации пламени в камерах сгорания газотурбинных двигателей [6–9].

Анализ научно-технической литературы показал, что проявления резонанс-

ных процессов в разрядных цепях емкостных систем зажигания при наличии двух накопителей энергии — накопительного конденсатора и сосредоточенной индуктивности — не исследованы с выдачей рекомендаций по согласованию параметров названных накопителей энергии. Эта задача имеет существенный практический интерес с точки зрения оптимизации параметров, повышения энергетической эффективности и воспламеняющей способности емкостных систем зажигания. Известно, что величины емкости накопительных конденсаторов и индуктивности разрядной цепи влияют на названные показатели эффективности систем зажигания, причем влияние индуктивности является противоречивым в зависимости от типа полупроводниковых свечей и механизмов развития разрядов в полупроводниковых свечах открытого типа и стреляющих свечах [1, 10–12].

### Постановка задачи и решение

В статье решается задача исследования проявлений резонансных явлений в емкостных системах зажигания при наличии сосредоточенной индуктивности в разрядной цепи с нелинейным элементом с целью выявления возможностей повышения энергетической эффективности и воспламеняющей способности полупроводниковых свечей. Поставленная задача решается с привлечением известного теоретического описания процессов при разряде предварительно заряженного конденсатора на линейную цепь  $R-L$  с экспериментальным подтверждением предполагаемых закономерностей, связанных с возможными проявлениями резонансных явлений в нелинейной разрядной цепи с элементом, имеющим падающую вольтамперную характеристику.

В емкостных системах зажигания всех типов предварительно заряженный кон-

денсатор разряжается на нелинейную цепь  $R-L$ . В таких цепях резонанс напряжений в классическом представлении невозможен по причине отсутствия источника переменного тока, подключенного к последовательной цепи  $R-L-C$ . Тем не менее, проявления резонанса напряжений могут иметь место при определенных условиях. Экспериментально прямыми и косвенными подтверждениями этому явлению могут служить нестандартные зависимости энергии, выделяющейся в искровом разряде разрядника или свечи зажигания, от емкости накопительного конденсатора, от индуктивности разрядной цепи, а также нестандартные зависимости напряжения в искровом разряде и разрядного тока от тех же параметров.

При возрастании емкости накопительного конденсатора разрядный ток и энергия искровых разрядов увеличиваются по причине роста накопленной энергии. Резонансные явления могут проявляться в отклонении от равномерного увеличения энергии искровых разрядов с ростом емкости конденсатора. Аналогичные рассуждения применимы и при анализе влияния индуктивности разрядной цепи на величину тока и энергию разрядов с учетом нелинейных вольтамперных характеристик элементов разрядной цепи.

Для последующего анализа приведем некоторые соотношения при разряде конденсатора на линейную цепь  $R-L$  [13].

Уравнение переходного процесса при разряде конденсатора на цепь  $R-L$ :

$$U_c + Ri + L \frac{di}{dt} = 0; \quad i = C \frac{dU_c}{dt}. \quad (1)$$

Дифференциальное уравнение относительно тока:

$$LC \frac{d^2 i}{dt^2} + RC \frac{di}{dt} + i = 0. \quad (2)$$

Корни характеристического уравнения:

$$\alpha_{1,2} = \frac{-RC \pm \sqrt{R^2 C^2 - 4LC}}{2LC}. \quad (3)$$

Колебательный разряд конденсатора, характерный для емкостных систем зажигания, соответствует комплексно-сопряженным корням характеристического уравнения, то есть:

$$\alpha_{1,2} = -\delta \pm j\omega, \quad (4)$$

где  $\delta = -\frac{R}{2L}$ ;  $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$ ,

$\omega$  — угловая частота собственных колебаний контура.

В результате решения дифференциального уравнения (2) окончательные выражения для тока  $i$ , напряжения на конденсаторе  $u_c$  и напряжения на индуктивности  $u_L$  будут иметь вид:

$$u_c = U_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \theta); \quad (5)$$

$$i = -I_m e^{-\delta t} \sin(\omega t); \quad (6)$$

$$u_L = U_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t - \theta), \quad (7)$$

где  $U_0$  — напряжение заряда конденсатора;

$I_m$  — максимальное значение разрядного тока.

Ток опережает по фазе напряжение на емкости на угол  $\theta$  и отстает от напряжения на индуктивности. При соблюдении равенства индуктивного и емкостного сопротивлений контура, т.е. при их равенстве волновому сопротивлению  $\omega L = \frac{1}{\omega C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$  напряжения на емкости и индуктивности равны и противоположны по знаку, при этом угол  $\theta = \frac{\pi}{2}$ , и напряжение на активном сопротивлении в соответствии с (1) будет максимальным.

Из проведенного анализа следует предположение, что в разрядной цепи емкостной системы зажигания достижение равенства емкостного и индуктивного сопротивлений должно привести к нарушению равномерного изменения тока, напряжения в искровом разряде и энергии разрядов с возрастанием емкости конденсатора.

Энергия искровых разрядов определяется соотношением:

$$W = \int_0^{t_u} u i dt, \quad (8)$$

где  $u$  — напряжение в искровом разряде;

$i$  — разрядный ток;

$t_u$  — длительность искры.

Для дальнейшего анализа необходимо подчеркнуть две важные особенности разрядных процессов при наличии нелинейных элементов с падающими вольтамперными характеристиками. Во-первых, в соответствии с падающей вольтамперной характеристикой нелинейных элементов увеличение напряжения при равенстве напряжений на емкости и индуктивности сопровождается уменьшением тока. Во-вторых, из формулы (8) для энергии искрового разряда следует, что увеличение напряжения приводит к увеличению энергии несмотря на возможное уменьшение разрядного тока. Это связано с тем, что в (8) в подынтегральное выражение входит произведение  $i dt$ , которое при интегрировании определяет заряд конденсатора, остающийся неизменным при фиксированных емкости и напряжении заряда конденсатора.

Таким образом, для подтверждения влияния резонансных явлений на процессы в разрядных цепях емкостных систем зажигания необходимо доказать экспериментально, что при увеличении емкости накопительного конденсатора нарушается равномерность трех зависимостей:  $W = f(C)$ ,  $u = f(C)$  и  $I_m = f(C)$ , причем при соблюдении условия  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$

кривой  $u = f(C)$  будет экстремум, в кривой  $i = f(C)$  будет наблюдаться перегиб или провал, а в кривой  $W = f(C)$  будет наблюдаться перегиб.

Схема экспериментальной установки для подтверждения названных закономерностей показана на рисунке 1. Для упрощения и повышения чистоты эксперимента разрядная цепь содержит один нелинейный элемент — искровой разрядник  $F$ , индуктивность цепи  $L = 1$  мкГн. Емкость конденсатора составляла  $C = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$  мкФ. Пробивное напряжение разрядника равно 2140 В. Осциллографирование разрядного тока осуществлялось с использованием безындуктивного коаксиального шунта с сопротивлением  $R_{ш} = 0,0071$  Ом [14]. Напряжение в искре разрядника фиксировалось емкостно-омическим делителем напряжения дифференциальным методом, т.е. определялось как разность падения напряжения на разряднике с учетом электродов и падения напряжения на сваренных электродах разрядника. Коэффициент деления делителя напряжения составлял 74.

По результатам осциллографирования определялась энергия искровых разрядов методом графического перемножения мгновенных значений тока и напряжения с последующим графическим интегрированием построенной зависимости мгновенной мощности разрядов от времени по соотношению (8).

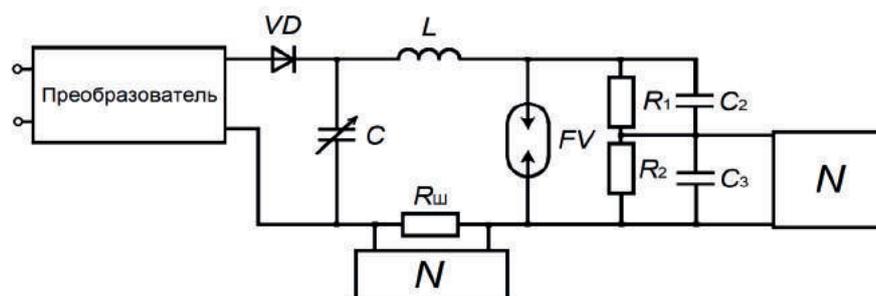


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

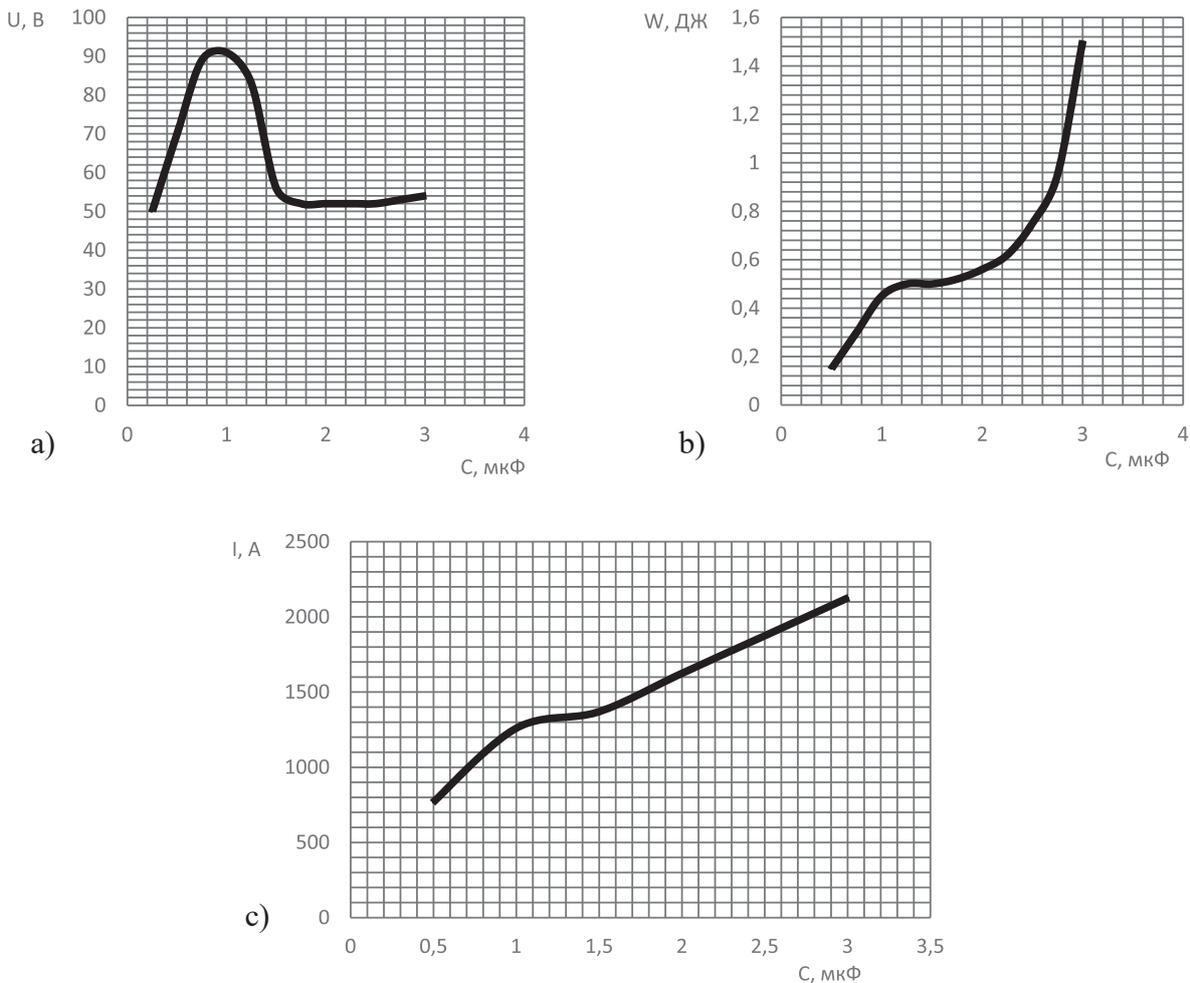
Figure 1. Scheme of the experimental unit

На рисунках 2–4 приведены полученные зависимости  $W = f(C)$ ,  $u = f(C)$ ,  $I_m = f(C)$ . Полученные данные подтверждают выводы, полученные по результатам теоретического анализа. При изменении емкости  $C$  изменяется реактивная составляющая полного сопротивления разрядной цепи  $\omega L - \frac{1}{\omega C}$ . В момент равенства 0 этой составляющей индуктивное и емкостное напряжения уравновешивают друг друга, и напряжение в активном сопротивлении искрового разряда является максимальным. При этом в соответствии с падающей вольтамперной характеристикой искрового разряда разрядный ток меняется в меньшей степени. В соответствии с выражением (8) происходит дополнительное увеличение

энергии искровых разрядов помимо естественного увеличения энергии с возрастанием емкости конденсатора, что приводит к перегибу в зависимости  $W = f(C)$ .

Результаты и выводы подтверждаются равенством 0 величины  $\omega L - \frac{1}{\omega C}$  для значений параметров  $C$  и  $L$  при величине емкости  $C = 1$  мкФ, при которой разрядный ток имеет точку перегиба, напряжение в искровом разряде максимально, а энергия разрядов в кривой  $W = f(C)$  также имеет точку перегиба.

Из рисунка 2 следует, что энергия искровых разрядов сохраняется практически неизменной при уменьшении более, чем в 1,5 раза по сравнению с величиной емкости накопительного конденсатора при фиксированной индуктив-



**Рисунок 2.** Зависимости напряжения, энергии и тока для различных значений емкостей: зависимость  $U = f(C)$  (a); зависимость  $W = f(C)$  (b); зависимость  $I = f(C)$  (c)

**Figure 2.** Voltage, energy and current dependencies for various capacitance values: dependency  $U = f(C)$  (a); dependency  $W = f(C)$  (b); dependency  $I = f(C)$  (c)

ности разрядной цепи в области проявления резонансных процессов.

### Выводы

Полученные результаты позволяют согласовывать параметры емкостных систем зажигания, определять оптималь-

ные значения индуктивности разрядных цепей при заданной величине емкости накопительных конденсаторов для обеспечения максимальной энергетической эффективности и воспламеняющей способности полупроводниковых свечей.

### Список источников

1. Гизатуллин Ф.А. Емкостные системы зажигания. Уфа: УГАТУ, 2002. 249 с.

2. Gizatullin F.A., Salikhov R.M., Sitnikov R.P. Two-Channel Capacitive Ignition System with a Transistor Converter for Ground-Based Gas-Turbine Engines // *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38, No. 10. P. 748–751. doi: 10.3103/S1068798X1810009X.

3. Семенов Ю.С. Силовая электроника: от простого к сложному. М., Солон-Пресс, 2005. 416 с.

4. Гизатуллин Ф.А., Заико А.И., Петунин В.И., Габидуллина З.Г. Способы повышения эффективности двухканальных систем зажигания газотурбинных двигателей // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021. № 10–1 (112). С. 12–17. doi: 10.23670/IRJ.2021.112.10.002.

5. Пат. 5561350 США, МКИ Н 05 В 039/03; F 026 G 003/00; . Ignition System for a Turbine Engine / John R. Frus, Frederick B. Sontag. 1996.

6. Гизатуллин Ф.А. К теории искрового воспламенения топливовоздушных смесей в ГТД // *Авиационная промышленность*. 2000. № 1. С. 56–60.

7. Lin Bx., Wu Y., Xu Mx., et al. Experimental Investigation on High-Altitude Ignition and Ignition Enhancement by Multi-Channel Plasma Igniter. *Plasma Chem Plasma Process*. 2021. No. 41. P. 1435–1454. <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10189-0>.

8. Lefebvre A.H., Ballal D.R. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions. Third Edition. CRC Press, 2010. 557 p.

9. Shi Xudong, Li Hongguang, Wang Ruowen, Xu Meng. Modeling and Simulation of Aviation Engine Ignition Spark Frequency Disorder // *The Open Electrical and Electronic Engineering Journal*. 2015. Vol. 9. P. 193–199.

10. Gizatullin F.A., Gabidullina Z.G., Salikhov R.M., Karimova A.G. Assessing the Simulation of Capacitive Ignition Systems in Gas-Turbine Engines // *Russ. Engin. Res*. 2020. Vol. 40, No. 7. P. 531–534. doi: 10.3103/S1068798X20070151.

11. Гизатуллин Ф.А., Салихов Р.М., Лобанов А.В., Чигвинцев В.А., Ищейкина Т.М., Галиев Р.В. Закономерности разрядных процессов в емкостных системах зажигания апериодического и колебательного разрядов со стреляющими полупроводниковыми свечами // *Вестник УГАТУ*. 2013. Т. 17, № 1 (54). С. 135–140.

12. Kumar R. et al. Development of Synchronization System of Two Spark Gaps // 2012 IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (ICPE). Delhi, India, 2012. P. 1–3. doi: 10.1109/ICPE.2012.6450455.

13. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов. Т. 1. 4-е изд. СПб.: Питер, 2003. 463 с.

14. Вахитов Р.Ш., Гизатуллин Ф.А. Трубчатый широкополосный шунт для измерения больших импульсов тока // *Измерительная техника*. 1978. № 8. С. 75.

### References

1. *Gizatullin F.A. Emkostnye sistemy zazhiganiya* [Capacitive Ignition Systems]. Ufa, UGATU Publ., 2002. 249 p. [in Russian].

2. Gizatullin F.A., Salikhov R.M., Sitnikov R.P. Two-Channel Capacitive Ignition System with a Transistor Converter for Ground-Based Gas-Turbine Engines. *Russian Engineering Research*, 2018, Vol. 38, No. 10, pp. 748–751. doi: 10.3103/S1068798X1810009X.

3. Semenov Yu.S. *Silovaya elektronika: ot prostogo k slozhnomu* [Power Electronics: from Simple to Complex]. Moscow, Solon-Press Publ., 2005. 416 p. [in Russian].

4. Gizatullin F.A., Zaiko A.I., Petunin V.I., Gabidullina Z.G. Sposoby povysheniya effektivnosti dvukhkanal'nykh sistem zazhiganiya gazoturbinnykh dvigatelei [Ways to Improve the Efficiency of Two-Channel Ignition Systems of Gas Turbine Engines]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal — International Research Journal*, 2021, No. 10–1 (112), pp. 12–17. doi: 10.23670/IRJ.2021.112.10.002. [in Russian].

5. Frus John R., Sontag Frederick B. *Ignition System for a Turbine Engine*. Patent USA, 1996.

6. Gizatullin F.A. K teorii iskrovogo vosplamneniya toplivovozdushnykh smesei v GTD [On the Theory of Spark Ignition of Air-Fuel Mixtures in Gas Turbine Engines]. *Aviatsionnaya promyshlennost' — Aviation Industry*, 2000, No. 1, pp. 56–60. [in Russian].
7. Lin Bx., Wu Y., Xu Mx., et al. Experimental Investigation on High-Altitude Ignition and Ignition Enhancement by Multi-Channel Plasma Igniter. *Plasma Chem Plasma Process*, 2021, No. 41, pp. 1435–1454. <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10189-0>.
8. Lefebvre A.H., Ballal D.R. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*. Third Edition. CRC Press, 2010. 557 p.
9. Shi Xudong, Li Hongguang, Wang Ruowen, Xu Meng. Modeling and Simulation of Aviation Engine Ignition Spark Frequency Disorder. *The Open Electrical and Electronic Engineering Journal*, 2015, Vol. 9, pp. 193–199.
10. Gizatullin F.A., Gabidullina Z.G., Salikhov R.M., Karimova A.G. Assessing the Simulation of Capacitive Ignition Systems in Gas-Turbine Engines. *Russ. Engin. Res.*, 2020, Vol. 40, No. 7, pp. 531–534. doi: 10.3103/S1068798X20070151.
11. Gizatullin F.A., Salikhov R.M., Lobanov A.V., Chigvintsev V.A., Ishcheikina T.M., Galiev R.V. Zakonomernosti razryadnykh protsessov v emkostnykh sistemakh zazhiganiya aperiodicheskogo i kolebatel'nogo razryadov so strelyayushchimi poluprovodnikovymi svechami [Patterns of Discharge Processes in Capacitive Ignition Systems of Aperiodic and Oscillatory Discharges with Firing Semiconductor Candles]. *Vestnik UGATU — Vestnik USATU*, 2013, Vol. 17, No. 1 (54), pp. 135–140. [in Russian].
12. Kumar R. et al. Development of Synchronization System of Two Spark Gaps. *2012 IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*. Delhi, India, 2012, pp. 1–3. doi: 10.1109/IICPE.2012.6450455.
13. Demirchyan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: uchebnik dlya vuzov* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Textbook for Universities]. 4th ed. Saint-Petersburg: Piter Publ., 2003. Vol. 1. 463 p. [in Russian].
14. Vakhitov R.Sh., Gizatullin F.A. Trubchatyi shirokopolosnyi shunt dlya izmereniya bol'shikh impul'sov toka [Tubular Broadband Shunt for Measuring Large Current Pulses]. *Izmeritel'naya tekhnika — Izmeritel'naya tekhnika*, 1978, No. 8, pp. 75. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 21.02.2023; одобрена после рецензирования 23.03.2023; принята к публикации 06.04.2023.*

*The article was submitted 21.02.2023; approved after reviewing 23.03.2023; accepted for publication 06.04.2023.*

Научная статья

УДК 004.942

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-16-29

## АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА, УДОВЛЕТВОРЯЮЩИХ ТРЕБОВАНИЯМ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ПОНИЖАЮЩЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ



*Антон Геннадьевич Юдинцев*

*Anton G. Yudinsev*

*кандидат технических наук, директор*

*Научно-исследовательского института автоматики и электромеханики,  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Томск, Россия*



*Вячеслав Михайлович Дмитриев*

*Vjacheslav M. Dmitriev*

*доктор технических наук, профессор,*

*профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании,  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Томск, Россия*



*Тарас Викторович Ганджа*

*Taras V. Gandzha*

*доктор технических наук, доцент,*

*профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании,  
Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники, Томск, Россия*



*Юрий Алексеевич Шурыгин*

*Yury A. Shurygin*

*доктор технических наук, профессор, первый проректор,*

*Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники, Томск, Россия*

### Актуальность

Любой современный имитатор составной части системы электропитания космического аппарата (СЭС КА) представляет собой энергопреобразующий комплекс и является непрерывно-дискретной, нестационарной системой с переменной структурой. С целью полнофункциональной имитации всех режимов солнечных и аккумуляторных батарей, а также всех видов электрической нагрузки, имитаторы необходимо разрабатывать состоящими из нескольких взаимосвязанных подсистем, образующих общую структуру имитатора. В ходе проведения испытаний, в зависимости от текущего режима работы, подключается (отключается) одна из необходимых (не востребованных) в данный

### Ключевые слова

система электропитания, цифровая модель, понижающий преобразователь постоянного тока, метод компонентных цепей, оптимизация, многоуровневая компьютерная модель

момент времени подсистем, т.е. имитаторы являются системами с переменной структурой.

С учётом мощности СЭС КА имитаторы составных частей СЭС должны обладать не меньшими номинальными мощностями, и поэтому их необходимо создавать на базе устройств силовых преобразователей электроэнергии, так как последние обладают наилучшим КПД из возможных энергопреобразующих электротехнических систем. Кроме того, современные системы преобразования электроэнергии невозможны без применения электронно-вычислительных средств — контроллеров нижнего уровня и ЭВМ, на базе операционных систем которых развёрнут полноценный программный комплекс управления. Таким образом, современный имитатор составной части СЭС — непрерывно-дискретная импульсная система.

Учитывая требования по надёжности и сроку активной эксплуатации, предъявляемые к современным имитаторам СЭС, следует иметь в виду, что в течение длительных сроков эксплуатации происходит деградация параметров электронных компонентов, на базе которых строятся преобразователи электроэнергии. Таким образом, имитаторы составных частей СЭС КА являются нестационарными системами при длительных сроках активной эксплуатации.

Таким образом, в настоящее время актуально рассмотрение подходов к определению непрерывных линейных моделей силовых преобразователей электрической энергии с целью проведения синтеза регуляторов их систем управления, составляющих основу построения любого имитатора составной части СЭС КА.

#### **Цель исследования**

Сформировать многоуровневую компьютерную модель понижающего преобразователя постоянного напряжения и определить значения коэффициентов ПИД-регуляторов напряжения и тока, обеспечивающих оптимальное переключение между режимами его работы.

#### **Методы исследования**

Метод многоуровневых компонентных цепей, метод покоординатного спуска.

#### **Результаты**

В формате метода многоуровневых компонентных цепей сформирована многоуровневая модель, обеспечивающая определение значений параметров коэффициентов ПИД-регуляторов напряжения и тока, при которых в понижающем преобразователе постоянного тока наблюдается оптимальное переключение между режимами его работы.

**Для цитирования:** Юдинцев А. Г., Дмитриев В. М., Ганджа Т. В., Шурыгин Ю. А. Алгоритм определения параметров регулятора, удовлетворяющих требованиям переходного процесса в понижающем преобразователе постоянного напряжения // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 2. Т. 19. С. 16-29. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-16-29>.

Original article

## **ALGORITHM FOR DETERMINING THE REGULATOR PARAMETERS MEETING THE REQUIREMENTS OF THE TRANSIENT PROCESS IN A STEP-DOWN DC VOLTAGE CONVERTER**

#### **The relevance**

Any modern simulator of an integral part of the spacecraft power supply system (SC PSS) is an energy-converting complex and is a continuous-

#### **Keywords**

power supply system, digital model,

discrete, non-stationary system with a variable structure. In order to fully simulate all modes of solar and storage batteries, as well as all types of electrical load, simulators must be developed consisting of several interconnected subsystems that form the overall structure of the simulator. During the tests, depending on the current mode of operation, one of the necessary (not in demand) subsystems at a given time is connected (disconnected), i.e. simulators are systems with a variable structure.

Taking into account the power of the PSS of the spacecraft, simulators of the components of the PSS should have no less than the rated power, and therefore they must be created on the basis of power converters of electricity, since the latter have the best efficiency of possible energy-converting electrical systems. In addition, modern power conversion systems are impossible without the use of electronic computing tools — lower-level controllers and computers, on the basis of operating systems of which a full-fledged control software package is deployed. Thus, a modern simulator of the PSS component is a continuous-discrete impulse system.

Taking into account the requirements for reliability and the period of active operation imposed on modern solar power plant simulators, it should be borne in mind that over long periods of operation, the parameters of electronic components degrade, on the basis of which power converters are built. Thus, the simulators of the PSS components of the spacecraft are non-stationary systems with long periods of active operation.

Thus, at present, it is relevant to consider approaches to determining continuous linear models of power converters of electrical energy in order to synthesize the controllers of their control systems, which form the basis for constructing any simulator of an integral part of the PSS of a spacecraft.

#### **Aim of research**

To form a multilevel computer model of a DC converter and determine the values of the coefficients of the voltage and current PID controllers that provide optimal switching between its operating modes.

#### **Research methods**

Method of multilevel component chains, method of coordinate descent.

#### **Results**

In the format of the method of multilevel component circuits, a multilevel model is formed that provides the determination of the values of the parameters of the coefficients of the voltage and current PID controllers, at which the optimal switching between the modes of its operation is observed in the DC buck converter.

DC step-power converter, component circuit method, optimization, multilevel computer model

**For citation:** Yudinsev A. G., Dmitriev V. M., Gandzha T. V., Shurygin Yu. A. Algoritm opredeleniya parametrov regulatora, udovletvoryayushchikh trebovaniyam perekhodnogo protsessa v ponizhayushchem preobrazovatele postoyannogo napryazheniya [Algorithm for Determining the Regulator Parameters Meeting the Requirements of the Transient Process in a Step-Down DC Voltage Converter]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 2, Vol. 19, pp. 16-29. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-16-29>.

#### **Введение**

В основе любого проектируемого имитатора составной части системы электроснабжения космического аппарата (СЭСКА) лежит использование элементарных силовых преобразовательных модулей. Современный имитатор составной части системы электроснабжения — это сило-

вой энергопреобразующий комплекс, находящийся под контролем системы автоматического управления. Преобразовательные модули, составляющие структуру имитатора, должны обладать высокой стабильностью выходных или входных параметров, заданным качеством переходных процессов и заданным уров-

нем пульсаций выходных напряжения и тока с целью обеспечения ряда требований.

Представление силового преобразователя в виде непрерывной модели позволяет исследовать его свойства до создания физического образца, вносить изменения в электрическую схему, проводить синтез регуляторов и корректировку их параметров, в итоге сокращать сроки проектирования имитаторов составных частей СЭС КА в целом. Безусловно, высокое быстродействие и большая память современных ЭВМ позволяют создавать цифровые модели силовых преобразователей любой степени сложности и воспроизводить все требуемые от преобразователя реакции на входное воздействие.

Не принимая в расчёт высокие затраты временных и технических ресурсов, которые необходимы для работы с цифровой моделью по сравнению с непрерывной, стоит отметить главный недостаток цифровой модели — невозможность либо очень большую сложность получения частотных характеристик. При этом, данные характеристики чрезвычайно важны при проектировании динамических свойств, они показывают пути, по которым нужно следовать для изменения параметров регуляторов имитатора составной части СЭС с целью улучшения его работы в динамике. Цифровые модели силовых преобразователей и имитаторов СЭС на их основе также необходимы для проверки результатов проектирования и отработки алгоритмов функционирования.

Силовая преобразовательная часть имитатора в целом — является важнейшим звеном системы автоматического управления имитатором, её регулирующим элементом. Так как нагрузка любого имитатора имеет электронный характер, целесообразно имитатор совместно с

нагрузкой считать объектом системы автоматического управления (САУ).

Большой вклад в развитие динамики импульсных преобразователей был сделан в [1], где рассмотрены различные схемы силовой части и разработаны их точные математические модели. При этом, рассмотрение силовой части преобразователей как дискретного звена САУ, учёт точного значения фактора пульсаций — коэффициента усиления звена ШИМ второго рода (ШИМ-2) — приводят к большим сложностям при проектировании замкнутой системы. Данный подход может быть оправданным при использовании современных универсальных либо специализированных программных сред.

Второй подход представления силовой части импульсного преобразователя, функционирующего с любым типом ШИМ, с аналоговым либо дискретным процессором в управляющей части, основан на замене силовой части, по сути, представляющей собой дискретное звено, его непрерывным аналогом [2]. Помимо перехода к непрерывному звену как математической модели целесообразно и дальнейшее изменение — переход от нелинейных звеньев к линейным, в пределах изменения параметров вблизи рабочей точки. Созданные модели силовых преобразователей, составляющих основу имитаторов составных частей СЭС КА, — непрерывные и линейные — могут работать как с аналоговой управляющей частью, так и с дискретной, то есть в модели системы управления может быть применён как ШИМ-контроллер, так и цифровой сигнальный процессор, выполняющий операции коррекции и получения ШИМ-сигнала.

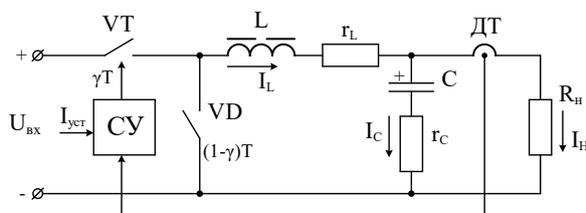
В данном исследовании рассмотрим создание непрерывных линейных моделей силовых преобразователей с использованием второго подхода на основе понижающего преобразователя напряже-

ния, что составляет основу для дальнейшего проектирования имитаторов составных частей СЭС КА и проведения синтеза регуляторов систем управления.

### Характеристика объекта

В понижающих преобразователях постоянного напряжения фазовые координаты и, следовательно, выходные сигналы состоят из плавной составляющей и высокочастотных пульсаций, вызванных ключевым режимом работы транзистора. При выборе достаточно высокой частоты (не менее чем на порядок выше частоты среза выходного фильтра преобразователя) изменения структуры системы и амплитуды пульсаций невелики. При современном технологическом уровне компонентной базы частота работы преобразователей составляет от 50 кГц и выше, достигая порядков сотен килогерц. Очевидно, что при уменьшении периода  $T$  амплитуда пульсаций уменьшается, а при  $T \rightarrow 0$  на выходе преобразователя устанавливается постоянное напряжение с малым уровнем пульсаций. Такую систему определяют как предельную непрерывную модель [3].

Используя схему, представленную на рисунке 1 и принятые допущения (ключи идеальные, дроссель и конденсатор обладают некоторыми сопротивлениями), составим векторно-матричное дифференциальное уравнение предельной непрерывной модели.



**Рисунок 1.** Схема замещения понижающего преобразователя постоянного напряжения

**Figure 1.** DC voltage step-down converter replacement circuit

Рассмотрение модели понижающего импульсного регулятора напряжения будем проводить только для случая работы дросселя в режиме непрерывного тока, так как иные возможные режимы работы неприемлемы для построения имитаторов аккумуляторных (АБ) и солнечных (БС) батарей, поэтому параметры преобразователей проектируются с этим учётом.

Векторы  $X$  — переменных состояния и  $U$  — входных воздействий определим следующим образом:

$$X = [i_L \quad u_C]; \quad U = [u_{вх}].$$

Таким образом, предельная непрерывная линейная модель в пространстве состояний понижающего преобразователя будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{1}{L} \left( R_L + \frac{R_C}{1 + \frac{R_C}{R_H}} \right) i_L(t) - \\ -\frac{1}{L} \left( 1 - \frac{R_C}{R_H \left( 1 + \frac{R_C}{R_H} \right)} \right) U_C(t) + \frac{\gamma}{L} U_{вх} \\ \frac{dU_C(t)}{dt} = \frac{1}{C \left( 1 + \frac{R_C}{R_H} \right)} i_L(t) - \frac{1}{C(R_H + R_C)} U_C(t). \end{cases} \quad (1)$$

Используя полученную систему уравнений, перейдём к операторной форме и получим передаточные функции для понижающего преобразователя:

$$\begin{cases} LsI_L(s) = -A_{11}I_L(s) + A_{12}U_C(s) + \gamma U_{вх}, \\ CsU_C(s) = A_{21}I_L(s) - A_{22}U_C(s), \end{cases} \quad (2)$$

где коэффициенты при неизвестных:

$$\begin{aligned} A_{11} &= R_L + \frac{R_C}{1 + \frac{R_C}{R_H}}; & A_{12} &= -1 + \frac{R_C}{R_H + R_C}; \\ A_{21} &= \frac{1}{1 + \frac{R_C}{R_H}}; & A_{22} &= \frac{1}{R_H + R_C}. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, передаточная функция понижающего преобразователя вход — относительная длительность управляю-

щего импульса, выход — напряжение на выходе имеет вид:

$$W(s)_{\gamma-U} = \frac{A_{21}U_{\text{вх}}}{LCs^2 + (A_{11}C + A_{22}L)s + (A_{11}A_{22} - A_{21}A_{12})}. \quad (4)$$

Передаточная функция понижающего преобразователя вход — относительная длительность управляющего импульса, выход — ток в дросселе:

$$W(s)_{\gamma-I} = \frac{U_{\text{вх}}(Cs + A_{22})}{LCs^2 + (A_{22}L + A_{11}C)s + (A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21})}. \quad (5)$$

Адекватность полученных моделей понижающего преобразователя как звена системы автоматического управления проведём в цифровой среде моделирования МАРС. Для этого создадим цифровую модель понижающего преобразователя со следующими исходными данными:  $L = 200$  мкГн,  $C = 10$  мкФ,  $U_{\text{вх}} = 100$  В,  $R_n = 10$  Ом,  $f = 50$  кГц,  $\gamma = 0,7$ .

Результаты оценок устойчивости, получаемые, например, по виду ВЧХ, характеризуются тем, что при определении погрешности при использовании методов оценок прямых показателей качества, применяются *оценочные* формулы, номограммы и таблицы, полученные при определенных допущениях, вследствие чего они дают либо приближенный результат, либо граничное значение показателя.

Поэтому истинное значение прямых показателей качества будем определять *по переходной функции*. Для вычисления реакции системы на типовые входные сигналы (построения графиков переходных функций и графиков ошибок) будем использовать моделирование системы (численное интегрирование соответствующих системе дифференциальных уравнений) в среде моделирования МАРС [4].

### Структура многоуровневой компьютерной модели

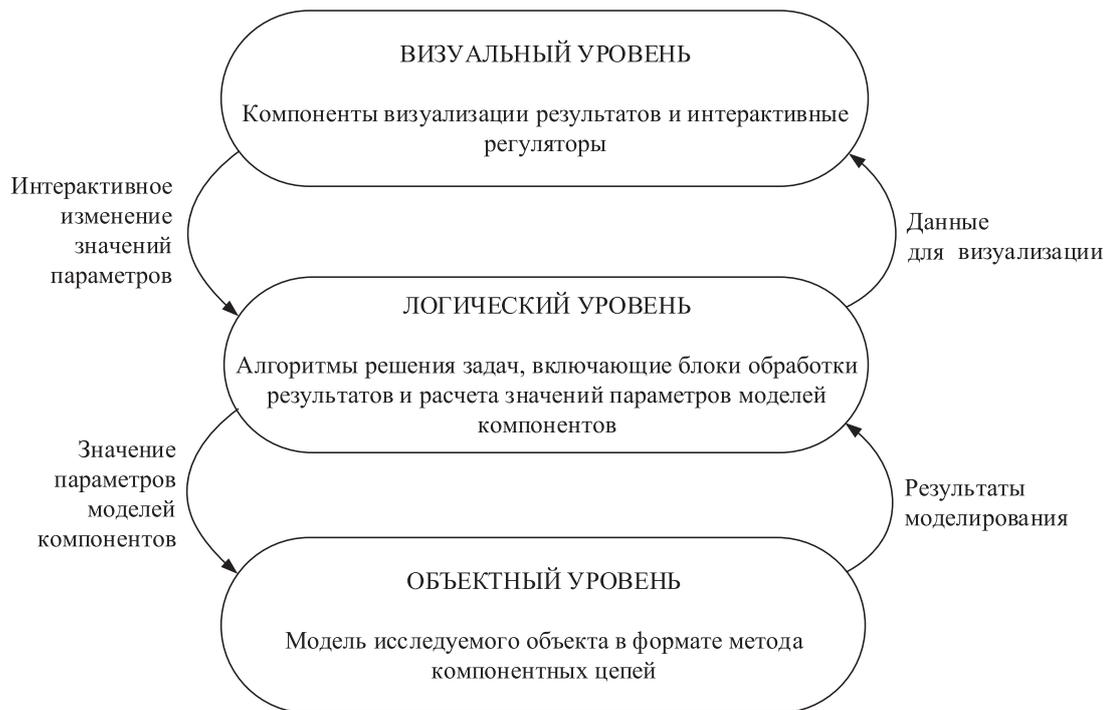
Для решения задачи определения значений параметров ПИД-регуляторов напряжения и тока, обеспечивающих

минимальное время переходного процесса и перерегулирование, применим положенную в основу среды МАРС многоуровневую компьютерную модель [5]. Ее структура, представленная на рисунке 2, состоит из следующих уровней:

- *объектного уровня*, на котором в формате метода компонентных цепей [6] формируется модель исследуемого объекта, значения параметров которого варьируются компонентами логического уровня, а результаты её анализа измерительными компонентами выбираются из вектора решения модели и передаются с объектного уровня на логический. Для анализа моделей объектного уровня используется универсальное вычислительное ядро [7], осуществляющее автоматическое формирование и решение системы алгебро-дифференциальных уравнений на каждом шаге по времени или частоте с передачей результатов на логический уровень с помощью измерительных компонентов;

- *логического уровня*, где в формате алгоритмических компонентных цепей формируется алгоритм решения задачи, в процессе которого выполняется многократный анализ модели, расположенной на объектном уровне, с различными значениями параметров её компонентов. Взаимодействие компонентов объектного уровня осуществляется с помощью механизма передачи сообщений [8], предполагающего обработку входящих в компонент данных непосредственно по алгоритму, реализованному в компоненте, с последующей передачей данных другим компонентам;

- *визуального уровня*, состоящего из моделей отображения результатов моделирования и интерактивных регуляторов, позволяющих в процессе функционирования модели интерактивно изменять значения параметров компонентов исследуемой модели. С помощью компонента данного уровня осуществляется визуализация



**Рисунок 2.** Структура многоуровневой компьютерной модели

**Figure 2.** Structure of multilevel computer model

зация результатов анализа моделей и шагов алгоритма решения задач [9].

Для определения значений их коэффициентов, *обеспечивающих оптимальный режим переключения* при изменении нагрузки и других параметров аккумуляторной батареи, применим основанную на методе компонентных цепей многоуровневую компьютерную модель.

#### **Многоуровневая компьютерная модель для автоматизации решения задачи определения оптимальных режимов функционирования понижающего преобразователя**

В формате многоуровневой компьютерной модели, структура которой представлена на рисунке 2, сформирована многоуровневая компьютерная модель. Она позволяет автоматизировать определение значений коэффициентов ПИД-регуляторов, при которых в понижающем преобразователе постоянного напряжения наблюдается минимальное время переходного процесса при изменении различных режимов: переключение между заря-

дом и разрядом аккумуляторной батареи, изменение нагрузки и прочее.

На ее *объектном уровне* сформирована модель понижающего преобразователя напряжения, представленная на рисунке 3. Для обеспечения оптимального переключения между режимами её работы между источником и схемой преобразователя установлены ПИД-регулятор напряжения PID\_U, обеспечивающий стабилизацию выходного напряжения, и ПИД-регулятор тока PID\_I для стабилизации тока дросселя L1.

Оптимальным переключением между режимами функционирования силового преобразователя считается такое, которое осуществляется за минимально короткое время при отсутствии перерегулирования. То есть, такое переключение должно осуществляться по апериодическому закону. Временная характеристика напряжения на нагрузке в компонентной цепи (рисунок 3) снимается вольтметром V1 и передается с объектного уровня многоуровневой компьютерной модели на ее логический уровень (рисунок 4).

На логическом уровне (рисунок 4) с помощью компонентов-блоков обработки результатов моделирования осуществляется определение параметров-функционалов переходной характеристики: компонентом DR1 осуществляется поиск перерегулирования, компонентом TRP1 определяется время переходного процесса, компонентом MAX1 — максимальное значение сигнала, а компонентом FV1 — его установившееся значение. Значение целевой функции, передаваемой на компонент ОПТИМ1, вычисляется компонентами: умножителями (MULT1, MULT2, MULT3, MULT4), сумматорами (SUM1, SUM2 и SUM3) и компонентами DEG1, возводящим сумму найденных параметров-функционалов, умноженных на весовые коэффициенты, в квадрат. Работа компонента ОПТИМ основана на методе покоординатного спуска [10, 11].

Алгоритм решения задачи определения значений коэффициентов регуляторов, удовлетворяющих требованиям минимального времени апериодического переходного процесса, состоит из следующих шагов:

**Шаг 1.** Опытным путем (например, методом ручной преднастройки) опреде-

ляются начальные значения коэффициентов регулятора. Их значения устанавливаются с помощью регуляторов «Коэффициент  $K_p$ », «Коэффициент  $K_i$ », «Коэффициент  $K_d$ », «Коэффициент  $K_p$ », «Коэффициент  $K_i$ », «Коэффициент  $K_d$ », находящихся на визуальном уровне многоуровневой компьютерной модели, представленном на рисунке 5.

Для выбранных начальных приближений параметров ПИД-регулятора график переходной характеристики (ПХ) имеет вид, представленный на рисунке 6.

**Шаг 2.** Формируем целевую функцию вида

$$F(K_p, K_i, K_d) = (V_1 \cdot y_{уст} + V_2 \cdot y_{max} + V_3 \cdot T_{III} + V_4 \cdot \sigma)^2,$$

где  $V_1, V_2, V_3, V_4$  — весовые коэффициенты, выбраны равными 10;

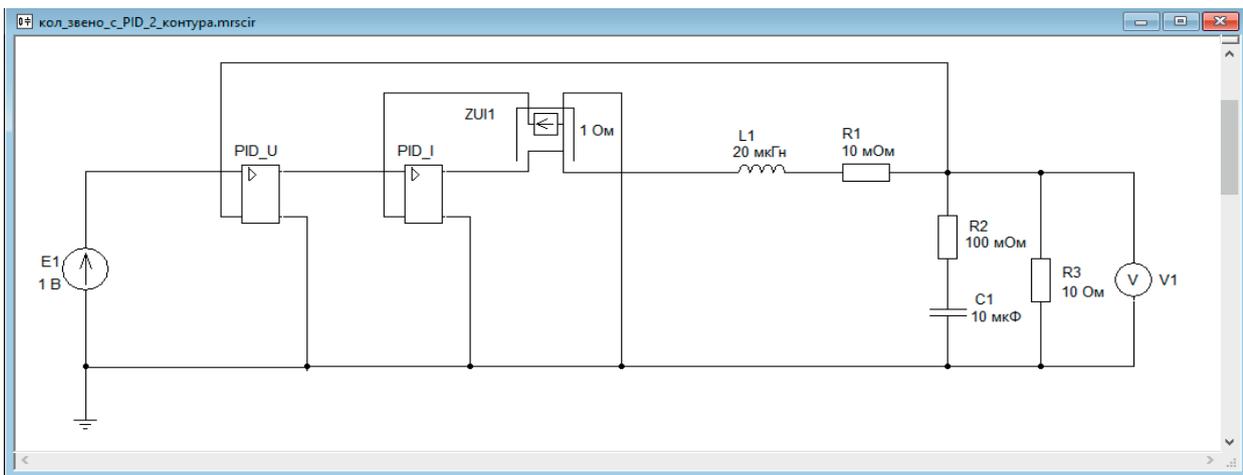
$y_{уст}$  — установившееся значение выходной переменной;

$y_{max}$  — максимальное значение выходной переменной;

$T_{III}$  — время переходного процесса;

$\sigma$  — перерегулирование.

Будем определять прямые показатели качества переходного процесса по вы-



**Рисунок 3.** Компонентная цепь объектного уровня модель понижающего преобразователя напряжения с ПИД-регулятором

**Figure 3.** The component circuit of the object level is a model of a step-down voltage converter with PID-regulator

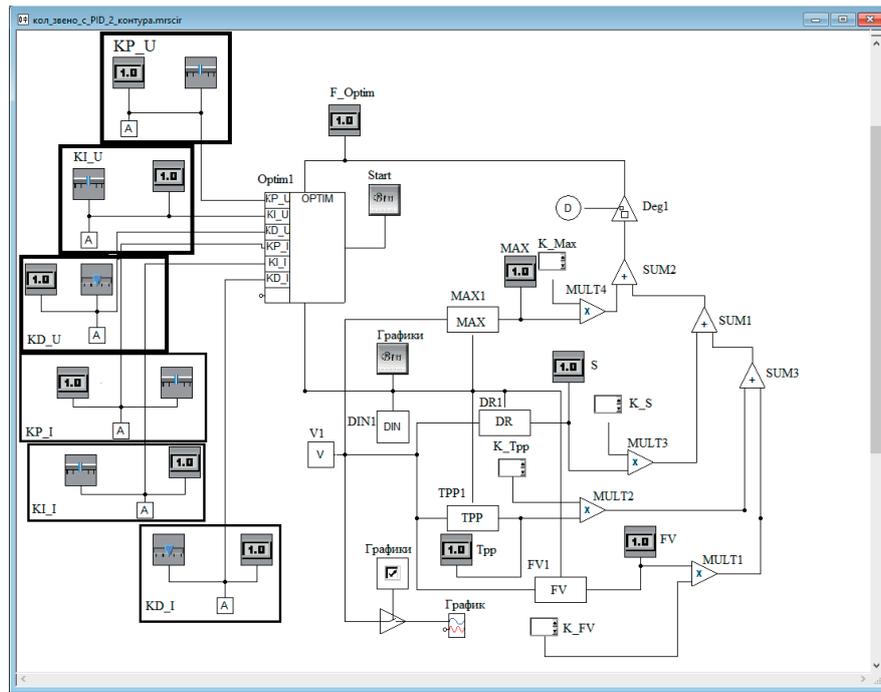


Рисунок 4. Логический уровень компонентной цепи силового преобразователя

Figure 4. Logical level of the component circuit of the power converter

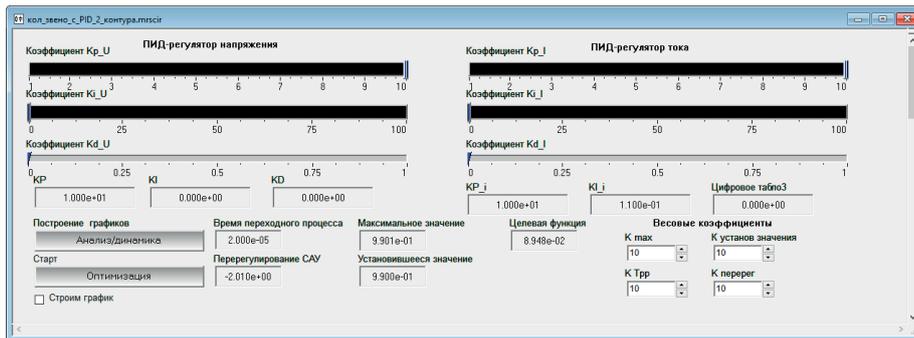


Рисунок 5. Визуальный уровень многоуровневой компьютерной модели

Figure 5. Visual level multilevel computer model

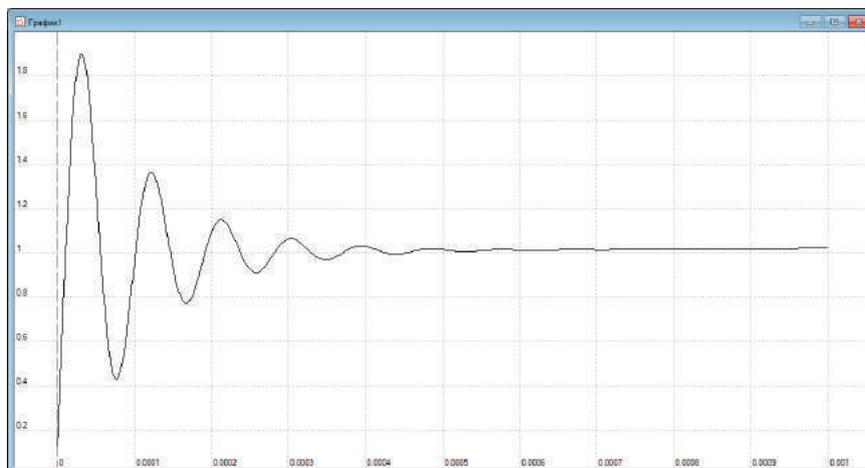


Рисунок 6. Переходная характеристика при выбранных начальных приближениях коэффициентов ПИД-регулятора

Figure 6. Transient response at selected initial approximations of the PID-controller coefficient

ходу аккумулятора батареи. Приведем эти показатели качества, полученные из ПХ для выбранного начального приближения коэффициентов. Перерегулирование определяется согласно формуле:

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y_{уст}}{y_{уст}} \cdot 100\%.$$

Время регулирования  $T_{III}$  — время, для которого выполняется условие:

$$|y(t) - y_{уст}| < 0.05 \cdot y_{уст}, \text{ при } t \geq T_{III}.$$

Целевая функция сформирована из следующих компонентов на логическом уровне многоуровневой компьютерной модели, представленном на рисунке 4:

С помощью компонентов-блоков обработки результатов анализа рассчитываются следующие параметры-функционалы: с помощью компонента MAX1 определяется максимальное значение выходной величины; компонентом DR1 — перерегулирование; компонентом TRP1 — время переходного процесса; компонентом FV1 — установившееся значение выходной величины.

Компонентами MULT1, MULT2, MULT3, MULT4 соответствующие параметры-функционалы выходной величины умножаются на весовые коэффициенты, устанавливаемые пользователем с помощью цифровых табло со спином на визуальном уровне многоуровневой компьютерной модели.

С помощью цифровых табло блока 3 осуществляется визуализация значений определяемых параметров-функционалов выходной переменной исследуемого объекта и текущее значение целевой функции.

**Шаг 3.** Расчет переходной характеристики осуществляется многократно при поступлении сигнала от компонента «Оптимизатор» или от кнопки «Анализ» на компонент DIN1. В нем установлены соответствующие параметры директивы анализа: начальное и конечное время

моделирования и соответствующие шаги. Результаты анализа передаются с помощью вольтметра V2 с объектного уровня многоуровневой компьютерной модели на ее логический уровень. Если все параметры-функционалы определены, то анализ модели останавливается до достижения конечного времени моделирования.

**Шаг 4.** Определение параметров-функционалов выходной переменной производится по соответствующим алгоритмам компонентами, перечисленными на шаге 2.

**Шаг 5.** Расчет целевой функции производится соответствующими компонентами MULT и SUM при поступлении на их входы значений от подключенных к ним компонентов. Значение целевой функции передается компоненту «Оптимизатор» Optim1.

**Шаг 6.** Анализируя поступившее значение целевой функции, компонент Optim1 изменяет значения коэффициентов регулятора KU1:Kp (пропорциональный коэффициент), KU:Ki (интегральный коэффициент), KU:Kd (дифференциальный коэффициент) согласно методу покоординатного спуска и запускает очередной анализ. Алгоритм переходит к шагу 3. Этот итерационный процесс осуществляется до тех пор, пока целевая функция уменьшается при изменении любого из коэффициентов. Как только изменение любого из коэффициентов приводит к увеличению целевой функции, алгоритм останавливает свою работу.

Результирующие значения параметров-функционалов переходной характеристики, полученные в результате оптимизации, представлены на рисунке 7, а результирующий график переходной характеристики приведен на рисунке 8.

Используем найденные значения коэффициентов ПИД-регуляторов напряжения и тока для построения модели и получения переходных характеристик

при сбросе-набросе нагрузки на рассматриваемый понижающий преобразователь постоянного напряжения.

### Анализ характеристик понижающего преобразователя постоянного напряжения при сбросе-набросе нагрузки

Добавим в схему понижающего преобразования два сопротивления нагрузки, представленные сопротивлениями R3 и R4, включение/выключение которых осуществляется ключами, срабатывающими по времени. Пусть в

момент времени 300 мкс нагрузка увеличивается с 10 до 20 Ом. Модель понижающего преобразователя для анализа процессов сброса/наброса нагрузки представлена на рисунке 9.

На рисунке 10, *a* представлены временные характеристики напряжения на выходе и тока в индуктивности при начальных значениях коэффициентов ПИД-регуляторов, а на рисунке 10, *b* — при найденных значениях, при которых наблюдается оптимальное переключение режимов функционирования понижающего преобразователя.

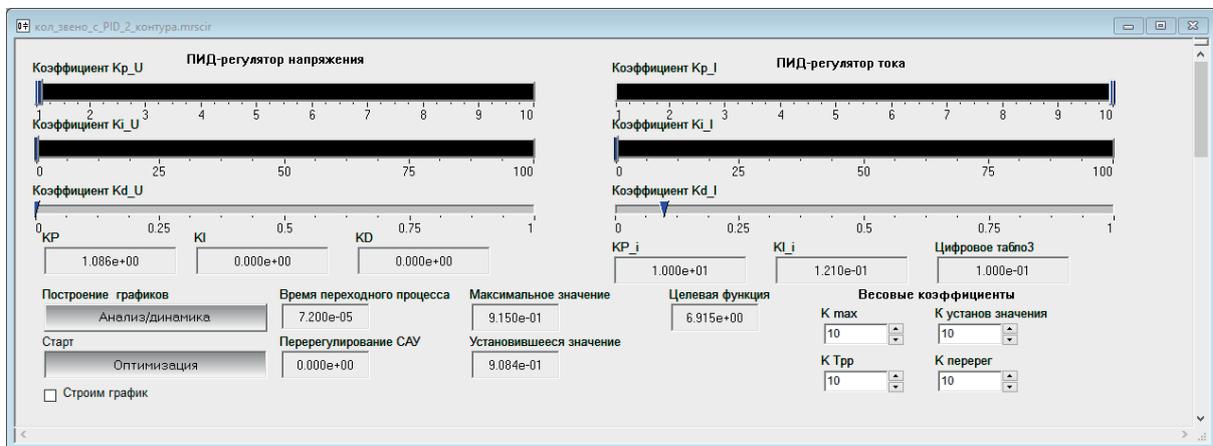


Рисунок 7. Результаты оптимизации

Figure 7. Optimization results

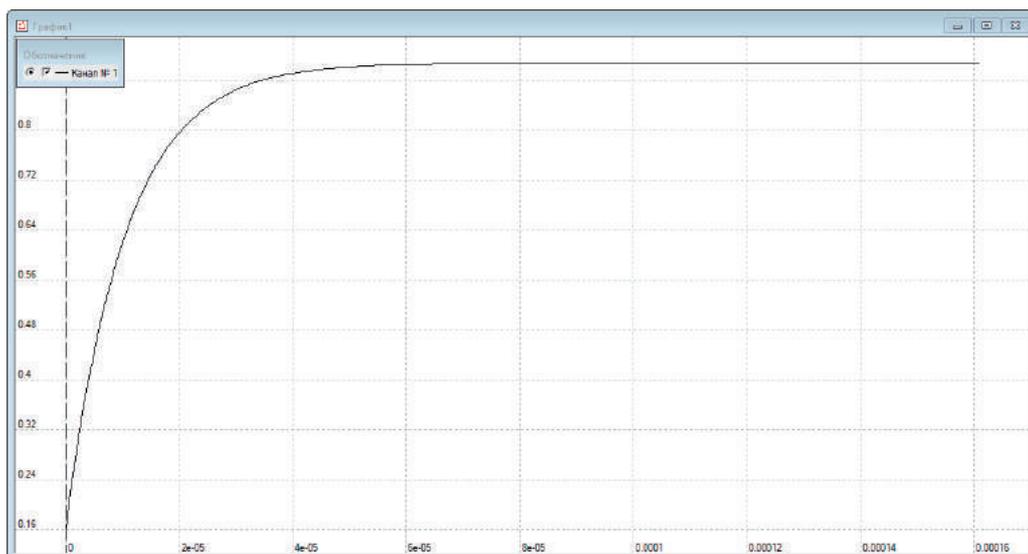
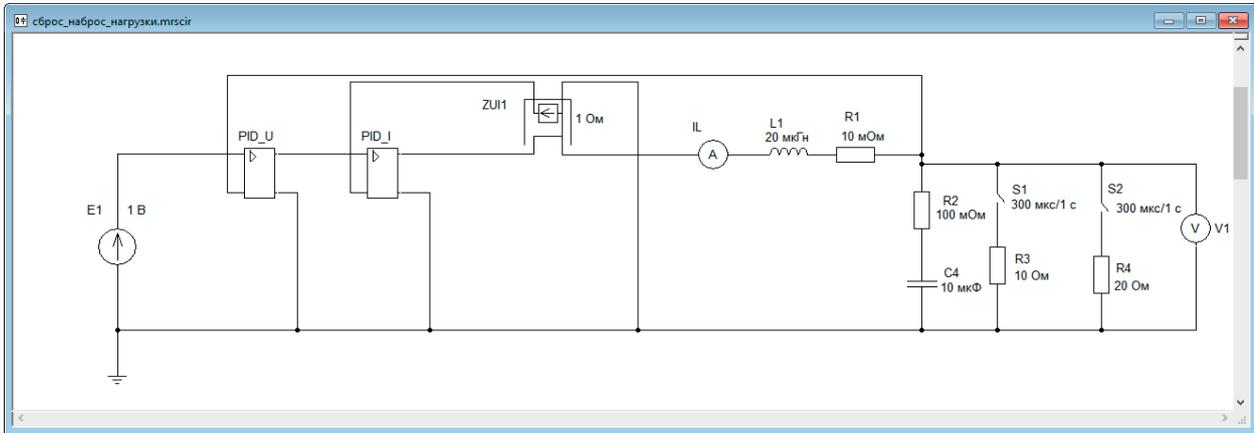


Рисунок 8. Переходная характеристика при значениях коэффициентов регулятора, полученных в ходе оптимизации

Figure 8. Transient response at the values of the regulator coefficient obtained during optimization

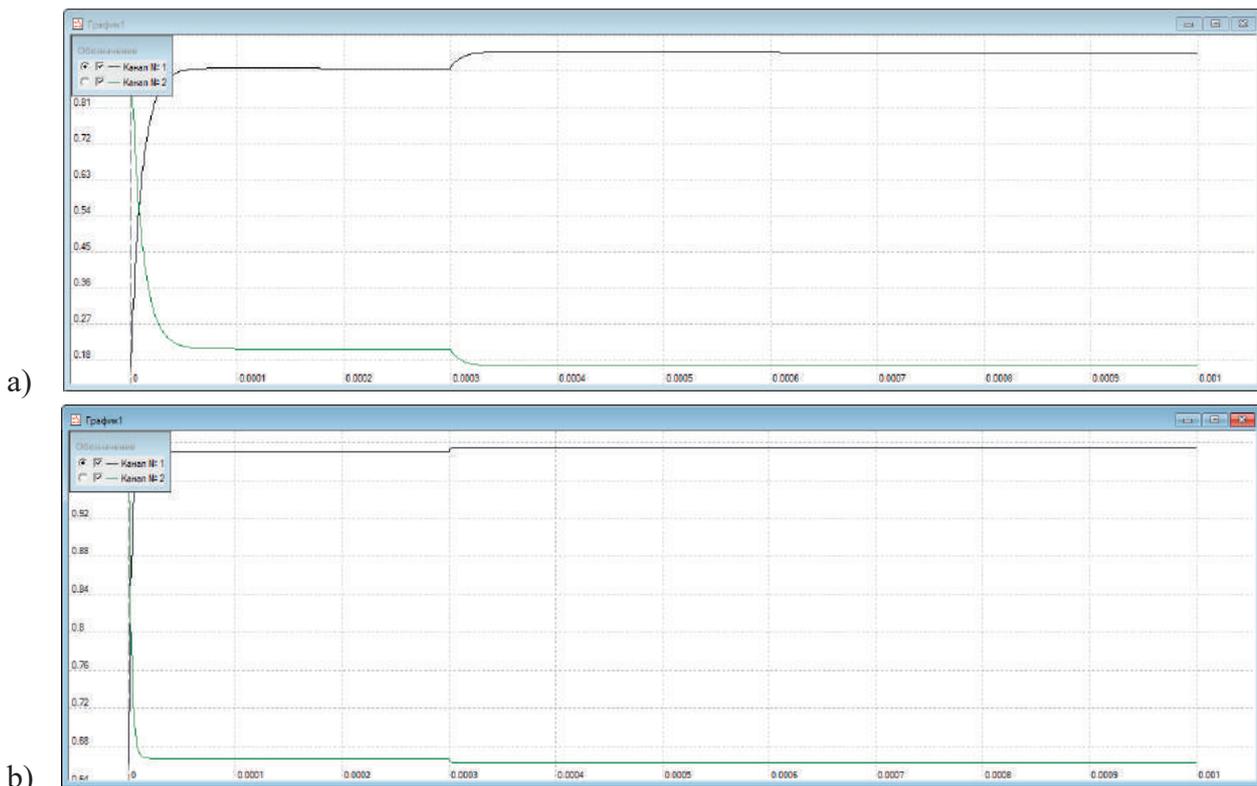
По графикам, представленным на рисунке 10, видно, что при найденных значениях коэффициентов ПИД-регуляторов тока и напряжения время

переходного процесса уменьшилось, следовательно, переключение любых режимов будет осуществляться оптимальным образом.



**Рисунок 9.** Модель понижающего преобразователя при сбросе/набросе нагрузки

**Figure 9.** Model of the step-down converter when the load is set/reset



a)

b)

a) с начальными значениями параметров ПИД-регуляторов

b) со значениями параметров ПИД-регуляторов, полученных в результате оптимизации

a) with the initial values of the parameters of the PID controllers

b) with the values of the parameters of the PID controllers obtained as a result of optimization

**Рисунок 10.** Результаты анализа модели понижающего преобразователя при сбросе/набросе нагрузки

**Figure 10.** The results of the analysis of the model of the step-down converter collecting/loading the load

## Выводы

В статье на примере компьютерной модели понижающего преобразователя разобран принцип использования многоуровневой компьютерной модели для определения значений параметров ПИД-регуляторов, обеспечивающих наилучшие динамические характеристики при изменении значений источника входного напряжения и нагрузки. Для автоматизации решения данной задачи был использован отечественный программный продукт «Среда моделирования МАРС», позволяющая формировать многоуровне-

вую компьютерную модель объекта исследования, совмещенную с алгоритмом решения задач, в основе которого лежит многократный анализ модели исследуемого объекта при различных значениях параметров входящих в модель компонентов. Предложенный принцип решения задачи определения коэффициентов ПИД-регуляторов может быть применен для различных динамических объектов, описание которых допустимо с помощью линейных и дифференциальных уравнений.

## Список источников

1. Белов Г.А. Динамика импульсных преобразователей. Чебоксары: Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, 2001. 528 с. ISBN 5-7677-0451-1. EDN TPYMJF.
2. Мелешин В.И., Овчинников Д.А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. М.: Техносфера, 2011. 576 с.
3. Коршунов А. Предельная непрерывная модель системы с периодическим высокочастотным изменением структуры // Силовая электроника. 2021. № 5(92). С. 48-51. EDN SXWXQB.
4. Дмитриев В.М., Шутенков А.В., Зайченко Т.Н., Ганджа Т.В. МАРС — среда моделирования технических устройств и систем. Томск: В-Спектр, 2011. 277 с. ISBN 978-5-91191-220-1. EDN QMWTJV.
5. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В. Принцип формирования многоуровневых компьютерных моделей SCADA-систем для управления сложными технологическими объектами // Информатика и системы управления. 2013. № 2(36). С. 024–035.
6. Дмитриев В.М., Арайс Л.А., Шутенков А.В. Автоматизация моделирования промышленных роботов. М.: Научно-техническое издательство «Машиностроение», 1995. 304 с. ISBN 5-217-01271-4. EDN ZUSCEZ.
7. Дмитриев В.М., Шутенков А.В., Ганджа Т.В. Архитектура универсального вычислительного ядра для реализации виртуальных лабораторий // Инструменты и системы. Управление. Контроль, диагностика. 2004. № 2. С. 24–28. EDN WYGKJX.
8. Григорьева Т.Е. Дискретно-событийное моделирование в СМ МАРС для курса «Системы массового обслуживания» // Доклады Томского государственного университета систем управле-

ния и радиоэлектроники. 2014. № 1(31). С. 152–155. EDN SFKPFB.

9. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Панов С.А. Система виртуальных инструментов и приборов для автоматизации учебных и научных экспериментов // Программные продукты и системы. 2016. № 3. С. 154–162. EDN XEPQJR.
10. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1988. 128 с.
11. Носач В.В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров. М.: Микап, 1994. 382 с.

## References

1. Belov G.A. *Dinamika impul'snykh preobrazovatelei* [Dynamics of Power Converters]. Choboksary: Chuvashskii gosudarstvennyi universitet im. I.N. Ul'yanova, 2001. 528 p. ISBN 5-7677-0451-1. EDN TPYMJF. [in Russian].
2. Meleshin V.I., Ovchinnikov D.A. *Upravlenie tranzistornymi preobrazovatelyami elektroenergii* [Control of Transistorized Power Converters]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011. 576 p. [in Russian].
3. Korshunov A. Predel'naya nepreryvnaya model' sistemy s periodicheskim vysokochastotnym izmeneniem struktury [Limiting Continuous Model of a System with Periodic High-Frequency Structure Changes]. *Silovaya elektronika — Power Electronics*, 2021, No. 5 (92), pp. 48–51. EDN SXWXQB. [in Russian].
4. Dmitriev V.M., Shutenkov A.V., Zaichenko T.N., Gandzha T.V. *MARS — sreda modelirovaniya tekhnicheskikh ustroystv i sistem* [MARS — Environment for Modeling Technical Devices and Systems]. Tomsk, V-Spektr Publ., 2011. 277 p. ISBN 978-5-91191-220-1. EDN QMWTJV. [in Russian].

5. Dmitriev V.M., Gandzha T.V. Printsip formirovaniya mnogourovnevnykh komp'yuternykh modelei SCADA-sistem dlya upravleniya slozhnymi tekhnologicheskimi ob'ektami [The Principle of Formation of Multilevel Computer Models of SCADA Systems for Managing Complex Technological Objects]. *Informatika i sistemy upravleniya — Informatics and Control Systems*, 2013, No. 2(36), pp. 024–035. [in Russian].

6. Dmitriev V.M., Arais L.A., Shutenkov A.V. *Avtomatizatsiya modelirovaniya promyshlennykh robotov* [Automation of Modeling of Industrial Robots]. Moscow, Nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo «Mashinostroenie», 1995. 304 p. ISBN 5-217-01271-4. EDN ZUSCEZ. [in Russian].

7. Dmitriev V.M., Shutenkov A.V., Gandzha T.V. Arkhitektura universal'nogo vychislitel'nogo yadra dlya realizatsii virtual'nykh laboratorii [The Architecture of a Universal Computing Kernel for the Implementation of Virtual Laboratories]. *Instrumenty i sistemy. Upravlenie. Kontrol', diagnostika — Instruments and Systems. Management. Control, Diagnostic*, 2004, No. 2, pp. 24–28. EDN WYGKJX. [in Russian].

8. Grigor'eva T.E. Diskretno-sobytiinoe modelirovanie v SM MARS dlya kursa «Sistemy

massovogo obsluzhivaniya» [Discrete-Event Modeling in the Simulate Environment MARS]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki — Reports of TUSUR*, 2014, No. 1(31), p. 152–155. EDN SFKPFB. [in Russian].

9. Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Panov S.A. Sistema virtual'nykh instrumentov i priborov dlya avtomatizatsii uchebnykh i nauchnykh eksperimentov [System of Virtual Instruments and Devices for Automation of Education and Scientific Experiments]. *Programmnye produkty i sistemy — Software & System*, 2016, No. 3, pp. 154–162. EDN XEPQJR. [in Russian].

10. Bandi B. *Metody optimizatsii. Vvodnyi kurs: Per. s angl.* [Optimization Methods. Introductory Course: Transl. from Engl.]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1988. 128 p. [in Russian].

11. Nosach V.V. *Reshenie zadach approksimatsii s pomoshch'yu personal'nykh komp'yuterov* [Solving Approximation Tasks Using Personal Computers]. Moscow, Mikap, 1994. 382 p. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 17.02.2023; одобрена после рецензирования 01.03.2023; принята к публикации 16.03.2023.*

*The article was submitted 17.02.2023; approved after reviewing 01.03.2023; accepted for publication 16.03.2023.*

Научная статья

УДК 681.518.22

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-30-42

## НАСТРОЙКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАБЛЮДАТЕЛЯ УГЛОВОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Александр Савельевич Глазырин****Alexander S. Glazyrin**

доктор технических наук,  
профессор отделения электроэнергетики и электротехники,  
Томский политехнический университет,  
Томск, Россия

**Сергей Николаевич Кладиев****Sergey N. Kladiyev**

кандидат технических наук,  
доцент отделения электроэнергетики и электротехники,  
Томский политехнический университет,  
Томск, Россия

**Вадим Владимирович Тимошкин****Vadim V. Timoshkin**

кандидат технических наук,  
доцент отделения электроэнергетики и электротехники,  
Томский политехнический университет,  
Томск, Россия

**Евгений Владимирович Боловин****Evgeniy V. Bolovin**

кандидат технических наук,  
доцент отделения электроэнергетики и электротехники,  
Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск

**Людмила Евгеньевна Козлова****Lyudmila E. Kozlova**

кандидат технических наук,  
доцент отделения электроэнергетики и электротехники,  
Томский политехнический университет,  
Томск, Россия

**Иван Альбертович Набунский****Ivan A. Nabunskiy**

аспирант отделения электроэнергетики и электротехники,  
Томский политехнический университет,  
Томск, Россия

**Иван Витальевич Раков****Ivan V. Rakov***инженер 1 категории**группы внедрения инноваций и изобретательской деятельности,**ООО «Газпром трансгаз Томск»,**Томск, Россия***Семен Семенович Попов****Semen S. Popov***техник-конструктор 1 категории,**АО «НПЦ «Полюс»,**Томск, Россия***Актуальность**

В современных замкнутых регулируемых электроприводах, используемых в производстве, требуется применение в канале обратной связи датчиков скорости, тока, момента и других технологических величин. В отдельных случаях требуется косвенная оценка вектора переменных состояния электропривода, когда использование датчиков технологических параметров (прежде всего датчиков скорости) затруднительно или невозможно. Одной из проблем является протяженность информационного кабеля в канале обратной связи от исполнительного механизма к силовому преобразователю, что затрудняет использование прямых способов измерения, также возникают сложности применения датчиков в агрессивной окружающей среде. Например, в такой отрасли, как угледобывающая промышленность, зачастую электродвигатели или весь электропривод находятся в взрывозащищенном корпусе, и установка дополнительных датчиков потребует дорогостоящей модернизации всей системы.

Наблюдатели состояния в бездатчиковых электроприводах позволяют восстановить неизмеряемые компоненты вектора переменных состояния на основе измеряемых электрических сигналов в силовых преобразователях электропривода.

С точки зрения замкнутой системы регулируемого электропривода основной обратной связью является обратная связь по угловой частоте вращения. Более простым для исследования и реализации таких систем является электропривод на базе двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ). Линеаризованная математическая модель ДПТ НВ содержит относительно меньшее число дифференциальных уравнений по сравнению с двигателями переменного тока из-за наличия независимых каналов формирования магнитного потока в воздушном зазоре и электромагнитного момента, что упрощает анализ и синтез бездатчиковой системы управления с использованием наблюдателей угловой частоты вращения. Исследование наблюдателя угловой частоты вращения для регулируемых электроприводов постоянного тока дает возможность отработать навыки проектирования на более простой системе и перейти затем к электроприводам переменного тока.

Исследования в данном направлении как для электроприводов постоянного, так и для переменного тока являются перспективными, потому что позволяют увеличить диапазон регулирования и обеспечить точность выходной координаты в бездатчиковом электроприводе

**Ключевые слова**

наблюдатель переменных состояния, двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, бездатчиковый электропривод, невязка, системы обыкновенных дифференциальных уравнений

на требуемом уровне. Данная статья посвящена исследованию свойств наблюдателей угловой частоты вращения ДПТ НВ различных структур.

#### **Цель исследования**

Анализ структуры наблюдателя угловой частоты вращения в электроприводах постоянного тока с пропорциональным способом обработки невязки по току.

#### **Методы исследования**

В данном исследовании были использованы теоретические и экспериментальные методы исследования. К теоретическим методам относятся: теория автоматического управления, теория наблюдателей состояния, теория электропривода, теория электрических машин, математические модели, системы дифференциальных уравнений, преобразования Лапласа, численные методы решения дифференциальных уравнений. Экспериментальные исследования проводились на программно-аппаратном комплексе, где для идентификации параметров схемы замещения электрической машины использовался метод генетического алгоритма.

#### **Результаты**

Получено аналитическое выражение корней характеристического уравнения для исследуемой структуры наблюдателя угловой частоты вращения ДПТ НВ. Определены критерии устойчивости и тенденции изменения показателей качества оценки угловой скорости при варьировании коэффициента наблюдателя.

**Для цитирования:** Глазырин А. С., Кладиев С. Н., Тимошкин В. В., Боловин Е. В., Козлова Л. Е., Набунский И. А., Раков И. В., Попов С. С. Настройка и исследование режимов работы наблюдателя угловой частоты вращения регулируемого электропривода постоянного тока // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 2. Т. 19. С. 30-42. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-30-42>.

Original article

## **SETUP AND INVESTIGATION OF THE OPERATION MODES OF THE SPEED OBSERVER IN A CONTROLLED DC ELECTRIC DRIVE**

#### **Relevance**

In modern closed-loop controlled electric drives used in manufacturing, the use of speed, current, torque, and other technological variable sensors is required. In some cases, indirect estimation of the electric drive state vector is required, when the use of technological parameter sensors (primarily speed sensors) is difficult or impossible. One of the problems is the length of the information cable in the feedback channel from the actuator to the power converter, which makes it difficult to use direct measurement methods. There are also difficulties in using sensors in an aggressive environment. For example, in the coal mining industry, electric motors or the entire electric drive are often located in an explosion-proof enclosure, and installing additional sensors will require expensive modernization of the entire system.

State observers in sensorless electric drives allow restoring unmeasurable state vector components based on measured electrical signals in the power converters of the electric drive.

From the perspective of a closed-loop controlled electric drive system, the main feedback is the feedback on the angular rotation frequency. Electric drives based on separately excited DC motors (SEDC) are simpler

#### **Keywords**

state observer, separately excited direct current motor, sensorless electric drive, error, ordinary differential equations systems

to investigate and implement such systems. The linearized mathematical model of an SEDC contains a relatively smaller number of differential equations compared to variable frequency drives due to the presence of independent channels for forming magnetic flux in the air gap and electromagnetic torque, which simplifies the analysis and synthesis of sensorless control systems using speed observers.

Researching the observer of angular rotation for DC electric drives allows for developing design skills on a simpler system before moving on to variable frequency drives. Research in this area for both DC and AC electric drives is promising because it allows for an increased range of regulation and accuracy of the output coordinate in sensorless electric drives at the required level. This article is dedicated to the study of the properties of speed observers for DC electric drives with independent excitation of various structures.

#### **Aim of research**

Analysis of rotation frequency observer structure in DC motor drives with error reduction based on the proportional principle.

#### **Research methods**

Theoretical and experimental research methods were used in this study. Theoretical methods included the theory of automatic control, state observer theory, theory of electric drives, theory of electric machines, mathematical modeling, systems of differential equations, Laplace transforms, and numerical methods for solving differential equations. Experimental studies were conducted on a software-hardware complex, where the genetic algorithm method was used to identify the parameters of the electric machine equivalent circuit.

#### **Results**

Analytical expression for the characteristic equation roots for the investigated structure of the DC motor drive's speed observer was obtained. Based on this expression, stability criteria and trends in changes of the quality indicators for the angular velocity estimation were determined with varying observer coefficients.

**For citation:** Glazyrin A. S., Kladiev S. N., Timoshkin V. V., Bolovin E. V., Kozlova L. E., Nabunskiy I. A., Rakov I. V., Popov S. S. Nastroyka i issledovanie rezhimov raboty nablyudatelya uglovoi chastoty vrashcheniya reguliruemogo elektroprivoda postoyannogo toka [Setup and Investigation of the Operation Modes of the Speed Observer in a Controlled DC Electric Drive]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 2, Vol. 19, pp. 30-42. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-30-42>.

#### **Введение**

В современных замкнутых регулируемых электроприводах, используемых в производстве, требуется применение в канале обратной связи датчиков скорости, тока, момента и других технологических величин [1–5]. В отдельных случаях требуется косвенная оценка вектора переменных состояния электропривода [6–10], когда использование датчиков технологических параметров (прежде всего датчиков скорости) затруднительно или невозможно. Одной из проблем является протяженность информационного

кабеля в канале обратной связи от исполнительного механизма к силовому преобразователю, что затрудняет использование прямых способов измерения, также возникают сложности применения датчиков в агрессивной окружающей среде [11]. Например, в такой отрасли, как угледобывающая промышленность, зачастую электродвигатели или весь электропривод находятся в взрывозащищенном корпусе, и установка дополнительных датчиков потребует дорогостоящей модернизации всей системы [12].

Наблюдатели состояния в бездатчиковых электроприводах позволяют восстановить неизмеряемые компоненты вектора переменных состояния на основе измеряемых электрических сигналов в силовых преобразователях электропривода [13].

С точки зрения замкнутой системы регулируемого электропривода основной обратной связью является обратная связь по угловой частоте вращения. Более простым для исследования и реализации таких систем является электропривод на базе двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ). Линеаризованная математическая модель ДПТ НВ содержит относительно меньшее число дифференциальных уравнений по сравнению с двигателями переменного тока из-за наличия независимых каналов формирования магнитного потока в воздушном зазоре и электромагнитного момента, что упрощает анализ и синтез бездатчиковой системы управления с использованием наблюдателей угловой частоты вращения [14]. Исследование наблюдателя угловой частоты вращения для регулируемых электроприводов постоянного тока дает возможность отработать навыки проектирования на более простой системе и перейти затем к электроприводам переменного тока.

Исследования в данном направлении как для электроприводов постоянного, так и для переменного тока являются перспективными, потому что позволяют увеличить диапазон регулирования и обеспечить точность выходной координаты в бездатчиковом электроприводе на требуемом уровне [15–19].

#### **Линеаризованная математическая модель двигателя постоянного тока независимого возбуждения**

Для составления математического описания наблюдателя необходимо рассмотреть динамику объекта наблюдения

— двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ). Для этого приняты следующие допущения: механическая система абсолютно жесткая и считается одностепенной; момент сопротивления не изменяется; масса вращающихся частей постоянная; активное и индуктивное сопротивление не изменяются во время работы; магнитный поток постоянен (реакция якоря считается полностью скомпенсированной) [14].

Математическая модель ДПТ НВ в виде системы дифференциальных уравнений (СДУ) в нормальной форме Коши с учетом принятых допущений:

$$\begin{cases} \frac{di_{\text{я}}(t)}{dt} = \frac{u_{\text{я}}(t) - R_{\text{я}} \cdot i_{\text{я}}(t) - c_{\text{дв}} \cdot \omega(t)}{L_{\text{я}}}, \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{c_{\text{дв}} \cdot i_{\text{я}}(t) - M_{\text{с}}(t)}{J_{\text{э}}}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $R_{\text{я}}$ ,  $L_{\text{я}}$ ,  $c_{\text{дв}}$  — суммарные активное и индуктивное сопротивление, коэффициент связи ДПТ НВ;

$i_{\text{я}}(t)$ ,  $u_{\text{я}}(t)$ ,  $\omega(t)$  — мгновенные значения тока, напряжения и угловой частоты вращения якоря;

$J_{\text{э}}$  — эквивалентный момент инерции, приведенный к валу якоря;

$M_{\text{с}}(t)$  — мгновенное значение момента сопротивления.

Поскольку все координаты в электроприводе удовлетворяют условиям оригинала исходной функции [20], в частности координаты в СДУ (1), то произведем одностороннее прямое преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях и с учетом некоторых математических преобразований [14] получим систему (2) в изображениях, где  $p$  — комплексная переменная.

$$\begin{cases} I_{\text{я}}(p) = \frac{1}{R_{\text{я}}} \left[ U_{\text{я}}(p) - c_{\text{дв}} \cdot \omega(p) \right], \\ \omega(p) = \frac{1}{p} \left( \frac{c_{\text{дв}} \cdot I_{\text{я}}(p) - M_{\text{с}}(p)}{J_{\text{э}}} \right), \end{cases} \quad (2)$$

где  $c_{дв} \cdot I_{я}(p) = M(p)$  — изображение электромагнитного момента;

$M(p) - M_c(p) = \Delta M(p)$  — изображение динамического момента;

$\Delta U = U_{я}(p) - c_{дв} \cdot \omega(p)$  — разность изображений напряжения якоря и противо-ЭДС вращения;

$I_{я}(p), U_{я}(p), \omega(p)$  — изображения тока, напряжения и угловой частоты вращения якоря.

По системе (2) строится структурная схема ДПТ НВ (рисунок 1).

Для построения наблюдателя и оценки частоты вращения  $\hat{\omega}(t)$  ДПТ НВ применяются измеряемые электрические сигналы якорной цепи с датчиков напряжения  $u_{я}(t)$  и тока  $i_{я}(t)$ .

**Наблюдатель угловой частоты вращения ДПТ НВ с пропорциональным способом обработки сигнала невязки**

Классический наблюдатель Люенбергера полного порядка с пропорциональным (П) принципом коррекции обрабатывает невязку  $\Delta \hat{i}_{я}(t) = i_{я}(t) - \hat{i}_{я}(t)$  отклика системы  $i_{я}(t)$  и оценки  $\hat{i}_{я}(t)$  с коэффициентом передачи  $k_{пл}$ . Оценка тока якоря  $\hat{i}_{я}(t)$  является промежуточной для расчета оценки частоты вращения  $\hat{\omega}(t)$ . Согласно теории автоматического управления, над наблюдаемыми координатами динамической системы устанавливается дополнительный знак. Введем допущение, что реальные параметры схемы замещения двигателя и механической системы и

параметры, используемые в наблюдателе, известны, одинаковые и не изменяются во время всего периода работы.

Система дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши для описания динамики наблюдателя ДПТ НВ с П-принципом обработки невязки:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_{я}(t)}{dt} = \frac{u_{я}(t) - \hat{i}_{я}(t) \cdot R_{я} - k_{пл} \cdot [i_{я}(t) - \hat{i}_{я}(t)] - \hat{\omega}(t) \cdot c_{дв}}{L_{я}}, \\ \frac{d\hat{\omega}(t)}{dt} = \frac{\hat{i}_{я}(t) \cdot c_{дв}}{J_{я}}. \end{cases} \quad (3)$$

СДУ (3) в изображениях по Лапласу при нулевых начальных условиях с некоторыми математическими преобразованиями:

$$\begin{cases} \hat{I}_{я}(p) = \frac{1/R_{я} \cdot ([U_{я}(p) - \hat{\omega}(p) \cdot c_{дв}] - k_{пл} \cdot [I_{я}(p) - \hat{I}_{я}(p)])}{\frac{L_{я}}{R_{я}} p + 1}, \\ \hat{\omega}(p) = \frac{\hat{I}_{я}(p) \cdot c_{дв}}{J_{я}}, \end{cases}$$

где  $\hat{I}_{я}(p), \hat{\omega}(p)$  — изображения оценок тока и скорости вращения якоря.

На рисунке 2 приведена структурная схема рассматриваемого наблюдателя с соответствующими изображениями оценок величин из структуры ДПТ НВ (рисунок 1). При этом для наглядности аperiodическое звено представляется в виде интегратора, охваченного отрицательной обратной связью.

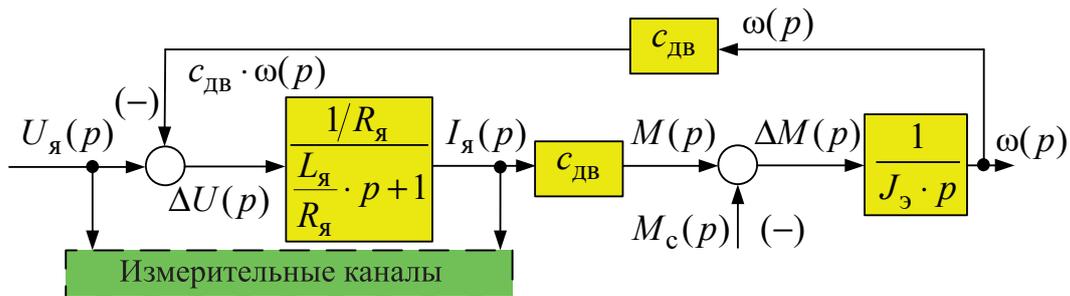


Рисунок 1. Структурная схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Figure 1. Block-diagram of separately excited direct current motor

Настройку коэффициента передачи обработки невязки  $k_{л1}$  следует производить при обработке управляющих (при  $M_c = 0$ ) и возмущающих воздействий ( $U_{я} = \text{const}$ ) на систему.

Получим передаточную функцию системы (рисунок 2), состоящую из контуров наблюдателя и ДПТ НВ:

$$W(p) = \frac{\Delta \hat{I}_я(p)}{U_я(p)}$$

с помощью преобразований структурной схемы (рисунок 3) [21].

Передаточное отношение ДПТ НВ сведем к упрощенному виду:

$$\begin{aligned} W_{дв}(p) &= \frac{1}{R_я + L_я \cdot p} = \frac{1}{1 + \frac{1}{R_я + L_я \cdot p} \cdot \frac{c_{дв}^2}{J_э \cdot p}} \\ &= \frac{1}{R_я + L_я \cdot p + \frac{c_{дв}^2}{J_э \cdot p}} = \frac{1/R_я}{1 + \frac{L_я}{R_я} \cdot p + \frac{1}{\frac{J_э \cdot R_я}{c_{дв}^2} \cdot p}} \\ &= \frac{1/R_я}{1 + T_я \cdot p + \frac{1}{T_M \cdot p}} = \frac{T_M \cdot 1/R_я \cdot p}{T_M T_я \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1}, \end{aligned}$$

где  $T_M = \frac{J_э \cdot R_я}{c_{дв}^2}$  — электромеханическая постоянная времени ДПТ НВ;

$T_я = \frac{L_я}{R_я}$  — электромагнитная постоянная.

Передаточную функцию наблюдателя приведем к виду:

$$\begin{aligned} W_n(p) &= \frac{\frac{1}{R_я} \cdot J_э \cdot \left(\frac{L_я}{R_я} p + 1\right) \cdot p}{\left(\frac{L_я}{R_я} p + 1\right) \left[ c_{дв}^2 \cdot \frac{1}{R_я} - k_{л1} \cdot \frac{1}{R_я} \cdot J_э \cdot p + J_э \cdot \left(\frac{L_я}{R_я} p + 1\right) \cdot p \right]} \\ &= \frac{1/R_я}{1 + \frac{L_я}{R_я} \cdot p + \frac{1}{\frac{J_э \cdot R_я}{c_{дв}^2} \cdot p} - k_{л1} \cdot \frac{1}{R_я}} = \frac{T_M \cdot 1/R_я \cdot p}{T_M T_я \cdot p^2 + T_M \cdot (1 - \frac{k_{л1}}{R_я}) \cdot p + 1}. \end{aligned}$$

Тогда передаточная функция системы ДПТ НВ и наблюдателя с учетом элементарных преобразований структурных схем:

$$\begin{aligned} W(p) &= \frac{W_n(p) \cdot W_{дв}(p)}{W_n(p)} = \frac{T_M \cdot 1/R_я \cdot p \cdot \left[ T_M T_я p^2 + T_M \left(1 - \frac{k_{л1}}{R_я}\right) p + 1 \right]}{\left( T_M T_я p^2 + T_M \left(1 - \frac{k_{л1}}{R_я}\right) p + 1 \right) \left[ T_M T_я p^2 + T_M p + 1 \right]}. \quad (4) \end{aligned}$$

Рассмотрим расположение корней на комплексной плоскости полинома знаменателя  $W(p)$  (4). Полином представляет

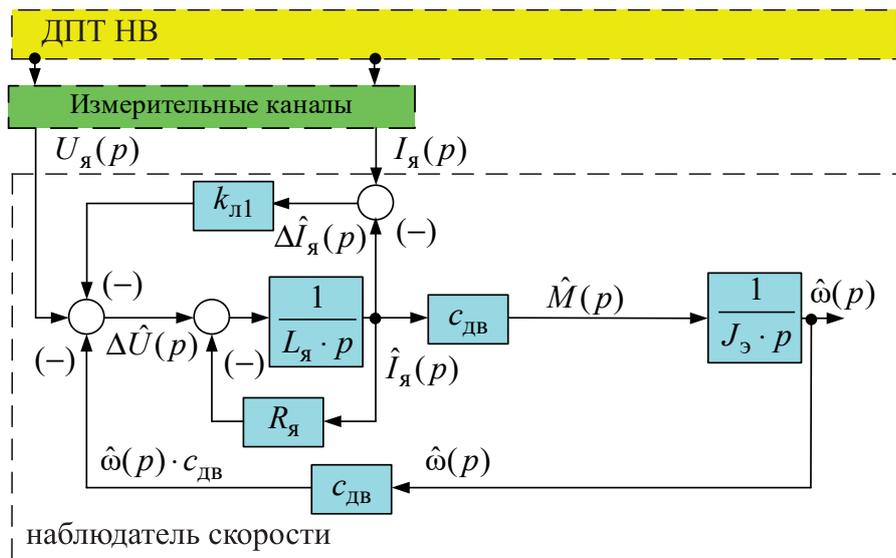
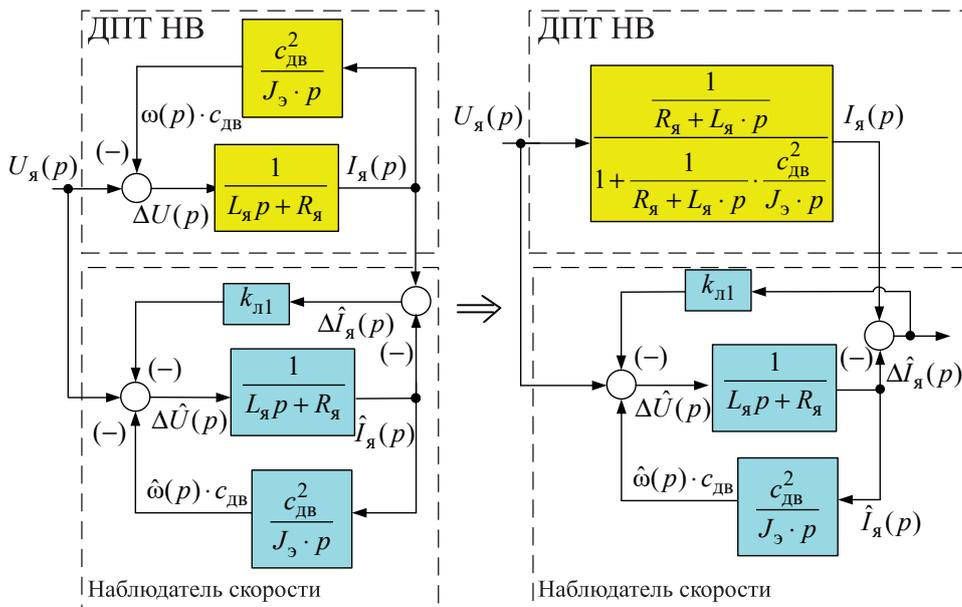


Рисунок 2. Структурная схема наблюдателя Льюенбергера скорости ДПТ НВ полного порядка с усилением невязки по П-принципу

Figure 2. Block-diagram of a full-order Luenberger speed observer for a separately excited DC motor with error amplification based on the proportional principle



**Рисунок 3.** Эквивалентные преобразования структурных схем ДПТ НВ и наблюдателя

**Figure 3.** Equivalent transformations of the block-diagrams of a separately excited DC motor and speed observer

из себя произведение двух элементарных полиномов, записанных в скобках. Учтем априорную информацию при исследовании этого полинома, что объектом наблюдения является ДПТ НВ, тогда отбросим варианты решения, когда дискриминанты уравнения равны нулю или положительные, не имеющие физического смысла для данного объекта. Поэтому дискриминанты только отрицательные, и характеристическое уравнение имеет две пары комплексно-сопряженных корней. Обе пары решений смещаются с изменением параметров схемы замещения двигателя и механической системы. При этом одна из пар корней зависит от коэффициента передачи отработки невязки наблюдателя  $k_{л1}$ , связанная с собственными числами полинома знаменателя, относящаяся к структуре наблюдателя, а другая, зависящая от структуры ДПТ НВ, — нет. Для достижения целей исследования порядок полинома знаменателя уравнения (4) является избыточным. Статья посвящена исследованию работы наблюдателя при вышеописанном допущении стационарности рассматриваемой динамической системы. На основании этого

расположение корней полинома ДПТ НВ является неподвижным. Целесообразно понизить порядок полинома знаменателя, отбросив выражение, находящееся в правой скобке, представляющий собой второй элементарный полином, от которого зависят корни характеристического уравнения ДПТ НВ.

Выразим область определения  $k_{л1}$  из соображения, что система устойчива, если вещественная часть корней характеристического уравнения отрицательна (находятся в левой комплексной плоскости):

$$\begin{aligned}
 \text{den}[W_H(p)] &= T_M T_\gamma p^2 + T_M \left(1 - \frac{k_{л1}}{R_\gamma}\right) p + 1 = 0 \Rightarrow \\
 &\Rightarrow T_M T_\gamma \lambda^2 + T_M \left(1 - \frac{k_{л1}}{R_\gamma}\right) \lambda + 1 = 0 \\
 \lambda_{1,2} &= \frac{-T_M \left(1 - \frac{k_{л1}}{R_\gamma}\right) \pm \sqrt{T_M^2 \left(1 - \frac{k_{л1}}{R_\gamma}\right)^2 - 4T_M T_\gamma}}{2T_M T_\gamma} \Rightarrow (5) \\
 \text{Re}(k_{л1}) &= \frac{-T_M \left(1 - \frac{k_{л1}}{R_\gamma}\right)}{2T_M T_\gamma} = \frac{k_{л1} - 1}{2T_\gamma} < 0 \Rightarrow k_{л1} < R_\gamma.
 \end{aligned}$$

Введем дополнительное ограничение, что  $k_{\pi 1} > 0$ , т.к. иначе нарушится отрицательная обратная связь в структуре, тогда получим область определения коэффициента передачи отработки невязки

$$0 < k_{\pi 1} < R_{\text{я}}, \quad (6)$$

в котором система устойчива, при этом  $k_{\pi 1} = R_{\text{я}}$  является значением на границе устойчивости системы. А при  $k_{\pi 1} = 0$  корни уравнения наблюдателя повторяют корни ДПТ НВ. Но такая ситуация не имеет смысла, т.к. наблюдатель в этом случае является неработоспособным, потому что не поступает информация о динамике развития невязки.

Получим также зависимость мнимой части корней характеристического уравнения наблюдателя от коэффициента передачи:

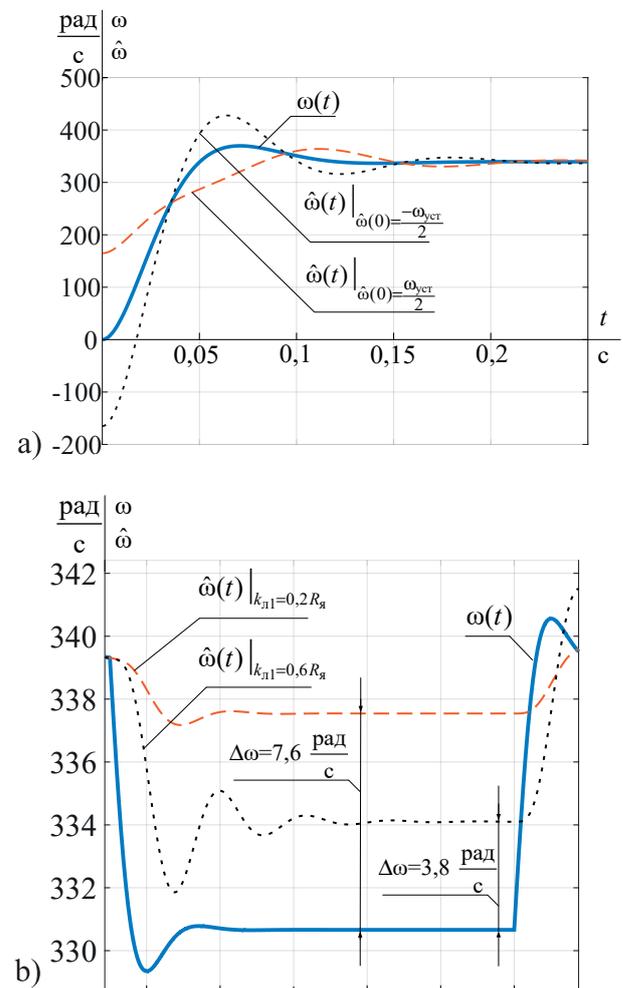
$$\begin{aligned} \text{Im}(k_{\pi 1}) &= \frac{\sqrt{T_M^2 \left(1 - \frac{k_{\pi 1}}{R_{\text{я}}}\right)^2 - 4T_M T_{\text{я}}}}{2T_M T_{\text{я}}} = \\ &= \frac{\sqrt{T_M^2 \left(1 - 2\frac{k_{\pi 1}}{R_{\text{я}}} + \left[\frac{k_{\pi 1}}{R_{\text{я}}}\right]^2\right) - 4T_M T_{\text{я}}}}{2T_M T_{\text{я}}}. \quad (7) \end{aligned}$$

Исходя из выражений (5) и (7), при увеличении  $k_{\pi 1}$  в области определения вещественная часть уменьшается, вплоть до нуля, т.е. до значения на границе устойчивости, а мнимая часть увеличивается. При этом вторая изменяется нелинейно.

#### Отработка рассогласования начальных условий и наброса нагрузки в наблюдателе скорости ДПТ НВ с пропорциональным способом отработки сигнала невязки

Проведем исследование функционирование наблюдателя с П-принципом отработки сигнала невязки в динамических режимах работы (рисунок 4), таких

как пуск при рассогласовании начальных условий и наброс нагрузки, на примере ДПТ НВ 2ПФ180МГУХЛ4 с номинальной мощностью  $P_{\text{н}} = 26$  кВт, напряжением  $U_{\text{н}} = 220$  В, частотой вращения  $n_{\text{н}} = 3150$  об/мин, КПД  $\eta = 89\%$ , суммарными индуктивностью  $L_{\text{я}} = 0,68$  мГн и сопротивлением  $R_{\text{я}} = 0,046$  Ом якорной цепи, эквивалентным моментом инерции  $J_{\text{э}} = 0,2$  кг·м<sup>2</sup> [22]. При этом активное сопротивление приведено к температуре 75 °С.

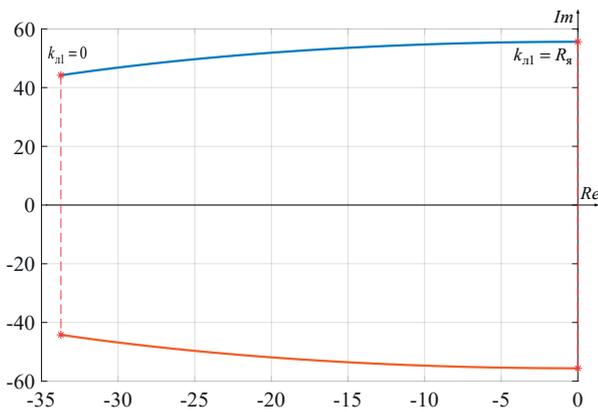


**Рисунок 4.** Отработка по пропорциональному принципу несогласованности начальных условий (а) и наброса нагрузки (б) в наблюдателе угловой скорости ДПТ НВ

**Figure 4.** Compensation of initial conditions and load disturbances using the proportional error amplification principle in the speed observer of a separately excited DC motor

Наблюдатель скорости ДПТ НВ, при условии выбора коэффициента передачи согласно области определения (6), асимптотически устойчив, в частности при  $k_{л1} = 0,2R_{я}$  (рисунок 4, а). А при  $k_{л1} = R_{я}$  переходный процесс оценки угловой скорости приобретает автоколебательную составляющую. При дальнейшем увеличении коэффициента передачи процессы начинают расходиться.

Наблюдатель с П-принципом обработки невязки при набросе нагрузки (рисунок 4, б) имеет статическую ошибку, снижающуюся при увеличении  $k_{л1}$ , при этом увеличивается колебательность и уменьшается запас устойчивости, а при нарушении области определе-



ния (6) наблюдатель становится неустойчивым. Для оценки тренда изменения положения корней наблюдателя по выражениям (5) и (7) построена комплексная плоскость (рисунок 5), на которой расположены особые точки для различных значений  $k_{л1}$ .

При увеличении  $k_{л1}$  вещественная часть комплексно-сопряженных корней до границы устойчивости уменьшается вместе со степенью колебательности  $m = \frac{Im}{Re}$ , которая, в свою очередь, характеризует степень затухания процесса. При большем коэффициенте передачи степень затухания меньше и процесс оценивания длится дольше.

**Рисунок 5.** Корни характеристического уравнения наблюдателя на комплексной плоскости при изменении  $k_{л1}$

**Figure 5.** Roots of the characteristic equation of the observer in the complex plane when  $k_{л1}$  is varies

## Выводы

1. Пропорциональный способ компенсации невязки в наблюдателе полного порядка ДПТ НВ позволяет получить асимптотически устойчивую оценку угловой частоты вращения в пределах области определения коэффициента передачи обработки невязки, даже при рассогласовании начальных условий наблюдателя и наблюдаемого объекта.

## Список источников

1. Шпиганович А.А., Пушница К.А., Чуркина Е.В., Федоров О.В. Особенности функционирования систем электроснабжения предприятий черной металлургии // Черные металлы. 2017. № 5. С. 56–61. EDN: YUNNDL.
2. Оливетский И.Н. Повышение эффективности геологоразведочного бурения за счёт при-

Но при этом в оценке присутствуют динамическая и статическая ошибки по возмущению.

2. Для варианта построения наблюдателя угловой частоты вращения ДПТ НВ получены выражения вещественной и мнимой части корней его характеристического уравнения, по которым можно оценить показатели качества переходных процессов наблюдателя.

менения частотно-регулируемого электропривода // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2009. № 2. С. 53–55. EDN: KYQEBT.

3. Калинин А.Г., Ларионов В.Н., Шепелин А.В. Эффективность применения регулируемого электропривода вытяжных вентиляторов

- // Вестник Чувашского университета. 2009. № 2. С. 126–132. EDN: KWHRPX.
4. Кугушева Н.Н., Семенов А.С., Якушев И.А., Павлова С.Н. Техничко-экономические особенности выбора частотно-регулируемых электроприводов для технологических установок алмазодобывающих предприятий // Инновации и инвестиции. 2021. № 1. С. 145–149. EDN: NBMMNS.
  5. Лезнов Б.С., Воробьев С.В. Энергетические основы использования регулируемого электропривода в насосных установках // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2012. № 10(58). С. 14–31. EDN: PCUJLR.
  6. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Колотило В.И. Системы управления электроприводами постоянного тока с наблюдателями состояния. Харьков: Изд-во ХГПУ, 1998. 117 с.
  7. Глазырин А.С., Ланграф С.В. Идентификация скорости и момента асинхронного двигателя с применением фильтра Калмана // Электричество. 2009. № 12. С. 61–63. EDN: KXNHAL.
  8. Афанасьев К.С. Разработка наблюдателя состояния для асинхронного электропривода с повышенной параметрической робастностью: дис. ... канд. тех. наук. Томск, 2015. 106 с.
  9. Luenberger D.G. Observing the State of a Linear System // IEEE Trans. Mil. Electron. 1964. Vol. 8. P. 74–80.
  10. Szabat K., Tran-Van T., Kamiński M. A Modified Fuzzy Luenberger Observer for a Two-Mass Drive System // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2015. Vol. 11. No. 2. P. 531–539.
  11. Стариков А.В., Стрижакова Е.В., Беляева О.С., Карим Альтахер А.А. Наблюдатель скорости вращения асинхронного двигателя // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. Т. 28. № 4(68). С. 155–166.
  12. Вареник Е.А. Перспективы комплексной разработки и организации производства взрывозащищенного и специального электрооборудования в рамках программы импортозамещения в промышленности Российской Федерации // Взрывозащищенное электрооборудование. 2016. № 1. С. 14–26. EDN: XWSJEX.
  13. Глазырин А.С. Пропорциональный и пропорционально-интегральный принципы отработки невязки в наблюдателе полного порядка электромеханического объекта с линеаризованной моделью // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2015. № 1(58). С. 28–39. EDN: TZGXKL.
  14. Глазырин А.С. Математическое моделирование электромеханических систем. Аналитические методы: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 216 с.
  15. Ланграф С.В., Глазырин А.С., Афанасьев К.С. Применение наблюдателя Люенбергера для синтеза векторных бездатчиковых асинхронных электроприводов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2011. № 6. С. 57–61. EDN: ООНСИТ.
  16. Макаров В.Г., Тамбов В.В. Анализ состояния и перспективы развития работ по бездатчиковому определению скорости электропривода // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 21. С. 245–248. EDN: RJUCER.
  17. Белов М.П., Белов А.М., Нгуен В.Л. Бездатчиковое векторное управление вентильным электроприводом на основе адаптивного расширенного фильтра Калмана // Электротехника. 2022. № 3. С. 9–16. EDN: BGTIJG.
  18. Шонин О.Б., Новожилов Н.Г., Крыльцов С.Б. Повышение устойчивости асинхронного электропривода с бездатчиковой скалярной системой управления при провалах напряжения сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 11–2. С. 507–520. EDN: XDYMQV.
  19. Панкратов В.В., Котин Д.А. Синтез адаптивных алгоритмов вычисления скорости асинхронного электропривода на основе второго метода Ляпунова // Электричество. 2007. № 8. С. 48–53. EDN: KVAASF.
  20. Пантелеев А.Д., Якимова А.С., Босов А.В. Обыкновенные дифференциальные уравнения в примерах и задачах: учебное пособие. М.: Высш. шк., 2001. 376 с.
  21. Шилин А.А., Ляпунов Д.Ю., Паюк Л.А., Ляпушкин С.В. Линейные системы в теории автоматического управления: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. 178 с.
  22. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. М.: Энергоатомиздат, 1988. Т. 1. 456 с.

## References

1. Shpiganovich A.A., Pushnitsa K.A., Churkina E.V., Fedorov O.V. Osobnosti funkcionirovaniya sistem elektrosnabzheniya predpriyatii chernoi metallurgii [Specifics of Operation of Power Supply Systems of Ferrous Metallurgy Enterprises]. *Chernye metally — Chernye metally*, 2017, No. 5, pp. 56–61. EDN: YUNNDL. [in Russian].
2. Olivetskii I.N. Povyshenie effektivnosti geologorazvedochnogo bureniya za schet primeneniya chastotno-reguliruemogo elektroprivoda [Increase in Efficiency of Exploration Drilling due

to Application of Variable-Frequency Electric Drive]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka — Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration*, 2009, No. 2, pp. 53–55. EDN: KYQEBT. [in Russian].

3. Kalinin A.G., Larionov V.N., Shepelin A.V. Effektivnost' primeneniya reguliruемого электропривода вытязных вентиляторов [Efficiency of Application of the Controlled-Velocity Electric Drive of Suction Fans]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta — Bulletin of the Chuvash University*, 2009, No. 2, pp. 126–132. EDN: KWHRPX. [in Russian].

4. Kugusheva N.N., Semenov A.S., Yakushev I.A., Pavlova S.N. Tekhniko-ekonomicheskie osobennosti vybora chastotno-reguliruemых электроприводов для технологических установок алмазодобычывающих предприятий [Technical and Economic Features of the Choice of Frequency-Controlled Electric Drives for Technological Units of Diamond Mining Enterprises]. *Innovatsii i investitsii — Innovations and Investments*, 2021, No. 1, pp. 145–149. EDN: NBMMNS. [in Russian].

5. Leznov B.S., Vorob'ev S.V. Energeticheskie osnovy ispol'zovaniya reguliruемого электропривода в насосных установках [Energy Basis for the Use of a Variable Speed Drive in Pumping Systems]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie — Water Purification. Water Treatment. Water Supply*, 2012, No. 10(58), pp. 14–31. EDN: PCUJLR. [in Russian].

6. Akimov L.V., Dolbnya V.T., Kolotilo V.I. Sistemy upravleniya электроприводami postoyanного тока с нablyudatelyami sostoyaniya [Control Systems for Direct Current Drives with State Observers]. Khar'kov, Izd-vo KhGPU, 1998. 117 p. [in Russian].

7. Glazyrin A.S., Langraf S.V. Identifikatsiya skorosti i momenta asinkhronного dvigatelya s primeneniem fil'tra Kalmana [Speed and Torque Identification of an Induction Motor Using a Kalman Filter]. *Elektrichestvo — Electricity*, 2009, No. 12, pp. 61–63. EDN: KXNHAL. [in Russian].

8. Afanas'ev K.S. *Razrabotka nablyudatelya sostoyaniya dlya asinkhronного электропривода s povyshennoi parametricheskoi robastnost'yu: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of a State Observer for Asynchronous Electric Drive with Increased Parametric Robustness: Cand. Sci. Engin.]. Tomsk, 2015. 106 p. [in Russian].

9. Luenberger D.G. Observing the State of a Linear System. *IEEE Trans. Mil. Electron.*, 1964, Vol. 8, pp. 74–80.

10. Szabat K., Tran-Van T., Kamiński M. A Modified Fuzzy Luenberger Observer for a Two-

Mass Drive System. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, Vol. 11, No. 2, pp. 531–539.

11. Starikov A.V., Strizhakova E.V., Belyaeva O.S., Karim Al'takher A.A. Nablyudatel' skorosti vrashcheniya asinkhronного dvigatelya [Asynchronous Motor Rotation Speed Observer]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvenного tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki — Vestnik of Samara State Technical University (Technical Sciences Series)*, 2020, Vol. 28, No. 4(68), pp. 155–166. [in Russian].

12. Varenik E.A. Perspektivy kompleksnoi razrabotki i organizatsii proizvodstva vzryvozashchishchennого i spetsial'nого электрооборудovaniya v ramkakh programmy importozameshcheniya v promyshlennosti Rossiiskoi Federatsii [Prospects for Integrated Development and Organization of Production of Explosion-Proof and Special Electrical Equipment in the Framework of Import Substitution Program in Industry of the Russian Federation]. *Vzryvozashchishchennoe elektrooborudovanie — Explosion-Proof Electrical Equipment*, 2016, No. 1, pp. 14–26. EDN: XWSJEX. [in Russian].

13. Glazyrin A.S. Proportsional'nyi i proporsional'no-integral'nyi printsipy otrabotki nevyazki v nablyudatele polного poryadka elektromekhanicheskого ob'ekta s linearizovannoi model'yu [Proportional and Proportional-Integral Principles of Testing the Observer Error in a Full-Order State Observer Applying a Linearized Model of an Electromechanical Object]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvenного tekhnicheskogo universiteta — Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2015, No. 1(58), pp. 28–39. EDN: TZGXKL. [in Russian].

14. Glazyrin A.S. *Matematicheskoe modelirovanie elektromekhanicheskikh sistem. Analiticheskie metody: uchebnoe posobie* [Mathematical Modeling of Electromechanical Systems. Analytical Methods: Textbook]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009, 216 p. [in Russian].

15. Langraf S.V., Glazyrin A.S., Afanas'ev K.S. Primenenie nablyudatelya Lyuenbergera dlya sinteza vektornykh bezdatchikovыkh asinkhronных электроприводов [Application of a Luenberger Observer for the Synthesis of Sensorless Vector Induction Electric Drives]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika — News of Higher Educational Institutions. Electromechanics*, 2011, No. 6, pp. 57–61. EDN: OOH CIT. [in Russian].

16. Makarov V.G., Tambov V.V. Analiz sostoyaniya i perspektivy razvitiya rabot po bezdatchikovomu opredeleniyu skorosti электропривода [Analysis of the Status and Prospects for the

Development of Sensorless Velocity Determination of Electric Drives]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta — Bulletin of the Kazan Technological University*, 2013, Vol. 16, No. 21, pp. 245–248. EDN: RJUCER. [in Russian].

17. Belov M.P., Belov A.M., Nguen V.L. Bezdatchikovoe vektornoe upravlenie ventil'nym elektroprivodom na osnove adaptivnogo rasshirenogo fil'tra Kalmana [Sensorless Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based Adaptive Extended Kalman Filter]. *Elektrotehnika — Russian Electrical Engineering*, 2022, No. 3, pp. 9–16. EDN: BGTIJG. [in Russian].

18. Shonin O.B., Novozhilov N.G., Kryl'tsov S.B. Povyszenie ustoychivosti asinkhronnogo elektroprivoda s bezdatchikovoi skalyarnoi sistemoi upravleniya pri provalakh napryazheniya seti [Enhancing the Stability of a Sensorless V/F Controlled VFD under Voltage Sags]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki — Izvestiya of the Tula State University. Technical Sciences*, 2016, No. 11–2, pp. 507–520. EDN: XDYMVQ. [in Russian].

19. Pankratov V.V., Kotin D.A. Sintez adaptivnykh algoritmov vychisleniya skorosti asinkhron-

nogo elektroprivoda na osnove vtorogo metoda Lyapunova [Synthesis of Adaptive Algorithms for Calculating the Rotation Speed of an Induction Drive Using the Lyapunov Second Method]. *Elektrichestvo — Electricity*, 2007, No. 8, pp. 48–53. EDN: KVAASF. [in Russian].

20. Panteleev A.D., Yakimova A.S., Bosov A.V. *Obyknovennyye differentsial'nye uravneniya v primerakh i zadachakh: uchebnoe posobie* [Ordinary Differential Equations in Examples and Tasks: Textbook]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 376 p. [in Russian].

21. Shilin A.A., Lyapunov D.Yu., Payuk L.A., Lyapushkin S.V. *Lineinye sistemy v teorii avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoe posobie* [Linear Systems in Automatic Control Theory: Textbook]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2019. 178 p. [in Russian].

22. *Spravochnik po elektricheskim mashinam: v 2 T.* [Handbook on Electrical Machines: In 2 Vols.]. / Under edition of I.P. Kopylov and B.K. Klovov. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1988. Vol. 1. 456 p. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 04.04.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 11.05.2023.*

*The article was submitted 04.04.2023; approved after reviewing 24.04.2023; accepted for publication 11.05.2023.*

Научная статья

УДК 620.179.147

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-43-50

## ТОКОВИХРЕВОЙ СПОСОБ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ МНОГОСЛОЙНЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

**Алексей Юрьевич Демин****Aleksei Yu. Demin**

доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой электронной инженерии,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия

**Диана Юрьевна Пашали****Diana Yu. Pashali**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электромеханики,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия

**Оксана Алексеевна Юшкова****Oksana A. Yushkova**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электромеханики,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия

### Актуальность

В процессе отработки технологии изготовления и эксплуатации многослойных крупногабаритных изделий (МКИ), применяемых в авиации, судостроении, железнодорожном транспорте, химическом машиностроении, автомобильной и во многих других отраслях промышленности (например, многослойных крупногабаритных оболочек, магистральных трубопроводов и т.д.), возникает необходимость проведения оперативного непрерывного неразрушающего контроля значительных площадей конструкций для определения толщины и сплошности соединения слоев с последующим уточнением параметров выявленных дефектов.

### Цель исследования

Развитие теории и разработка средств диагностирования технического состояния многослойных крупногабаритных изделий для повышения достоверности результатов их диагностики.

### Методы исследования

Для достижения поставленной цели применялись аналитические методы исследования электромагнитного поля, теория дифференциального и интегрального исчисления, численное и компьютерное моделирование с использованием программных средств.

### Ключевые слова

неразрушающий контроль, диагностика, техническое состояние, токовихревой контроль, многослойная структура

**Результаты**

Разработаны математическая модель распределения электромагнитного поля в многослойной структуре МКИ, а также оригинальное устройство контроля МКИ, позволяющее осуществлять непрерывный контроль их технического состояния.

**Для цитирования:** Демин А.Ю., Пашали Д.Ю., Юшкова О.А. Токовихревой способ выявления дефектов многослойных крупногабаритных изделий // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 2. Т. 19. С. 43-50. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-43-50>.

Original article

## EDDY CURRENT METHOD FOR DEFECT DETECTING IN MULTILAYER LARGE-SCALE OBJECTS

**Relevance**

In the process of developing the technology for manufacturing and operating multilayer large-sized objects used in aviation, shipbuilding, railway transport, chemical engineering, automotive and many other industries (for example, multilayer large-sized shells, main pipelines, etc.), there arises the need for operational continuous non-destructive testing of structures large areas to determine the thickness and continuity of the connection of layers with subsequent refinement of the identified defects parameters.

**Aim of research**

Development of the theory and means for diagnosing of multilayer large-sized objects technical condition to increase the reliability of their diagnostics results.

**Research methods**

To achieve the aim, analytical methods for studying the electromagnetic field, the theory of differential and integral calculus, numerical and computer modeling using software tools were used.

**Results**

A mathematical model of the electromagnetic field distribution in the multilayer structure of multilayer large-sized objects, as well as an original control device for multilayer large-sized objects, which allows continuous monitoring of their technical condition, have been developed.

**Keywords**

non-destructive testing, diagnostics, technical condition, eddy current testing, multilayer structure

**For citation:** Demin A. Yu., Pashali D. Yu., Yushkova O. A. Tokovikhrevoi sposob vyyavleniya defektov mnogoslnoykh krupnogaбаритnykh izdelii [Eddy Current Method for Detecting Defects in Multilayer Large-Scale Objects]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 2, Vol. 19, pp. 43-50. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-43-50>.

Известны различные методы неразрушающего контроля многослойных крупногабаритных изделий (МКИ), например метод лазерной вибродиагностики [1], предназначенный для выявления дефектов МКИ с сотовой структурой. К недостаткам метода можно отнести: снижение достоверности определения с уменьшением расстояния, проходимого лазер-

ным излучением, и большими значениями амплитуды колебаний оболочки, необходимость применения видеокамер с очень высокой разрешающей способностью; необходимость двустороннего доступа к объекту контроля (ОК).

Известны методы, не требующие двустороннего доступа к ОК: ИК-термография [2, 3] и ультразвуковой метод [4].

Как отмечено в [4], применение методов ИК-термографии затруднено, это связано с необходимостью использования опытных специалистов для интерпретации результатов контроля и их анализа, использованием сложных алгоритмов распознавания образов при анализе температурной информации. В [4] предложен комбинирующий эхо-импульсный ультразвуковой контроль (например, прибором Masterscan 380) и ИК-термографии (например, тепловизорами серии ТН-9100). При этом ИК-термография обеспечивает оперативность контроля на значительных площадях ОК, а эхо-импульсный контроль позволяет получить высокую достоверность обнаружения малых по площади дефектов (расслоений, непроклеев и т.д.) с дополнительным уточнением конкретных параметров выявленных ранее дефектов МКИ (форма, размер, глубина залегания и др.).

Все вышеперечисленные методы применяются в основном для МКИ из композитных материалов.

Для неразрушающего контроля МКИ из ферромагнитных материалов чаще всего применяют токовихревые методы [5]. Причин этому несколько: повторяемость контроля; требования к подготовке персонала ниже, чем, например, в вибродиагностическом, термографическом, ультразвуковом контроле; экономическая целесообразность. Актуальной научно-технической задачей является разработка технических средств для реализации метода.

Известно техническое решение для накладного электромагнитного преобразователя (НЭП) [6], содержащего обмотки возбуждения и измерительную обмотку. Элементы магнитопровода в количестве  $n$  фрагментов, разделены немагнитным зазором и расположены один в другом. Измерительные обмотки обхватывают отдельные П-образные элементы, по одной на каждый. Используется

одна общая возбуждающая обмотка для всех отдельных элементов НЭП. Ширина результирующего магнитопровода будет больше максимального значения исследуемой глубины слоя, дефекта или магнитной неоднородности. Преобразователь содержит  $m$  П-образных магнитопроводов, позиционируемых последовательно друг за другом и отделенных немагнитными зазорами. Недостатки технического решения — проведение диагностики на длине ОК, которая существенно зависит от габаритов преобразователя.

Для ферромагнитных изделий известен способ обнаружения дефектов, близких к поверхности [7], при котором объект намагничивают, сканируют и регистрируют изменения напряжения  $\Delta U_{\text{ВН}}$ , возникающие в вихретоковом преобразователе. Частоту рабочих токов выбирают по условию их проникновения в контролируемый слой изделия. Проводится измерение как минимум одной (а лучше нескольких) составляющей  $\Delta B$  индукции рассеяния. Выводы о дефектах в МКИ делают на основании анализа массива результатов измерений значений амплитуд напряжений и индукций.

Известен вихретоковый толщиномер для измерения толщины корпуса ОК [8], содержащий автогенератор, пару вихретоковых преобразователей и каскадно включенных ключей, а также устройство сравнения (в качестве которого может выступать дифференциальный трансформатор). Рабочая частота автогенератора определяет глубину проникновения в контролируемое изделие на толщину корпуса.

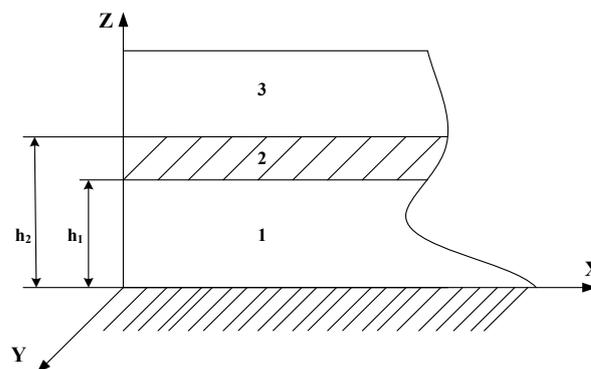
Недостатком конструкций [6–8] является ограничение функциональных возможностей: контроль только в одном слое МКИ.

В способе контроля параметров биметаллических МКИ [9] воздействие осуществляется с помощью переменного магнитного поля. Поле возбуждается

индуктором, намотанным на П-образном магнитопроводе. При этом измерительный индуктор находится на небольшом расстоянии со стороны ферромагнитного слоя биметалла, эталонный — соответственно у такого же слоя эталонного образца. Применяется пара двухобмоточных накладных катушек, располагающихся с зазором с противоположной стороны соответственно биметалла и эталонного образца. Вторичные обмотки катушек включены последовательно-встречно, а первичные обмотки питаются переменным током (как минимум на паре рабочих частот). Рабочая частота № 1 выбирается из тех соображений, чтобы вихревые токи проникали не более чем на толщину исследуемого слоя биметалла, а для частоты № 2 — еще глубже. Девиации толщины второго слоя и качество соединения слоев МКИ определяются на рабочих частотах № 1 и № 2 по результатам измерения падения напряжения на вторичной обмотке измерительной катушки относительно значений напряжения на вторичной обмотке катушки (над эталоном). К достоинствам этого способа можно отнести увеличение точности и количества параметров контроля (однако, способ требует наличия эталонного объекта контроля и соблюдения точности позиционирования для обоих изделий).

Актуальна научно-техническая задача разработки средств диагностирования технического состояния МКИ, например, обшивок функциональных узлов промышленных агрегатов и летательных аппаратов, представляющих собой многослойную структуру, состоящую из электропроводящих и неэлектропроводящих материалов [10].

Авторами разработана математическая модель [11] распределения электромагнитного поля (ЭМП) в структурах МКИ. На рисунке 1 представлена расчетная схема для трехслойной модели МКИ.



**Рисунок 1.** Расчётная схема трехслойной модели изделия

**Figure 1.** Calculation scheme of the three-layer object

При расчете распределения электромагнитного поля в окружающем пространстве более информативной является нормальная составляющая поля  $H_z$  (ее скорость затухания зависит от формы индуктора, значений поверхностного тока немагнитного зазора в системе индуктор — проводящая среда). В связи с этим в задачах дефектоскопии используется эта составляющая. Для разработки математической модели распределения ЭМП, как правило, вводятся следующие допущения:

- величина немагнитного зазора намного меньше полюсного деления;
- проводящий слой и индуктор по координатным осям  $X$  и  $Y$  имеют бесконечные размеры;
- граничные воздушные слои неэлектропроводны;
- магнитное поле создаётся бесконечно тонким токовым слоем, который меняется во времени по гармоническому закону по координатным осям  $X$  и  $Y$ ;
- магнитная проницаемость немагнитного зазора равна проницаемости вакуума —  $\mu_0$ , стали индуктора  $\mu = \infty$ .

Запишем для нашей схемы (рисунок 1) систему уравнений для всех трех слоев объекта:

$$\begin{cases} \Delta \bar{H}_1 = 0, \\ \Delta \bar{H}_2 - \mu_0 \mu \sigma_1 \frac{\partial \bar{H}_2}{\partial t} = 0, \\ \Delta \bar{H}_3 = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где  $\bar{H}_n$  — напряжённость магнитного поля;

$\sigma_n$  — удельная электрическая проводимость;

$\mu_n$  — магнитная проницаемость соответствующего проводящего слоя;

$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  — дифференциальный оператор Лапласа.

Для решения системы уравнений (1) зададим следующие граничные условия: первое — равенство на границе зон нормальных составляющих плотности тока; второе — равенство тангенциальных составляющих напряженности электрического поля:

$$\begin{cases} z = \infty : H_{3x} = 0; H_{3y} = 0; B_{3z} = 0, \\ z = h_2 : H_{3x} = H_{2x}; H_{3y} = H_{2y}; B_{3z} = B_{2z}, \\ z = h_1 : H_{2x} = H_{1x}; H_{2y} = H_{1y}; B_{2z} = B_{1z}, \\ z = 0 : H_{1x} = \cos(\pi \cdot y) \cdot \delta_{\text{пмх}}; H_{1y} = \cos(\pi \cdot x) \cdot \delta_{\text{пмх}}. \end{cases}$$

где  $\delta_{\text{пмх}}, \delta_{\text{пмы}}$  — поверхностная плотность токов по осям  $Y$  и  $X$  соответственно.

В результате решения системы уравнений (1) с учетом принятых допущений и граничных условий (2) получено выражение для нормальной составляющей магнитного поля на поверхности изделия (слой 3 на рисунке 1), которую будет фиксировать средство измерения:

$$H_{3z} = \cos(\alpha \cdot x) \cdot \sin(\beta \cdot y) \times C_1 (\text{sh}(\gamma_3 \cdot z) - \text{ch}(\gamma_3 \cdot z)), \quad (3)$$

где  $C_1 = -\frac{(\alpha^2 + \beta^2)C_2 (\text{sh}(\gamma_2 h_2) - \text{ch}(\gamma_2 h_2))}{\alpha \gamma_1 (\text{sh}(\gamma_3 h_3) - \text{ch}(\gamma_3 h_3))} \times$   
 $\times \frac{\gamma_1 \mu_2 \text{ch}(\gamma_2 h_2) + \gamma_2 \mu_1 \text{sh}(\gamma_2 h_2)}{\gamma_1 \mu_2 \text{sh}(\gamma_2 h_2) + \gamma_2 \mu_1 \text{ch}(\gamma_2 h_2)}$ ;  
 $C_2 = (C_4 \text{sh}(\gamma_1 h_1) + C_3 \text{ch}(\gamma_1 h_1)) \times$   
 $\times \frac{(\gamma_1 \mu_2 \text{sh}(\gamma_2 h_2) + \gamma_2 \mu_1 \text{ch}(\gamma_2 h_2))}{\gamma_2 \mu_1 \text{sh}(\gamma_2 (h_1 - h_2)) - \gamma_1 \mu_2 \text{ch}(\gamma_2 (h_1 - h_2))}$ ;  
 $C_3 = -C_4 \frac{(-2\gamma_1 \gamma_2 \mu_1 \mu_2 \text{ch}(\gamma_2 (h_1 - h_2)) +$   
 $+ (\gamma_2^2 \mu_1^2 + \gamma_1^2 \mu_2^2) \text{sh}(\gamma_2 (h_1 - h_2))}{-2\gamma_1 \gamma_2 \mu_1 \mu_2 \text{ch}(\gamma_2 (h_1 - h_2)) +$   
 $+ \gamma_2^2 \mu_1^2 + \gamma_1^2 \mu_2^2 \text{sh}(\gamma_2 (h_1 - h_2))}$ ;

$$C_4 = -\frac{(\text{csch}(x\alpha)(-2e^{2\gamma_1 h_1} \gamma_1 \gamma_2 \mu_1 \mu_2 \text{ch}(\gamma_2 (h_1 - h_2)) +$$
  
 $- 2e^{2\gamma_1 h_1} \gamma_1 \gamma_2 \mu_1 \mu_2 \text{ch}(\gamma_2 (h_1 - h_2)) +$   
 $+ (e^{2\gamma_1 h_1} \gamma_2^2 \mu_1^2 + e^{2\gamma_1 h_1} \gamma_1^2 \mu_2^2) \text{sh}(\gamma_2 (h_1 - h_2)) \delta_{\text{пмх}}}{+ e^{2\gamma_1 h_1} \gamma_2^2 \mu_1^2 + e^{2\gamma_1 h_1} \gamma_1^2 \mu_2^2 \text{sh}(\gamma_2 (h_1 - h_2))}$ ,

где  $\gamma_1 = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$ ;

$\gamma_2 = \sqrt{k^2 + \alpha^2 + \beta^2}$ ;

$k^2 = j\mu\sigma\omega$ ;

с учетом  $\alpha = \pi/a, \beta = \frac{\pi}{b} \gamma_2 = \alpha \sqrt{j\epsilon + 1 + \frac{\beta^2}{\alpha^2}}$ ,  $a, b$  — шаги ячейки индуктора по оси  $OX$  и  $OY$  соответственно;

$\epsilon = \frac{\mu\sigma\omega a^2}{\pi^2}$  — магнитное число Рейнольдса.

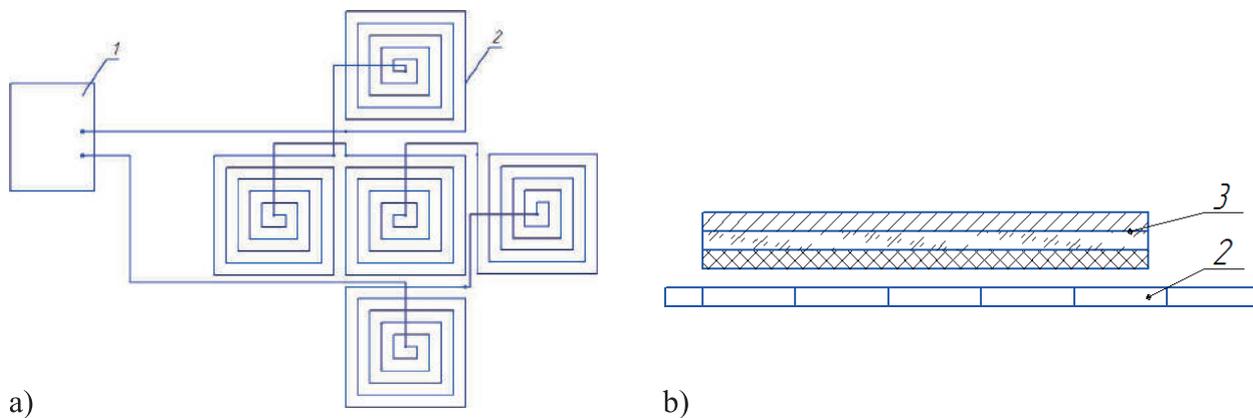
Авторами разработано оригинальное устройство контроля МКИ, состоящих из электропроводящих и неэлектропроводящих материалов (рисунок 2). Устройство [12] содержит генератор переменного тока с регулируемой частотой  $f$ , индуктор с датчиками магнитного поля 2. Индуктор выполнен в виде  $m$  рамок из  $n$  спиралевидных витков. Каждый виток с последующим соединен последовательно-согласно и подключен к источнику переменного тока с регулируемой частотой для изменения глубины проникновения магнитного поля в слой ОК (перестройка или использование нескольких частот является достаточно эффективным приемом улучшения методов вихретокового контроля [16]). Одним из эффективных способов увеличения производительности контроля является использование матричных преобразователей [13]. В предлагаемом решении матричный многоканальный вихретоковый преобразователь накладного типа не требует двустороннего доступа. В самом НЭП отдельные элементы матрицы предлагается реализовывать с помощью дифференциальных преобразователей трансформаторного типа, что делает возможным увеличение размеров возбуждающей обмотки без потери чувствительности [14, 15].

Регистрация изменений толщины слоев МКИ и/или наличия дефекта производится по изменению значения магнитной индукции результирующего поля датчиками, расположенными на индукторе, и сравнению данных с эталонными значениями. Для контроля прилегания НЭП целесообразно размещение в матрице дополнительных абсолютных вихретоковых преобразователей, позволяющих оценить значения рабочего зазора и равномерность прилегания НЭП.

Устройство непрерывного контроля МКИ работает следующим образом. Устройство помещается под контролируемое изделие 3. Под действием первичного магнитного поля индуктора 2 в ОК 3 возникают вихревые токи, которые создают свое вторичное поле реакции, противодействующее первичному полю, тем самым ослабляя его. Наличие в ОК дефекта в виде несплошности или трещины приводит к изменению распреде-

ления вихревых токов, а, следовательно, и картины распределения вторичного магнитного поля, которое, в свою очередь, влияет на изменение результирующего магнитного поля изделия. Отклонение значения нормальной составляющей магнитной индукции результирующего поля от эталонного значения регистрируется датчиком, расположенным на индукторе 2.

Таким образом осуществляется непрерывный контроль технического состояния МКИ. Достоинством является повышение производительности контроля технического состояния МКИ за счет увеличения как размеров обмотки возбуждения, так и размеров самой матрицы. Возможно дальнейшее масштабирование размеров НЭП за счет объединения отдельных матричных преобразователей в единую сеть посредством таких цифровых интерфейсов передачи данных, как CAN или RS485.



a) матричный НЭП; b) расположение НЭП и объекта контроля (условно)

a) matrix overhead electromagnetic transducer; b) the location of the overhead electromagnetic transducer and the object of control (conditionally)

**Рисунок 2.** Устройство непрерывного контроля многослойных крупногабаритных изделий

**Figure 2.** Device for continuous control of multilayer large-sized objects

### Вывод

Разработаны математическая модель распределения электромагнитного поля в многослойной структуре МКИ, а также

оригинальное устройство контроля МКИ, позволяющее осуществлять непрерывный контроль их технического состояния.

## Список источников

1. Мордасов В.И., Сторож А.Д., Гребнев Н.Е., Шулепова О.В., Иванова Е.Г. Лазерно-вибродиагностический способ выявления дефектов клееных оболочек // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. № 3 (19). С. 43–48.
2. Vavilov V.P. Thermal Nondestructive Testing of Materials and Products: a Review // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. Vol. 53, Issue 10. P. 707–730.
3. Вандельт М., Крёгер Т., Йоханнес М. Активная термография — эффективный метод неразрушающего контроля крупногабаритных изделий из композиционных материалов // В мире неразрушающего контроля In the world of non-destructive testing. 2016. № 1. С. 8–12. EDN: VOFJEV.
4. Завидей В.И., Васенов Ю.Г., Ступаченко С.Л. Комплексный подход к выявлению дефектов многослойных конструкций из композитных материалов [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elec.ru/publications/tsifrovyye-tehnologii-svjaz-izmerenija/2869/>.
5. Магнитопорошковая дефектоскопия [Электронный ресурс] URL: <https://strategnk.ru/services/tehnicheskoe-diagnostirovanie-i-nerazrushayushchiy-kontrol/mpd/>.
6. Полезная модель № 68700, МПК G 01 N 27/90. Накладной электромагнитный преобразователь / И.Х. Хайруллин, Ф.Р. Исмагилов, Ю.В. Афанасьев, Д.Ю. Пашали, О.А. Бойкова. 2007125035, Заявлено 02.07.2007; Оpubл. 27.11.2007. Бюл. № 33.
7. Пат. 2442151 РФ, МПК G 01 N 27/90. Способ выявления подповерхностных дефектов в ферромагнитных объектах / С.В. Ключев, П.Н. Шкатов. 2010107405/28, Заявлено 01.03.2010; Оpubл. 10.02.2012. Бюл. № 4.
8. Пат. 2419763 РФ, МПК G 01 B 7/06. Вихретоковый толщиномер / А.И. Жаворонко, С.В. Кривоносов, В.А. Хлупнов. 2009132639, Заявлено 01.09.2009; Оpubл. 27.05.2011. Бюл. № 15.
9. Пат. 2399870 РФ, МПК G 01 B 7/06. Способ непрерывного контроля толщины и сплошности слоев биметалла / Д.В. Семененко, А.П. Пудовкин. 2009123714, Заявлено 22.06.2009; Оpubл. 20.09.2010. Бюл. № 26.
10. Goldfine N. Eddy Current Arrays for Structural Health Monitoring. 2022. DOI: 10.1016/B978-0-12-822944-6.00037-2.
11. Хайруллин И.Х., Пашали Д.Ю., Гиниятуллин Д.М. Исследование пространственного распределения магнитного поля в слоистой структуре для применения в теории дефектоско-

пии // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. № 2, Т. 9. С. 29–34. EDN: RPFQWJ.

12. Пат. на полезную модель 154467 РФ, МПК G 01 N 27/90. Устройство вихретокового неразрушающего контроля / И.Х. Хайруллин, Д.Ю. Пашали, В.В. Айгузина, О.А. Юшкова, Ю.В. Зигангирова. 2015105322, Заявлено 17.02.2015; Оpubл. 27.08.2015. Бюл. № 24.

13. Meng X., Lu M., Yin W., Bennecer A., Kirk K. Inversion of Lift-Off Distance and Thickness for Non-Magnetic Metal Using Eddy Current Testing // e-Journal of Nondestructive Testing, 2020, Vol. 25 (12), <https://www.ndt.net/?id=25593>.

14. Грабовский А.В., Петров Г.А. Многоканальные сканеры вихретокового контроля // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 9. С. 42–48.

15. Dr. Anil Kumar Soni, Mahadevan S., Sannasi Thirunavukkarasu, Purna Chandra Rao Bhagi. A Study on the Scan Plans for Rapid Flaw Detection by Eddy Current Non-Destructive Evaluation // IETE Journal of Research. 2022. 1-12. doi: 10.1080/03772063.2021.2021822.

16. Wuliang Yin, Jiawei Tang, Mingyang Lu, Hanyang Xu, Ruochen Huang, Zhao Qian, Zhijie Zhang, Peyton A.J. An Equivalent-Effect Phenomenon in Eddy Current Non-Destructive Testing of Thin Structures. IEEE Access. 2019. P. 1-1. 10.1109/ACCESS.2019.2916980.

## References

1. Mordasov V.I., Storozh A.D., Grebnev N.E., Shulepova O.V., Ivanova E.G. Lazernovibrodiagnosticheskii sposob vyyavleniya defektov kleenykh obolochek [Laser Vibrating Method of Gluing Shells Defects Detection]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta — Bulletin of the Samara State Aerospace University*, 2009, No. 3 (19), pp. 43–48. [in Russian].
2. Vavilov V.P. Thermal Nondestructive Testing of Materials and Products: a Review. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, Vol. 53, Issue 10, pp. 707–730.
3. Vandelt M., Kreger T., Iokhannes M. Aktivnaya termografiya — effektivnyi metod nerazrushayushchego kontrolya krupnogabaritnykh izdelii iz kompozitsionnykh materialov [Active Thermography — A Powerful Non-Destructive Method for Large-Sized Composite Products Testing]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya — In the World of Non-Destructive Testing*, 2016, No. 1, pp. 8–12. EDN: VOFJEV. [in Russian].
4. Zavidei V.I., Vasenov Yu.G., Stupachenko S.L. *Kompleksnyi podkhod k vyyavleniyu defektov mnogoslownykh konstruktssii iz kompozitnykh*

*materialov* [An Integrated Approach to Identifying Defects in Multilayer Structures Made of Composite Materials [Electronic Resource]. URL: <https://www.elec.ru/publications/tsifrovye-tehnologii-svjaz-izmerenija/2869/>. [in Russian].

5. *Magnitoporoshkovaya defektoskopiya* [Magnetic Particle Flaw Detection] [Electronic Resource]. URL: <https://strategnk.ru/services/tehnicheskoe-diagnostirovanie-i-nerazrushayuschiy-kontrol/mpd/>. [in Russian].

6. Khairullin I.Kh., Ismagilov F.R., Afanas'ev Yu.V., Pashali D.Yu., Boikova O.A. *Nakladnoi elektromagnitnyi preobrazovatel'* [Laid-on Electromagnetic Transducer]. Poleznaya model RF, No. 68700, 2007. [in Russian].

7. Klyuev S.V., Shkatov P.N. *Sposob vyyavleniya podpoverkhnostnykh defektov v ferromagnitnykh ob'ektakh* [A Method for Detecting Subsurface Defects in Ferromagnetic Objects]. Patent RF, No. 2442151, 2012. [in Russian].

8. Zhavoronko A.I., Krivonosov S.V., Khlupnov V.A. *Vikhretkovyi tolshchinomer* [Eddy Current Thickness Gauge]. Patent RF, No. 2419763, 2011. [in Russian].

9. Semenenko D.V., Pudovkin A.P. *Sposob nepreryvnogo kontrolya tolshchiny i sploshnosti sloev bimetalla* [The Method of Continuous Control of the Thickness and Continuity of Bimetal Layers]. Patent RF, No. 2399870, 2010. [in Russian].

10. Goldfine N. *Eddy Current Arrays for Structural Health Monitoring*. 2022. doi: 10.1016/B978-0-12-822944-6.00037-2.

11. Khairullin I.Kh., Pashali D.Yu., Giniyatullin D.M. *Issledovanie prostranstvennogo raspredeleniya magnitnogo polya v sloistoi strukture dlya*

*prime-neniya v teorii defektoskopii* [Investigation of the Magnetic Field Spatial Distribution in Layered Structures for the Defectoscopy Theory]. *Elektro-tehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2013, No. 2, Vol. 9, pp. 29–34. EDN: RPFGWJ. [in Russian].

12. Khairullin I.Kh., Pashali D.Yu., Aiguzina V.V., Yushkova O.A., Zigangirova Yu.V. *Ustroystvo vikhretkovogo nerazrushayushchego kontrolya* [Device for Eddy Current Non-Destructive Testing]. Patent RF, No. 154467, 2015. [in Russian].

13. Meng X., Lu M., Yin W., Bennecer A., Kirk K. Inversion of Lift-Off Distance and Thickness for Non-Magnetic Metal Using Eddy Current Testing. *e-Journal of Nondestructive Testing*, 2020, Vol. 25 (12), <https://www.ndt.net/?id=25593>.

14. Grabovskii A.V., Petrov G.A. *Mnogokanal'nye skanery vikhretkovogo kontrolya* [Multi-channel Scanners for Eddy Current Testing]. *Izvestiya SPbGETU «LETI» — Izvestia of St. Petersburg Electrotechnical University «LETI»*, 2016, No. 9, pp. 42–48. [in Russian].

15. Dr. Anil Kumar Soni, Mahadevan S., Sannasi Thirunavukkarasu, Purna Chandra Rao Bhagi. A Study on the Scan Plans for Rapid Flaw Detection by Eddy Current Non-Destructive Evaluation. *IETE Journal of Research*, 2022, 1–12. doi: 10.1080/03772063.2021.2021822.

16. Wuliang Yin, Jiawei Tang, Mingyang Lu, Hanyang Xu, Ruochen Huang, Zhao Qian, Zhijie Zhang, Peyton A.J. An Equivalent-Effect Phenomenon in Eddy Current Non-Destructive Testing of Thin Structures. *IEEE Access*, 2019, pp. 1–1. 10.1109/ACCESS.2019.2916980.

*Статья поступила в редакцию 14.04.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 12.05.2023.*

*The article was submitted 14.04.2023; approved after reviewing 24.04.2023; accepted for publication 12.05.2023.*

Научная статья

УДК 621.313

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-51-61

**ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ВЕНТИЛЯТОРНОГО УЗЛА ВНЕШНЕЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ****Флюр Рашитович Исмагилов****Flyur R. Ismagilov***доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия***Вячеслав Евгеньевич Вавилов****Vyacheslav E. Vavilov***доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия***Арсен Владимирович Месропян****Arsen V. Mesropyan***доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики и цифрового проектирования, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия***Искандер Радикович Гарипов****Iskander R. Garipov***инженер кафедры электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия***Егор Андреевич Пронин****Egor A. Pronin***инженер кафедры электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия***Актуальность**

Одним из важнейших вопросов проектирования электрических машин является реализация системы охлаждения, обеспечивающей эффективный отвод тепла при малых массогабаритных затратах. Поддержание оптимальной рабочей температуры активных деталей электрической машины необходимо для ее эффективной и надежной работы, но в условиях ограниченных массогабаритных затрат это ста-

**Ключевые слова**

система охлаждения, электродвигатель, вентилятор, параметризация, численное компьютерное моделирование,

новится сложной инженерной задачей. Воздушное охлаждение электрических машин до сих пор не теряет свою актуальность благодаря своей простоте, небольшим массогабаритным показателям и затратам на реализацию. Ключевым элементом в воздушных системах охлаждения является центробежный вентилятор, который создает движение воздушных масс. Таким образом, в воздушной системе охлаждения основной задачей является проектирование вентилятора, обеспечивающего необходимые характеристики.

#### **Цель исследования**

Целью данной работы является проектирование вентилятора с загнутыми назад лопатками на основе параметризации модели с целью получения необходимой производительности при сохранении габаритных параметров. Потребная объемная производительность оценивается в 120–200 м<sup>3</sup>/ч в зависимости от частоты вращения.

#### **Методы исследования**

Исследование проводится при помощи трехмерного численного компьютерного моделирования в программном комплексе вычислительной гидродинамики ANSYS CFX. Варьируются углы входа и выхода воздушного потока из рабочего колеса. В результате рассмотрены 16 различных вариантов соотношений входных и выходных углов потока.

#### **Результаты**

В результате работы проведена параметризация конструкции рабочего колеса воздушной системы охлаждения электрической машины. В результате серии расчетов определено, что при угле  $\beta_2 = 70^\circ$  для всех углов  $\beta_1$  обеспечивается необходимая производительность при 6000 об/мин. Наиболее производительным решением является соотношение  $\beta_1 = 30^\circ$  и  $\beta_2 = 70^\circ$ .

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда — проект № 21-19-00454.

**Для цитирования:** Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е., Месропян А. В., Гарипов И. Р., Пронин Е. А. Параметризация вентиляторного узла внешней системы охлаждения электродвигателя // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 2. Т. 19. С. 51-61. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-51-61>.

Original article

## **PARAMETERIZATION OF THE FAN ASSEMBLY OF THE EXTERNAL ELECTRIC MOTOR COOLING SYSTEM**

#### **Relevance**

One of the most important issues in the design of electric machines is the implementation of a cooling system that provides efficient heat removal at low weight and size costs. Maintaining the optimal operating temperature of the active parts of an electric machine is necessary for its efficient and reliable operation, but under conditions of limited weight and size costs, this becomes a difficult engineering task. Air cooling of electric machines still does not lose its relevance due to its simplicity, small weight and size indicators and implementation costs. A key element in air cooling systems is the centrifugal fan, which creates the movement of air masses. Thus, in an air cooling system, the main task is to design a fan that provides the necessary characteristics.

#### **Aim of research**

Aim of the research is to design a fan with backward curved blades based on model parameterization in order to obtain the required performance

вычислительная  
гидродинамика

#### **Keywords**

cooling system, electric motor, fan, parametrization, numerical computer simulation, computational fluid dynamics

while maintaining the overall parameters. The required volumetric performance is estimated at 120–200 m<sup>3</sup>/h depending on the rotational speed.

### Research methods

The study is carried out using three-dimensional numerical computer simulation in the ANSYS CFX software package for computational fluid dynamics. The angles of entry and exit of the air flow from the impeller vary. As a result, 16 different variants of the ratios of the inlet and outlet flow angles were considered.

### Results

As a result of the work, the design of the impeller of the air cooling system of the electric machine was parametrized. As a result of a series of calculations, it was determined that at an angle  $\beta_2 = 70^\circ$  for all angles  $\beta_1$  the required performance is provided at 6000 rpm. The most productive solution is the ratio  $\beta_1 = 30^\circ$  and  $\beta_2 = 70^\circ$ .

**Acknowledgements:** This work was financially supported by the Russian Science Foundation, project No. 21-19-00454.

**For citation:** Ismagilov F. R., Vavilov V. E., Mesropyan A. V., Garipov I. R., Pronin E. A. Parametrizatsiya ventilyatornogo uzla vneshnei sistemy okhlazhdeniya elektrodvigatelya [Parameterization of the Fan Assembly of the External Electric Motor Cooling System]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 2, Vol. 19, pp. 51–61. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-51-61>.

### Введение

В промышленных электродвигателях широко распространена внешняя система охлаждения [1], в которой поток охлаждающего воздуха, генерируемый вентилятором, проходит вдоль поверхности корпуса электродвигателя. Несмотря на то, что воздушное охлаждение уступает по эффективности системам жидкостного и криогенного охлаждения, оно по-прежнему занимает свою нишу благодаря своей простоте, небольшим массогабаритным показателям и затратам на реализацию [2, 3]. Ключевым элементом, обеспечивающим заданные характеристики системы, является центробежный вентилятор. Широкое применение нашли вентиляторы низкого и среднего давления с рабочим колесом открытого типа [4]. Такие колеса технологичны, имеют малое количество деталей. Межлопаточные каналы ограничены лишь стенками кожуха. Недостаток рабочего колеса открытого типа, связанный с низкой эффективностью, компенсируется особенностями применения в системе

охлаждения, в которых потребность в создании большего потока хладагента превалирует над потребностью в создании большего давления.

Основным подходом при проектировании вентиляторов являются метод одномерного потока, основанный на решении уравнений Эйлера с последующим расчетом его трехмерных характеристик [5–8]. Следует отметить, что по результатам одномерного расчета возникает множество вариантов конструкции, которые потенциально обеспечивают заданные характеристики. Этап трёхмерного моделирования позволяет выбрать вариант конструкции, обеспечивающий наилучшие характеристики конструкции. Именно на этом этапе целесообразно применение параметризованной модели [9], в которой из массива параметров, полученных по результатам одномерного расчета, выбирается вариант, обеспечивающий требуемые характеристики. В параметризованной модели варьируются параметры, расчет которых осуществлялся на предыдущем этапе.

## Параметризация конструкции и последовательность расчета

Для параметризации конструкции используется трехмерная расчетная модель, состоящая из секции с параметризованным вентилятором и каналов охлаждения, расположенных на внешней поверхности корпуса охлаждаемой электрической машины. Подробнее о параметризованных размерах вентилятора изложено в следующем разделе. Работа с моделью состоит из нескольких этапов (рисунок 1): внесение изменений в параметризованную модель вентилятора, построение сетки конечных объемов и расчет трехмерного вязкого течения в системе охлаждения.

Границы варьирования входных параметров определяются из результатов, полученных по одномерной методике расчета и конструктивных соображений. В модификации твердотельных моделей происходит геометрическое изменение кон-

струкции с целью последующего анализа для выбора оптимальных характеристик. Модель газодинамического расчета состоит из сеточной модели системы охлаждения, метода анализа и граничных условий. В блоке выходных данных анализируется вклад отдельных параметров на производительность системы.

## Описание конструкции и расчета

Продемонстрируем последовательность расчета, изложенную в предыдущем пункте, на примере конструкции, представленной на рисунке 2. Она состоит из рабочего колеса вентилятора, установленного на вал электродвигателя, защитного кожуха и корпуса с орбреннием. Рабочее колесо конструкции выполняется с радиальными лопатками в количестве 16 штук и размещается в защитном кожухе. Выбор количества лопаток ограничен ожидаемой массой вентилятора. Кожух выступает в роли

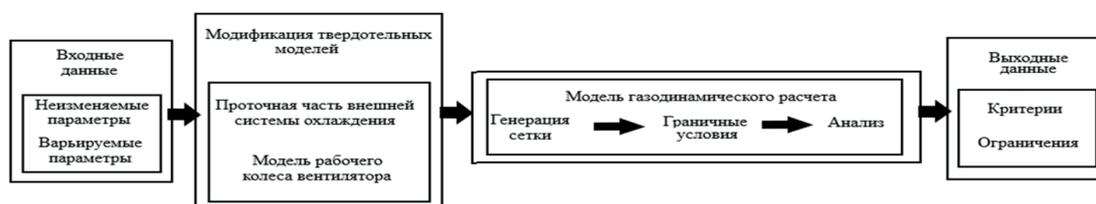


Рисунок 1. Этапы работы с моделью

Figure 1. Stages of working with the model

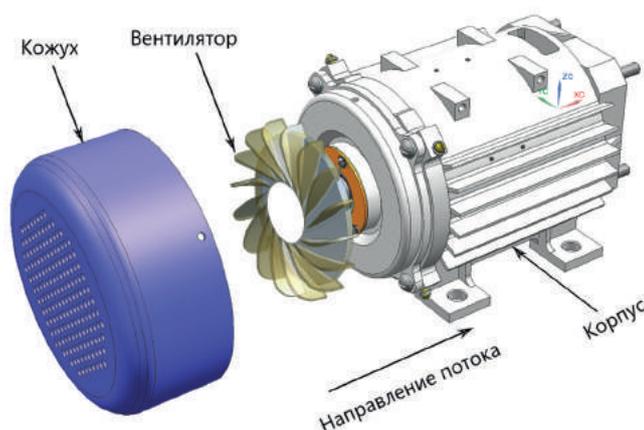


Рисунок 2. Конструктивное исполнение исследуемого электродвигателя

Figure 2. The design of the investigated electric motor

щелевого диффузора, направляющего поток на оребренный корпус.

Параметризованная модель вентилятора представлена на рисунке 3.

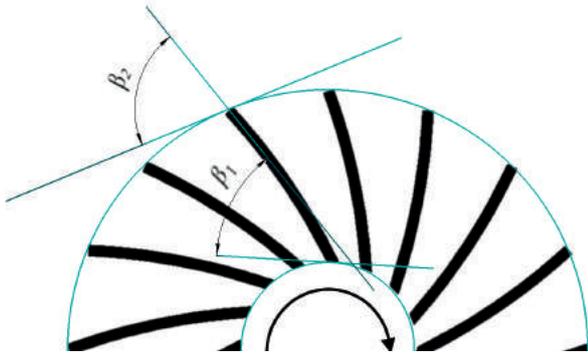


Рисунок 3. Параметризованная модель вентилятора

Figure 3. Parameterized fan model

Как видно из рисунка 3, рассматривается конструкция с лопатками, загнутыми назад. Такая конструкция имеет особое преимущество в виде небольшой потребляемой мощности, а также она характеризуется высокой эффективностью [4].

На производительность вентилятора прямое влияние оказывают углы входа и выхода потока. Рекомендуемый диапазон углов входа  $\beta_1$  — от  $30^\circ$  до  $40^\circ$ , для углов выхода  $\beta_2$  — от  $15^\circ$  до  $30^\circ$  [4]. При этом учитывая диффузорность и длину межлопаточного канала, для параметризации рассмотрим также большие углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . В качестве изменяемых параметров рассматриваются угол входа потока в рабо-

чее колесо  $\beta_1$  ( $30\text{--}70^\circ$ ) и угол выхода из рабочего колеса  $\beta_2$  ( $40\text{--}70^\circ$ ). Шаг угла принимается равным  $10^\circ$ . Все остальные геометрические характеристики вентилятора принимаются неизменными.

Следует отметить, что выбор углов по результатам одномерных методик в большинстве случаев базируется на эмпирических зависимостях определенных конструкций, что не позволит полноценно использовать данные методики для поиска оптимальных соотношений для произвольных конструкций. По этой причине лучшим решением для исследования произвольных конструкций является использование методик трехмерного численного моделирования.

Основной целью серии проводимых расчетов является увеличение производительности системы за счет изменения параметров углов входа и выхода. Исходные данные, полученные по результатам предварительных расчетов, представлены в таблице 1.

Реализация трехмерных расчетов осуществляется в программном комплексе Ansys WB Fluid flow. Ansys WB Fluid flow является средством трехмерного численного термогазодинамического моделирования, в котором определенными численными методами решаются основные уравнения, описывающие поток (уравнения сохранения энергии, импульсов, уравнения неразрывности и турбулентности). Задача решается в рамках приближения

Таблица 1. Исходные данные для расчета вентилятора

Table 1. Initial data for fan calculation

№	Параметр	Размерность	Значение
1	Необходимая производительность $Q$	м <sup>3</sup> /ч	120–200
2	Температура $T$	°С	25
3	Частота вращения вала $n$	об/мин	6000–10000
4	Внутренний диаметр кожуха $D_p$	мм	2
5	Диаметр втулки $D_{BT}$	мм	22
6	Длина вентилятора $b$	мм	16

RANS с моделью турбулентности SST. В качестве граничных условий на входе используются полные параметры потока, на выходе — статическое давление. Результатом расчета являются интегральные параметры потока в расчетных сечениях и на поверхности лопатки.

### Уравнение неразрывности

Одной из основных характеристик охлаждающего потока является уравнение неразрывности, отражающее закон сохранения массы [10]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0, \quad (1)$$

где  $p$  — давление;

$t$  — время;

$\nabla$  — дивергенция;

$V$  — скорость.

Для стационарного течения потока (1) можно записать в виде [10]:

$$\Delta \cdot \rho \vec{V} = 0. \quad (2)$$

Общее уравнение сохранения импульса можно записать как [10]:

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} = -\Delta p + \Delta \cdot \tau_{ij} + \rho g, \quad (3)$$

где  $\tau_{ij}$  — касательное напряжение;

$\rho$  — плотность охлаждающего тела;

$g$  — ускорение свободного падения.

В (3)  $\nabla p$ ,  $\nabla \rho \cdot \tau_{ij}$  и  $\rho g$  в правой части представляют собой компоненты силы давления, силы вязкости и силы тяжести соответственно.

В случае постоянной вязкости и установившегося течения (3) примет вид [10]:

$$\vec{V} \cdot \nabla \rho \vec{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho g, \quad (4)$$

где  $\mu$  — динамическая вязкость.

Если рабочим телом выступает газ, то гравитационной составляющей  $\rho g$  для случаев вынужденной конвекции можно пренебречь.

### Характеристики потока в вентиляторе

Скорость потока в системе охлаждения характеризуется течением, генериру-

емым в вентиляторе. На рисунке 4 представлено разложение скоростей на векторы для случая лопаток, загнутых назад. Рабочее колесо в данной схеме представляется как диск с бесконечным числом лопаток, равномерно вращающийся с окружной скоростью  $\mu$  и угловой скоростью  $\omega$ .

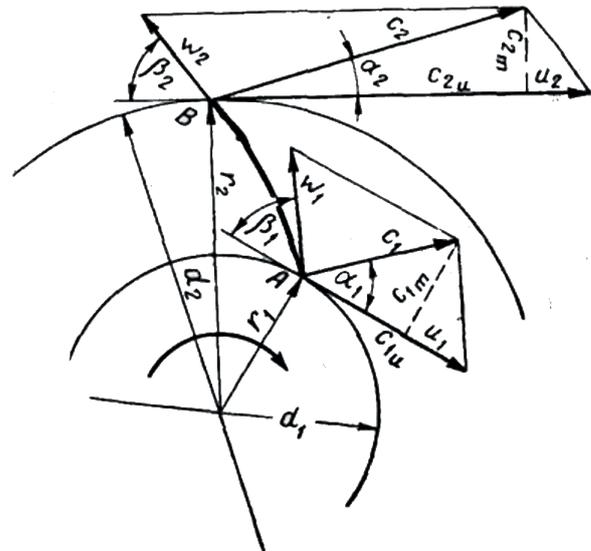


Рисунок 4. Треугольник скоростей [4]

Figure 4. Speed triangle [4]

Известно, что производительность вентилятора с точки зрения рабочего колеса напрямую зависит от радиальной составляющей скоростей [4, 11]:

$$\begin{cases} Q = c_{1m} b_1 \pi d_1 \\ Q = c_{2m} b_2 \pi d_2 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $c_{im}$  — это радиальная скорость;

$b_i$  — ширина лопатки;

$d_i$  — диаметр рабочего колеса.

Из системы выражений видно, что увеличения производительности вентилятора можно добиться за счет увеличения радиальной составляющей (также называемой меридиональной скоростью). При фиксированном значении окружной скорости, задаваемой электрической машиной, из треугольника скоростей видно, что этого можно добиться за счет изменения углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$ .

**Влияние производительности системы охлаждения на характеристики электрической машины**

Производительность вентилятора связана с греющими потерями электрической машины  $\sum P_{гр}$  через формулу [1]:

$$\sum P_{гр} = Q \cdot C_p \cdot \Delta T_{ж}, \quad (6)$$

где  $Q$  — расход хладагента через вентилятор;

$C_p$  — удельная теплоемкость;

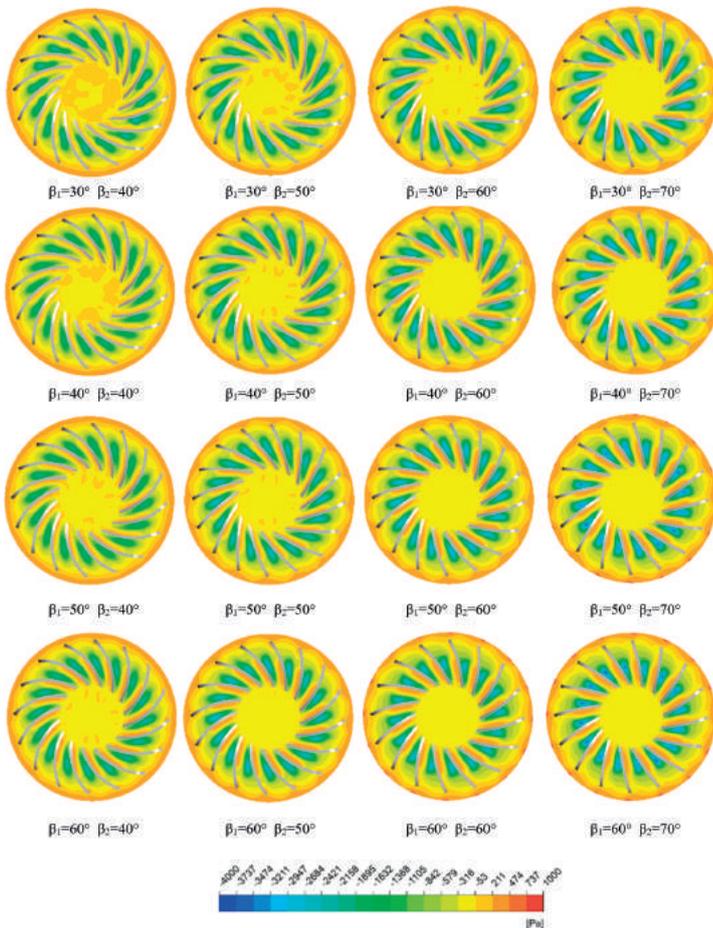
$\Delta T_{ж}$  — подогрев охладителя.

В зависимости от применяемого класса изоляции ориентировочное значение подогрева охладителя находится в диапазоне 20–30 °С. Следует отметить, что значение потребного расхода по формуле (6) является приблизительным и его необходимо уточнять в дальнейшем при проведении тепловых расчетов. Тем не менее, данная формула позволяет оценить тот факт, что при фиксированных параметрах

охладителя (в исследуем случае воздуха) рост производительности системы охлаждения может быть обеспечен за счет прироста расхода хладагента [1].

**Результаты расчетов**

На рисунке 5 представлены эпюры давлений по сечению вентилятора при 6000 об/мин. Результаты для всех расчетов согласуются с теоретической информацией, представленной в [4]. Как видно из эпюры давлений, со стороны спинки лопатки наблюдается область разрежения, тогда как со стороны корытца наблюдается повышение давления. Из рисунка 5 видно, что увеличение угла входа  $\beta_1$  приводит к увеличению давления со стороны корытца лопатки. Увеличение угла выхода  $\beta_2$  приводит к увеличению разрежения в области спинки лопатки. Особенно это заметно для угла  $\beta_2 = 70^\circ$ , где максимальное падение давления за



**Рисунок 5.** Распределение давлений в поперечном сечении вентилятора

**Figure 5.** Pressure distribution in the cross section of the fan

спинкой лопатки имеет ярко выраженную точечную область.

Эпюра относительной скорости по сечению вентилятора при 6000 об/мин представлена на рисунке 6.

С учетом эпюры давлений из рисунка 5 видно, что со стороны спинки лопатки образуется относительный вихрь в области разряжения (понижения давления). В этом месте наблюдается увеличение относительной скорости по сравнению со средней. Максимальная скорость наблюдается для угла  $\beta_2 = 70^\circ$  в точечной области максимального разряжения.

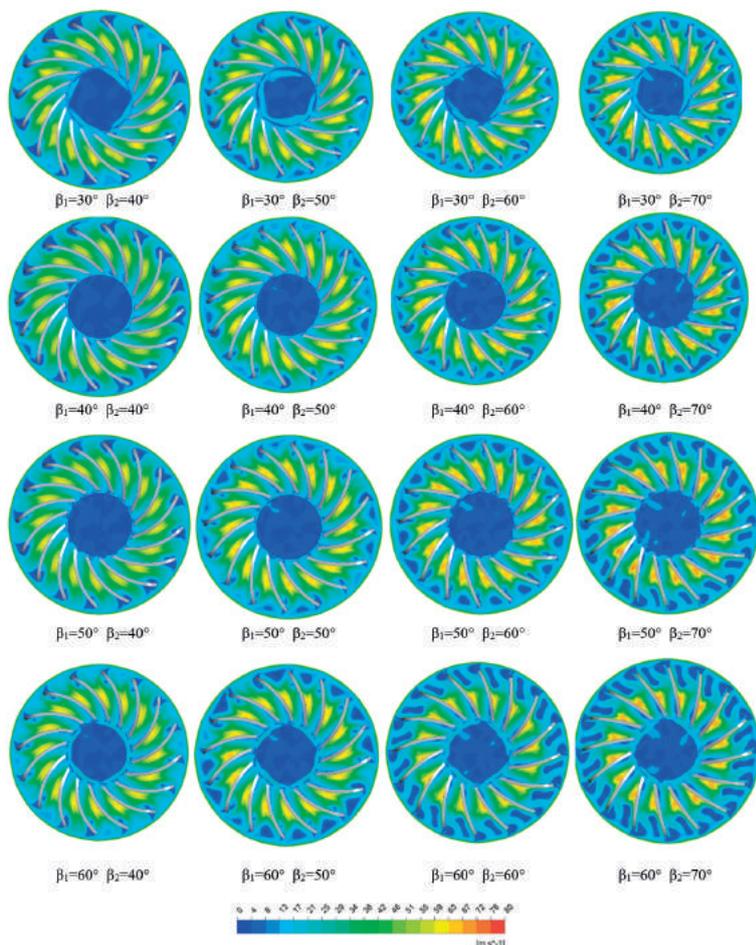
Данный вихрь накладывается на основной поток. Результирующие относительные скорости на корытце лопатки, находящиеся в зоне повышенных давлений, меньше по сравнению со средней. Судя по эпюрам скоростей, наибольшее влияние на образование вихрей вносит увеличение угла  $\beta_2$ . Увеличение угла  $\beta_1$  вносит гораздо мень-

шее влияние на вихри, но оно также имеет место быть.

Результаты расчетов производительности вентиляторов представлены в таблице 2.

Как видно из расчета, при уменьшении угла  $\beta_2$  наблюдается увеличение производительности вентиляторов. Согласно проведенным расчетам, все расчеты при  $\beta_2 = 70^\circ$  удовлетворяют производительности  $120 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Наиболее производительным решением является выбор углов  $\beta_1 = 30^\circ$  и  $\beta_2 = 70^\circ$  соответственно (рисунок 7). Дальнейший расчет с 6000 до 10000 об/мин проводится для наиболее производительного решения (рисунок 8).

Таким образом, из рисунка 8 видно, что конфигурация лопаток с  $\beta_1 = 30^\circ$  и  $\beta_2 = 70^\circ$  удовлетворяет производительности  $200 \text{ м}^3/\text{ч}$  при 10000 об/мин, выдавая производительность с небольшим запасом —  $207,21 \text{ м}^3/\text{ч}$ .



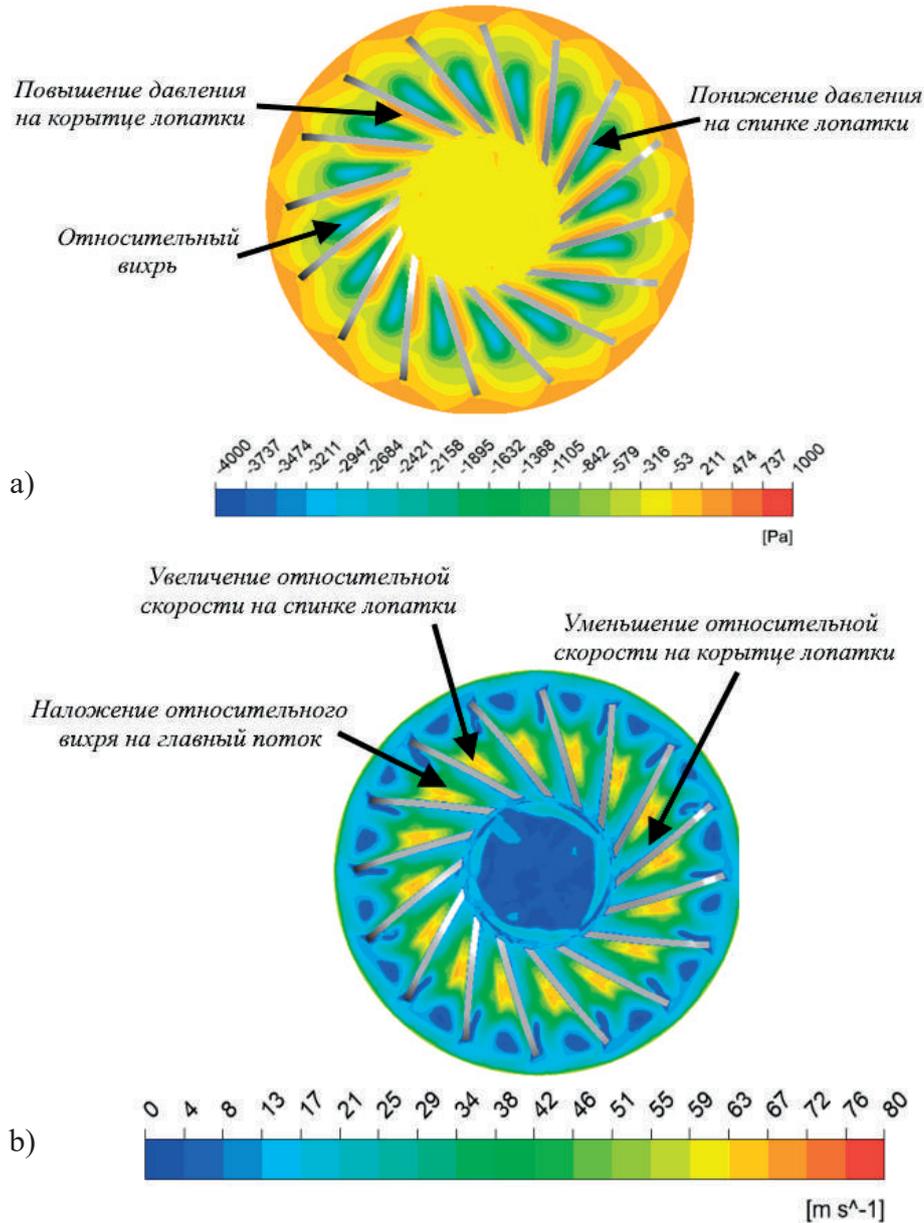
**Рисунок 6.** Распределение относительной скорости в поперечном сечении вентилятора

**Figure 6.** Relative velocity distribution in fan cross section

**Таблица 2.** Производительность вентиляторов при разных углах, м<sup>3</sup>/ч

**Table 2.** Fan performance at different angles, m<sup>3</sup>/h

		$\beta_2$			
		40°	50°	60°	70°
$\beta_1$	30°	108,65	111,11	116,5	125,10
	40°	108,48	111,22	116,5	124,83
	50°	108,76	111,98	116,59	124,48
	60°	109,25	112,63	117,04	122,92



a) эюра давлений, b) эюра скоростей

a) pressure diagram, b) velocity diagram

**Рисунок 7.** Процессы в самом производительном варианте

**Figure 7.** Processes at their highest performance

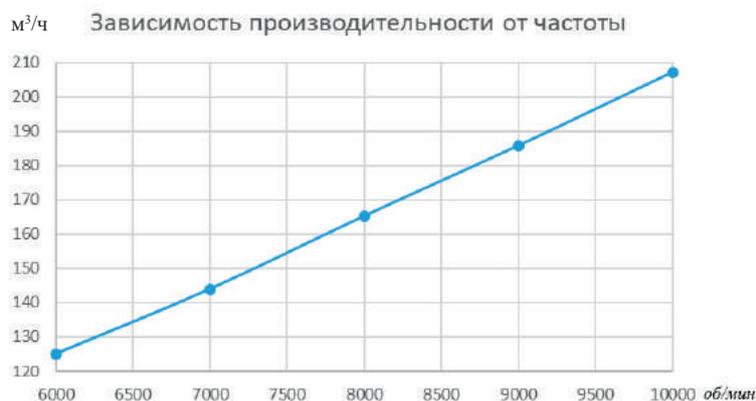


Рисунок 8. Производительность вентилятора при различных рабочих частотах

Figure 8. Fan performance at various operating frequencies

### Вывод

В данной работе произведена параметризация вентиляторного узла внешней системы охлаждения электрической машины. Рассматривается конструкция с 16 загнутыми лопатками. Цель параметризации — увеличение производительности вентилятора при сохранении габаритных характеристик. Для увеличения производительности до требуемых зна-

чений выполнена параметризация по входному и выходному углам ( $\beta_1$  и  $\beta_2$  соответственно). В результате серии расчетов наиболее оптимальным для рассматриваемой задачи оказалось соотношение  $\beta_1 = 30^\circ$  и  $\beta_2 = 70^\circ$ , которое обеспечивает необходимую производительность 120–200 м³/ч в зависимости от частоты вращения.

### Список источников

1. Борисенко А.И., Данько В.Г., Яковлев А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. М.: Энергия, 1974. 560 с.
2. Deisenroth D.C., Ohadi M. Thermal Management of High-Power Density Electric Motors for Electrification of Aviation and Beyond // *Energies*. 2019. Vol. 12. No. 19. P. 3594.
3. Tikadar A. e.a. Comparison of Electro-Thermal Performance of Advanced Cooling Techniques for Electric Vehicle Motors // *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 183. P. 116182.
4. Бак О. Проектирование и расчёт вентиляторов: Пер. с нем. М.: Госгортехиздат, 1961. 363 с.
5. Кузнецов В.И., Макаров В.В. Оптимизация параметров центробежного вентилятора с прямолинейными лопатками // *Омский научный вестник*. 2016. № 2 (146). С. 14–16. EDN: VWXTWR.
6. Wang H. e.a. Effects of the Impeller Blade with a Slot Structure on the Centrifugal Pump Performance // *Energies*. 2020. Vol. 13. No. 7. P. 1628.
7. Ding H., Chang T., Lin F. The Influence of the Blade Outlet Angle on the Flow Field and Pressure Pulsation in a Centrifugal Fan // *Processes*. 2020. Vol. 8. No. 11. P. 1422.

8. Han X. e.a. Impeller Optimized Design of the Centrifugal Pump: A Numerical and Experimental Investigation // *Energies*. 2018. Vol. 11. No. 6. P. 1444.
9. Буюкли Т.В., Попов Г.М., Горячкин Е.С. Демонстрация технологии многодисциплинарной оптимизации на примере лопатки экспериментального компрессора // *Авиационные двигатели*. 2019. № 4. С. 45–54. EDN: RWPRUP.
10. Chong Y.C. Thermal Analysis and Air Flow Modelling of Electrical Machines. 2015. 357 p.
11. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. М.: Энергоатомиздат, 1984. 416 с.

### References

1. Borisenko A.I., Dan'ko V.G., Yakovlev A.I. *Aerodinamika i teploperedacha v elektricheskikh mashinakh* [Aerodynamics and Heat Transfer in Electrical Machines]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 560 p. [in Russian].
2. Deisenroth D.C., Ohadi M. Thermal Management of High-Power Density Electric Motors for Electrification of Aviation and Beyond. *Energies*, 2019, Vol. 12, No. 19, pp. 3594.
3. Tikadar A. e.a. Comparison of Electro-Thermal Performance of Advanced Cooling

Techniques for Electric Vehicle Motors. *Applied Thermal Engineering*, 2021, Vol. 183, pp. 116182.

4. Bak O. *Proektirovanie i raschet ventilyatorov: Per. s nem.* [Design and calculation of fans: Transl. from German]. Moscow, Gosgortekhnizdat Publ., 1961. 363 p. [in Russian].

5. Kuznetsov V.I., Makarov V.V. Optimizatsiya parametrov tsentrobezhnogo ventilyatora s pryamolineinymi lopatkami [Optimization of Parameters of Centrifugal Fan with Straight Blades]. *Omskii nauchnyi vestnik — Omsk Scientific Bulletin*, 2016, No. 2 (146), pp. 14–16. EDN: VWXTWR.

6. Wang H. e.a. Effects of the Impeller Blade with a Slot Structure on the Centrifugal Pump Performance. *Energies*, 2020, Vol. 13, No. 7, pp. 1628.

7. Ding H., Chang T., Lin F. The Influence of the Blade Outlet Angle on the Flow Field and Pressure Pulsation in a Centrifugal Fan. *Processes*, 2020, Vol. 8, No. 11, pp. 1422.

8. Han X. e.a. Impeller Optimized Design of the Centrifugal Pump: A Numerical and Experimental Investigation. *Energies*, 2018, Vol. 11, No. 6, pp. 1444.

9. Buyukli T.V., Popov G.M., Goryachkin E.S. Demonstratsiya tekhnologii mnogodistsiplinarnoi optimizatsii na primere lopatki eksperimental'nogo kompressora [Demonstration of Multidisciplinary Optimization Technology on the Example of an Experimental Compressor Blade]. *Aviatsionnye dvigateli — Aviation Engines*, 2019, No. 4, pp. 45–54. EDN: RWPRUP. [in Russian].

10. Chong Y.C. Thermal Analysis and Air Flow Modelling of Electrical Machines. 2015. 357 p.

11. Cherkasskii V.M. *Nasosy, ventilyatory, kompressory* [Pumps, Fans, Compressors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 416 p. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 02.02.2023; одобрена после рецензирования 09.02.2023; принята к публикации 16.02.2023.*

*The article was submitted 02.02.2023; approved after reviewing 09.02.2023; accepted for publication 16.02.2023.*

Научная статья

УДК 621.313

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-62-72

## МЕТОДЫ ПРОГНОЗНОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН



**Вячеслав Игоревич Королев**

*Vyacheslav I. Korolev*

*аспирант кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов,  
НИУ «Московский энергетический институт»,  
Москва, Россия*

### Актуальность

В процессе эксплуатации электромеханических агрегатов их технические характеристики могут меняться, что может приводить к отказам техники. Как и все электромеханическое оборудование, вращающиеся машины подвергаются множеству различных неблагоприятных воздействий, таких как тепловые и экологические нагрузки и механические повреждения, которые требуют максимального внимания. В промышленности любые сбои и незапланированные простои машин или систем могут ухудшить или прервать основную деятельность компании, что потенциально может привести к значительным штрафам и неизмеримой потере репутации. Существующие традиционные подходы к обслуживанию (обслуживание по отказу или регламенту) страдают от некоторых допущений и ограничений, таких как высокие затраты на предотвращение или ремонт, неадекватные или неточные математические процессы деградации. В связи с тенденцией к применению интеллектуального производства, интеллектуального анализа данных, искусственного интеллекта предиктивный технический контроль предлагается в качестве нового типа обслуживания только после того, как аналитические модели предсказывают определенные сбои или деградации. Современные системы оценки технического состояния электромеханического оборудования представляют собой системы поддержки принятия, основанные на машинном обучении.

### Цель исследования

Целью исследования является общий обзор целей и задач технического обслуживания, которые в основном включают минимизацию затрат, максимизацию доступности/надежности и многокритериальную оптимизацию. Кроме того, предлагается обзор существующих подходов к диагностике и прогнозированию неисправностей в системах предиктивного технического контроля, которые включают две основные подкатегории: подходы, основанные на знаниях, и традиционные методы машинного обучения.

### Ключевые слова

электрические  
вращающиеся машины,  
прогнозный мониторинг,  
предиктивное  
обслуживание, система  
диагностики, машинное  
обучение

### Методы исследования

В настоящее время для диагностики неисправностей и прогнозирования сроков отказов электромеханических агрегатов разработано множество методов, основанных на обработке информации с измерительных преобразователей, в качестве которых используют акустические и вибрационные датчики, датчики токов и напряжений, датчики температуры и электромагнитные преобразователи, с использованием методов машинного обучения.

### Результаты

В статье представлен краткий обзор целей и подходов системы предиктивного технического обслуживания электромеханических систем, основанного на методах машинного обучения, применяемых в электромеханическом оборудовании. Представлен обзор различных методов предиктивного технического обслуживания с учетом их достоинств и недостатков. Рассматриваются примеры применения методов предиктивного технического контроля на реальных объектах. Приведен обзор существующих подходов на основе машинного обучения.

**Для цитирования:** Королев В.И. Методы прогнозного мониторинга технического состояния электрических машин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 2. Т. 19. С. 62-72. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-62-72>.

Original article

## METHODS OF PREDICTIVE MONITORING OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL SYSTEMS

### Relevance

During operation of electromechanical machines, their specifications may change, which can lead to machine failures. Like all electromechanical equipment, rotating machinery is subject to many different adverse effects, such as thermal and environmental stresses and mechanical damage, which require the utmost attention. In industry, any machine or system failure or unplanned downtime can degrade or interrupt a company's core business, potentially resulting in significant fines and immeasurable loss of reputation. Existing traditional approaches to maintenance (maintenance by failure or regulation) suffer from some assumptions and limitations, such as high prevention or repair costs, inadequate or inaccurate mathematical degradation processes. Due to the trend toward smart manufacturing, data mining, and artificial intelligence, predictive maintenance is proposed as a new type of maintenance only after analytical models predict certain failures or degradations. Modern systems for assessing the technical condition of electromechanical equipment are decision support systems based on machine learning.

### Aim of research

The aim of this research is to provide a general overview of maintenance goals and objectives, which mainly include cost minimization, availability/reliability maximization, and multicriteria optimization. In addition, an overview of existing approaches for fault diagnosis and prediction in predictive maintenance systems is proposed, which include two main subcategories: knowledge-based approaches and traditional machine learning methods.

### Keywords

electrical rotating machines, predictive monitoring, predictive maintenance, diagnostic system, machine learning

### Research methods

Currently, many methods based on processing information from measurement transducers, which use acoustic and vibration sensors, current and voltage sensors, temperature sensors, and electromagnetic transducers, using machine learning techniques, have been developed for fault diagnosis and failure time prediction of electromechanical units.

### Results

As a result, the paper presents a brief overview of the aims and approaches of a predictive maintenance system for electromechanical systems based on machine learning techniques used in various electromechanical equipment. An overview of various predictive maintenance methods is presented. An overview of existing approaches based on machine learning is given.

**For citation:** Korolev V. I. Metody prognoznogo monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya elektricheskikh mashin [Methods of Predictive Monitoring of the Technical Condition of Electrical Systems]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 2, Vol. 19, pp. 62-72. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-62-72>.

### Введение

В процессе эксплуатации электромеханических агрегатов их технические характеристики могут меняться, что может приводить к отказам техники. Как и все электромеханическое оборудование, вращающиеся машины подвергаются множеству различных неблагоприятных воздействий, таких как тепловые и экологические нагрузки и механические повреждения, которые требуют максимального внимания. Обычно в промышленности внимание должно быть еще больше, поскольку затраты на простой очень высоки.

Известны фундаментальные работы [1–6], посвященные базовым вопросам проектирования систем диагностики. Их анализ показал, что большинство современных методов диагностики технического состояния электрических машин и оборудования базируется на обработке и анализе вибрационных параметров. Эти методы являются основой функциональной (рабочей) диагностики. Комплексный анализ параметров вибрации предоставляет практически полную характеристику технического состояния работающей машины и позволяет прогнозировать возникновение неисправностей и аварий электромеханического оборудова-

ния. Проблема вибродатчиков состоит в том, что их нужно устанавливать в труднодоступные части электрической машины.

В настоящее время для диагностики неисправностей и прогнозирования сроков отказов электромеханических агрегатов разработано множество методов, основанных на обработке информации с измерительных преобразователей, в качестве которых используют акустические и вибрационные датчики, датчики токов и напряжений, датчики температуры и электромагнитные преобразователи, с использованием методов машинного обучения. Совокупность этих методов получило название предиктивное техническое обслуживание, которое включает в себя сбор данных для проведения анализа и позволяет производить ремонт тогда, когда в нем возникает необходимость. Благодаря этому можно, с одной стороны, не тратить средства и время на плановое обслуживание оборудования, которое и без ремонта способно нормально проработать еще несколько месяцев, с другой — снижается вероятность внепланового простоя, вызванного неожиданной поломкой.

В системах диагностики первичная информация, содержащая достаточно

большое количество паразитной информации, с датчиков предварительно обрабатывается, после чего выполняются распознавание, очищение и восстановление данных, классификация дефектов привода в реальном времени. Как правило, при этом реализуется комплексная диагностика неисправностей по двум направлениям: выявление механических и электромагнитных дефектов агрегата.

### Современные системы оценки технического состояния электрических машин

Современные системы оценки технического состояния электромеханического оборудования представляют собой системы поддержки принятия решений, основанные на машинном обучении. Основные направления — решение двух видов задач:

- определение состояния электрических машин с целью выявления дефектов и неисправностей;

- оптимизация управляющих воздействий на электромеханические объекты с целью повышения надежности работы оборудования и продления срока эксплуатации объектов.

На данный момент подобных систем поддержки принятия решения используется на реальных объектах в России крайне мало.

Обычно в промышленности подавляющее большинство программ мониторинга состояния основано на машинном анализе механических параметров. Наиболее часто применяемые методы: анализ вибрации, акустический анализ, ударный импульс и колебания скорости. Также применяются другие методы, такие как мониторинг температуры, анализ газов и т.д. Для анализа данных параметров применяют методы машинного обучения.

Рассмотрим основные методы машинного обучения. Каждый из методов обла-

дает как достоинствами, так и недостатками.

### Метод Байеса

Теорема Байеса — это один из способов преодоления неопределенности данных с помощью формулы Байеса, определяющей зависимость между вероятностью искомого события при условии, что произошло другое событие, которое связано с искомым статистически, выражающейся следующим образом:

$$P(X|Y) = \frac{P(Y|X)P(X)}{P(Y)},$$

где  $P(X)$  — априорная вероятность гипотезы  $X$ ;

$P(X|Y)$  — вероятность гипотезы  $X$  при наступлении события  $Y$  (апостериорная вероятность);

$P(Y|X)$  — вероятность наступления события  $Y$  при истинности гипотезы  $X$ ;

$P(Y)$  — полная вероятность наступления события  $Y$ .

Данный метод позволяет вычислить численную вероятность того, что свершившееся событие было вызвано данной причиной (предполагаемым событием, повлекшим данное — гипотезой), то есть, «реверсировать причинно-следственную связь» [7].

Реализация системы оценки состояния электромеханического оборудования, основанная на таком подходе, требует большого объема предварительной информации, в том числе подразумевает, что априорное распределение известно до начала наблюдений. Другими словами, при использовании данного метода предварительно должна быть выполнена большая работа по анализу статистических данных и определению всех вероятностей.

Кроме того, одним из основных минусов метода Байеса является «подавление» редко встречающихся событий, что накладывает определенные ограничения на использование данного метода для оценки состояния оборудования.

Метод Байеса используется, например, для прогнозирования неисправностей в асинхронных машинах [8]. Графическая структура Байесовского метода была построена на основе имеющихся знаний о поведении системы, механизмах деградации, функциональной декомпозиции и связях между компонентами системы.

### **Нейро-нечеткий логический вывод**

Модели приближенных рассуждений, основанные на нечетко-логическом выводе, зарекомендовали себя как эффективное средство интеллектуализации систем управления, принятия решений и распознавания образов [9].

Наряду с уменьшением вычислительной сложности и, как следствие, упрощением программной реализации, данный подход обеспечивает ряд дополнительных преимуществ, таких как работоспособность в условиях неполноты исходной информации, возможность разработки макета моделируемой системы с последующей ее настройкой.

Для использования методов нейро-нечеткой логики возможно применение системы математического программирования MatLAB (модуль ANFIS-редактор). Рекомендуемое минимальное число нечетких правил определяется на основании рекомендаций из [10] и подбирается под конкретную задачу.

Один из вариантов данного метода применяется при контроле состояния изоляции кабелей [11]. Такой подход позволяет получать более достоверные результаты выходного параметра или оценки состояния изоляции по сравнению с применением моделей, ориентированных на обработку только количественных исходных данных [12].

### **Метод многомерной оценки состояния**

Некоторые установленные на электростанциях современные пункты техниче-

ского контроля (ПТК) автоматического управления могут включать в себя встроенные системы ранней диагностики отказа. В их основу, как правило, положены статистические модели обнаружения аномалий, работающие по принципу: если текущее состояние оборудования существенно отличается от состояния, характерного для нормального режима, то это признак аномального функционирования [13]. Недостатком этих систем является, с одной стороны, зачастую позднее обнаружение аномалии, когда времени на ее устранение уже нет, и, с другой стороны, значительное количество ложных предупреждений о возможной аварии. Одно из решений проблемы обнаружения отклонения в функционировании объекта — использование метода многомерной оценки состояния [13] совместно с моделями машинного обучения: линейной и логистической регрессией.

В методе многомерной оценки состояния основополагающим показателем является критерий, называемый критерием Хотеллинга. Степень аномальности в техническом состоянии оценивается относительно данного критерия путем сравнения данных, полученных при измерении с данными эмпирических моделей, для построения которых использовались статистические методы.

Таким образом, задача прогнозного мониторинга вращающихся электрических машин может быть решена путем наблюдения за расхождением между критерием Хотеллинга и получаемыми данными и своевременной реакцией на результат наблюдения.

Благодаря данному методу появляется возможность обнаружения мельчайших деградаций в техническом состоянии в режиме реального времени (отклонение поступающих данных от «эталонных»). Таким образом можно своевременно обнаружить дефект и произвести планирование его устранения.

## Генетические алгоритмы

Генетические алгоритмы — это процедуры адаптивного поиска, которые имитируют биологические процессы отбора и эволюции для решения задач как ограниченной, так и неограниченной оптимизации. Основываясь на аналогичном принципе работы, генетические алгоритмы рассматривают совокупность решений, которые через ряд шагов эволюционируют с течением времени для достижения оптимального решения. Подобно тому, как биологические виды приспособляются к своей среде и сохраняют полезные черты между последующими поколениями, генетические алгоритмы используют информацию о том, как работают решения, чтобы направлять поиск в пространстве поиска. Таким образом, их можно использовать в сложных одноцелевых и многоцелевых задачах, чтобы генерировать решения, которые приведут к оптимальному результату. Типичный генетический алгоритм работает в соответствии с блок-схемой, показанной на рисунке 1 [14].

Сначала случайным образом создается популяция — группа исследуемых объектов. В нем каждый объект представляет возможное решение проблемы принятия решения, и оно закодировано с использованием двоичного кода или других представлений. Во-вторых, каждый объект оценивается в соответствии с его пригодностью по отношению к заранее определенной цели, и ему присваивается балл (пригодность). Объектам присваивается вероятность выбора на основе их оценок пригодности. После отбора пары особей рекомбинируют с помощью алгоритмов кроссовера (например, одноточный кроссовер) для создания новых особей популяции. Новые варианты объекта получаются в следствии «мутации» — объединения свойств двух объектов или закодированной информации о них. Мутация достигается путем инверсии определенного числа кодов информации, выбранных случайным образом, пропорционально скорости мутации.

Данный метод используется для анализа состояния ветряной электростанции

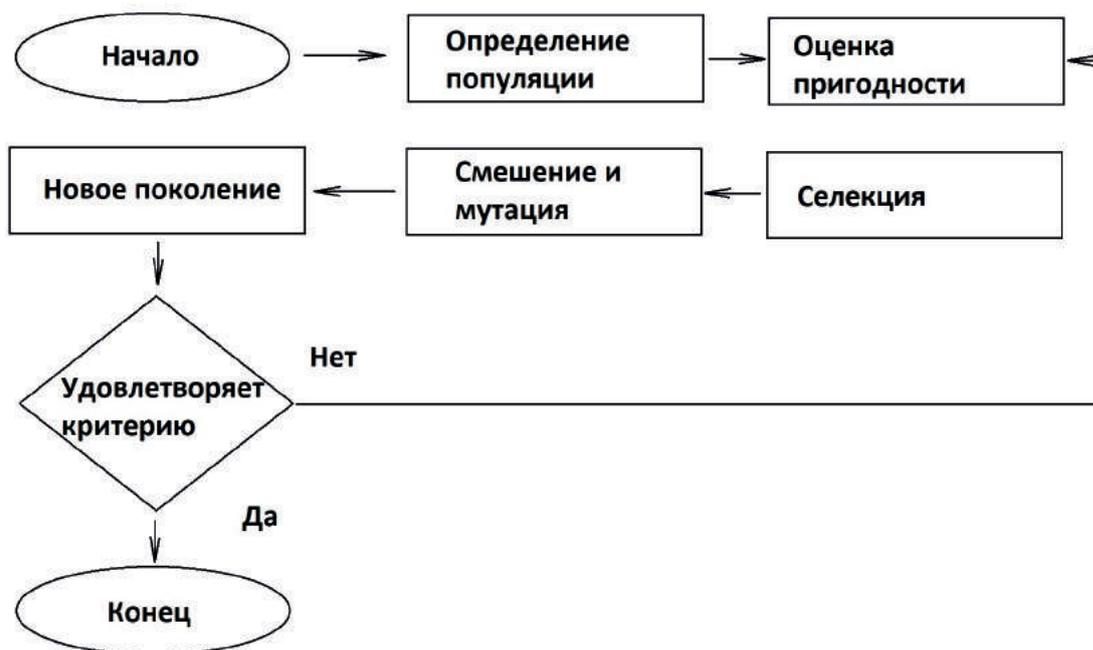


Рисунок 1. Блок-схема генетического алгоритма

Figure 1. Genetic algorithm block diagram

Westermost Rough Wind Farm у восточного побережья Англии, которая начала работу в 2015 году. Эта ветряная электростанция состоит из 35 турбин Siemens SWT-6.0-154 каждая мощностью 6,0 МВт [15, 16].

### «Случайный лес»

Этот алгоритм основан на построении большого числа деревьев решений, каждое из которых строится по набору, получаемому из исходной обучающей выборки с возвращением. Особенностью является то, что при построении каждого дерева на каждой стадии ветвления вершины используется фиксированное число случайно отбираемых параметров обучающей выборки и строится полное (без усечения) дерево (рисунок 2).

Модель включает в себя несколько подмоделей, прогнозирующих отказ оборудования, используя фактические и прогнозируемые показания с датчиков. Оценка регрессии осуществляется с помощью усреднения оценок регрессии всех деревьев. Задача регрессии сводится к задаче классификации. Диапазон допустимых значений делится на отрезки.

Один отрезок — один класс. Чем более разнообразны классификаторы ансамбля, тем выше вероятность корректности прогнозирования. Обучение модели проводится на нормальных данных, а настройка модели на данных о предыдущих поломках [17].

Данный метод может быть рассмотрен на примере работы [19], в которой метод случайного леса применяется для прогнозирования отказов электродвигателя, когда в качестве входных параметров используются ток двигателя, осевое смещение вала и осевое смещение двигателя. Для обучения необходимы только данные при нормальном режиме работы агрегата, в отличие от других методов, при которых для обучения необходимы данные до и во время неисправности оборудования.

### Анализ результатов

В данной статье проведен анализ различных методов машинного обучения. Результаты анализа сведены в таблицу 1, в которой проводится сопоставление методов машинного обучения, используемых при предиктивном техническом обслуживании электрических машин.

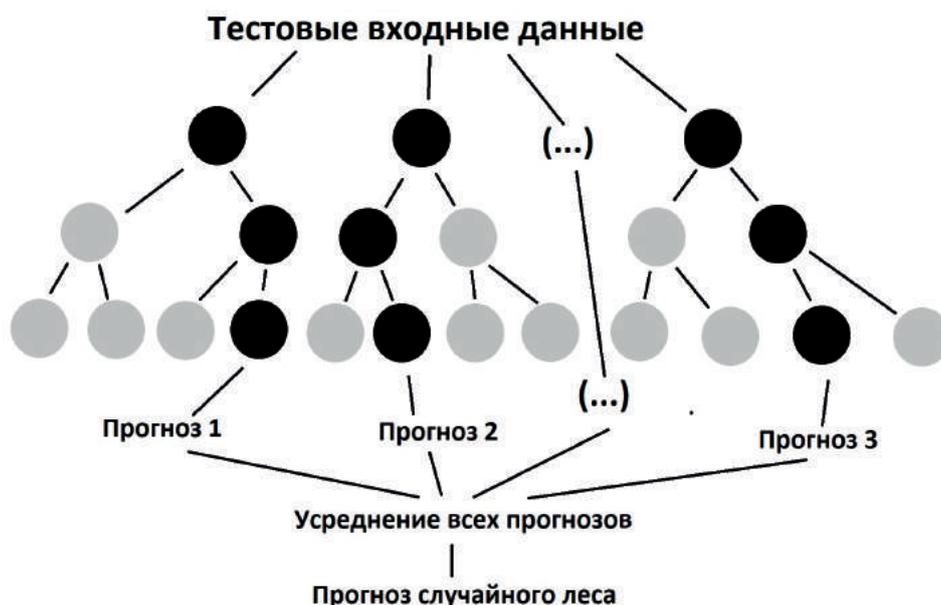


Рисунок 2. Упрощенная схема «случайного леса» [18]

Figure 2. Simplified scheme «random forest» [18]

**Таблица 1.** Сопоставление различных методов машинного обучения, используемых для предиктивного обслуживания**Table 1.** Comparison of different machine learning methods used for predictive maintenance

Наименование	Достоинства	Недостатки	Примеры применения
Метод Байеса	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Достаточно знания априорной информации</li> <li>•Утверждения легки для понимания</li> <li>•Способ использования субъективных вероятностных оценок</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Определение всех взаимодействий не всегда выполнимо</li> <li>•Требует знания множества условных вероятностей</li> <li>•Основано на экспертных оценках</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Прогнозирование неисправностей в асинхронных машинах [8]</li> <li>•Диагностика неисправностей асинхронных машин [20]</li> </ul>
Нейронечеткий вывод	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Можно обучать с помощью метода обратного распространения ошибки и эволюционных алгоритмов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Необходим большой объем экспериментальных данных</li> <li>•имеет зоны нечувствительности</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Диагностика неисправностей подшипников [21, 22]</li> <li>•Система контроля состояния изоляции [11]</li> </ul>
Метод многомерной оценки состояния	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Малое количество заранее установленных параметров;</li> <li>•Эффективен при определении значений целевой функции</li> <li>•Позволяет разрабатывать и представлять модели систем в форме правил нечетких продукций</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Трудности, связанные с масштабированием задачи</li> <li>•Алгоритм работает медленно</li> <li>•Не существует простого способа изменения размеров симплекса без пересчёта всех значений целевой функции</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Прогноз оставшегося полезного срока службы электродвигателя [23]</li> <li>•Раннее предупреждение о неисправности электродвигателя [24]</li> </ul>
Генетические алгоритмы	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Хороший подход к обучению классификаторов полуконтролируемым способом</li> <li>•Не вносит детерминированного смещения</li> <li>•Может использоваться для решения проблемы дисбаланса классов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Обучение нестабильно</li> <li>•Алгоритму сложно научиться генерировать дискретные данные</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Анализ состояния ветряной электростанции [16]</li> </ul>
«Случайный лес»	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Выявление латентных связей у нескольких сигналов</li> <li>•В процессе обучение алгоритм умеет выявлять значимые параметры</li> <li>•Хорошо подходит для анализа данных сложной структуры</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Большие размеры деревьев</li> <li>•Неустойчивая структура</li> <li>•Легко «перегрузить» расчет</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Прогнозирование сроков отказов электродвигателя [19]</li> </ul>

## Выводы

В настоящее время наблюдается переход от традиционных подходов к техническому обслуживанию электромеханических систем в виде обслуживания по отказу или регламенту к предиктивному техническому обслуживанию. В данной работе представлен обзор целей и подхо-

дов системы предиктивного технического обслуживания электромеханических систем, основанного на методах машинного обучения. Производится обзор различных методов предиктивного технического обслуживания. Приведен обзор существующих подходов на основе машинного обучения.

## Список источников

1. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования. Санкт-Петербург: Лань, 2017. 376 с.
2. Geitner F.K., Bloch H.P. Machinery Failure Analysis and Troubleshooting. Butterworth-Heinemann, 2012. 743 с.
3. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. Л.: Энергомашиниздат, 1989. 334 с.
4. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М., 1996. 276 с.
5. Тэттер В.Ю., Тэттер А.Ю., Барашук В.С. Диагностирование подшипниковых и редукторных узлов на переходных режимах. 2005. 90 с.
6. Барков А.В. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации. Санкт-Петербург, 1999. 156 с.
7. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
8. Choudhary A., Meena D. C., Patra A.K. Asynchronous Motor Modeling in Simulink for Stator and Rotor Fault Analysis // International Conference on Green and Human Information Technology. 2019. P. 4.
9. Панкова Л.А., Пронина В.А. Семантический текстовый поиск, основанный на теории нечетких множеств // Искусственный интеллект и принятие решений. 2013. № 3. С. 19-23. EDN: RBSVQB.
10. Бобырь М.В., Кулабухов С.А., Милостная Н.А. Обучение нейро-нечеткой системы на основе метода разности площадей // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. Вып. 4. С. 15–26. EDN: XIROEN.
11. Куделина Д.В. Нечеткая система контроля состояния изоляции // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2017. Вып. 41. С. 102–107. EDN: YIZQIX.
12. Gu C., He Y., Han X., Chen Z. Product Quality Oriented Predictive Maintenance Strategy for Manufacturing Systems // 2017 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin). IEEE, 2017. P. 1–7.
13. Lu B., Zhou X., Li Y. Joint Modeling of Preventive Maintenance and Quality Improvement for Deteriorating Single-Machine Manufacturing Systems // Computers & Industrial Engineering. 2016. Vol. 91. P. 188–196.
14. Громак Е.В., Наумов С.А., Шишов В.А. Система удаленного мониторинга и прогностики АО «РОТЕК» как элемент энергетической безопасности. М., 2016. 46 с.
15. Aggarwal S., Garg R., Goswami P. A Review Paper on Different Encoding Schemes Used in Genetic Algorithms // Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. 2014. No. 4 (1). P. 596–600.
16. Rinaldi G., Pillai A.C., Thies P.R., Johanning L. Multiobjective Optimization of the Operation and Maintenance Assets of an Offshore Wind Farm Using Genetic Algorithms // Wind Engineering. May, 2019. No. 44 (1). doi: <https://doi.org/10.1177/0309524X19849826>.
17. Three Offshore Wind Projects Secure Contracts for Difference as Strike Prices Go down // OffshoreWIND.biz [Electronic Resource]. 2017. Available: <https://www.offshorewind.biz/2017/09/11/three-offshore-wind-projects-secure-contracts-for-difference-as-strike-prices-go-down/>. (Дата обращения 01.03.2023).
18. Шахов Н.И., Варфоломеев И.А., Ершов Е.В., Юдина О.В. Прогнозирование отказов оборудования в условиях малого количества поломок // Вестник Череповецкого государственного университета. 2016, № 6 (75). С. 36–42. EDN: XAMDLZ.
19. Чистяков С.П. Случайные леса: обзор // Труды Карельского научного центра РАН. 2013. No. 2. P. 117–136.
20. Haidong S., Hongkai J. Intelligent Fault Diagnosis of Rolling Bearing Using Deep Wavelet Auto-Encoder With Extreme Learning Machine // Knowledge-Based Systems. 2018. Vol. 140. P. 1–14.
21. Benkercha R., Moulahoum S. Fault Detection and Diagnosis Based on C4.5 Decision Tree Algorithm for Grid Connected PV System // Solar Energy. 2018. Vol. 173. P. 610–634.

22. Berredjem T., Benidir M. Bearing Faults Diagnosis Using Fuzzy Expert System Relying on an Improved Range Overlaps and Similarity Method // *Expert Systems with Applications*. 2018. Vol. 108. P. 134–142.

23. Liu Z., Mei W., Zeng X., Yang C., Zhou X. Remaining Useful Life Estimation of insulated Gate Bipolar Transistors Based on a Novel Volterra Optimally Pruned Extreme Learning Machine Model Using Degradation Data // *Sensors*. 2017. Vol.17. No. 11. P. 2524.

24. Chen X.-L., Wang P.-H., Hao Y.-S., Zhao M. Evidential KNN-Based Condition Monitoring and Early Warning Method with Applications in Power Plant // *Neurocomputing*. 2018. Vol. 315. P. 18–32.

### References

1. Nosov V.V. *Diagnostika mashin i oborudovaniya* [Diagnostics of Machinery and Equipment]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2017. 376 p. [in Russian].

2. Geitner F.K., Bloch H.P. *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*. Butterworth Heinemann, 2012. 743 p.

3. Gemke R.G. *Neispravnosti elektricheskikh mashin* [Failures of Electrical Machines]. Leningrad, Energomashinizdat Publ., 1989. 334 p. [in Russian].

4. Shirman A.R., Solov'ev A.B. *Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoyaniya mekhanicheskogo oborudovaniya* [Practical Vibrodiagnostics and Monitoring of Mechanical Equipment Condition]. Moscow, 1996. 276 p. [in Russian].

5. Tetter V.Yu., Tetter A. Yu., Barashchuk V.S. *Diagnostirovanie podshipnikovyx i reduktornykh uzlov na perekhodnykh rezhimakh* [Diagnosis of Bearing and Gearbox Units in Transient Modes]. 2005. 90 p. [in Russian].

6. Barkov A.V. *Intellektual'nye sistemy monitoringa i diagnostiki mashin po vibratsii* [Intelligent Machinery Monitoring and Diagnosis Systems by Vibration]. Saint-Petersburg, 1999. 156 p. [in Russian].

7. Birger I.A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical Diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 240 p. [in Russian].

8. Choudhary A., Meena D. C., Patra A.K. Asynchronous Motor Modeling in Simulink for Stator and Rotor Fault Analysis. *International Conference on Green and Human Information Technology*, 2019, pp. 4.

9. Pankova L.A., Pronina V.A. Semanticheskii tekstovyi poisk, osnovannyi na teorii nechetkikh mnozhestv [Semantic Text Retrieval Based on Fuzzy Set Theory]. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii — Artificial Intelligence and Decision*

*Making*, 2013, No. 3, pp. 19–23. EDN: RBSVQB. [in Russian].

10. Bobyr' M.V., Kulabukhov S.A., Milostnaya N.A. Obuchenie neuro-nechetkoi sistemy na osnove metoda raznosti ploshchadei [Teaching of Neuro-Fuzzy System on the Basis of the Method of Difference Areas]. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii — Artificial Intelligence and Decision Making*, 2016, Issue 4, pp. 15–26. EDN: XIROEN. [in Russian].

11. Kudelina D.V. Nechetkaya sistema kontrolya sostoyaniya izolyatsii [Fuzzy System of Insulation Condition Monitoring]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika — Scientific Bulletin of the Belgorod State University. Series: Economy. Computer Science*, 2017, Issue 41, pp. 102–107. EDN: YIZQIX. [in Russian].

12. Gu C., He Y., Han X., Chen Z. Product Quality Oriented Predictive Maintenance Strategy for Manufacturing Systems. *2017 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin)*, IEEE, 2017, pp. 1–7.

13. Lu B., Zhou X., Li Y. Joint Modeling of Preventive Maintenance and Quality Improvement for Deteriorating Single-Machine Manufacturing Systems. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, Vol. 91, pp. 188–196.

14. Gromak E.V., Naumov S.A., Shishov V.A. *Sistema udalennogo monitoringa i prognostiki AO «ROTEK» kak element energeticheskoi bezopasnosti* [ROTEK JSC Remote Monitoring and Prognostics System as an Element of Energy Security]. Moscow, 2016. 46 p. [in Russian].

15. Aggarwal S., Garg R., Goswami P. A Review Paper on Different Encoding Schemes Used in Genetic Algorithms. *Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 2014, No. 4 (1), pp. 596–600.

16. Rinaldi G., Pillai A.C., Thies P.R., Johanning L. Multiobjective Optimization of the Operation and Maintenance Assets of an Offshore Wind Farm Using Genetic Algorithms. *Wind Engineering*, May, 2019, No. 44 (1). doi: <https://doi.org/10.1177/0309524X19849826>.

17. Three Offshore Wind Projects Secure Contracts for Difference as Strike Prices Go Down. *OffshoreWIND.biz* [Electronic Resource]. 2017. Available: <https://www.offshorewind.biz/2017/09/11/three-offshore-wind-projects-secure-contracts-for-difference-as-strike-prices-go-down/>. [Accessed 01.03.2023].

18. Shakhov N.I., Varfolomeev I.A., Ershov E.V., Yudina O.V. Prognozirovanie otkazov oborudovaniya v usloviyakh malogo kolichestva polomok [Prediction of Equipment Failures in

Conditions of Small Number of Breakages]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta — Vestnik of Cherepovets State University*, 2016, No. 6 (75), pp. 36–42. EDN: XAMDLZ. [in Russian].

19. Chistyakov S.P. Sluchainye lesa: obzor [Random Forests: a Review]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions of Karelian Research Centre of RAS]. 2013, No. 2, pp. 117–136. [in Russian].

20. Haidong S., Hongkai J. Intelligent Fault Diagnosis of Rolling Bearing Using Deep Wavelet Auto-Encoder With Extreme Learning Machine. *Knowledge-Based Systems*, 2018, Vol. 140, pp. 1–14.

21. Benkercha R., Moulahoum S. Fault Detection and Diagnosis Based on S4.5 Decision Tree Algorithm for Grid Connected PV System. *Solar Energy*, 2018, Vol. 173, pp. 610–634.

22. Berredjem T., Benidir M. Bearing Faults Diagnosis Using Fuzzy Expert System Relying on an Improved Range Overlaps and Similarity Method. *Expert Systems with Applications*, 2018, Vol. 108, pp. 134–142.

23. Liu Z., Mei W., Zeng X., Yang C., Zhou X. Remaining Useful Life Estimation of Insulated Gate Bipolar Transistors Based on a Novel Volterra Optimally Pruned Extreme Learning Machine Model Using Degradation Data. *Sensors*, 2017, Vol. 17, No. 11, pp. 2524.

24. Chen X.-L., Wang P.-H., Hao Y.-S., Zhao M. Evidential KNN-Based Condition Monitoring and Early Warning Method with Applications in Power Plant. *Neurocomputing*, 2018, Vol. 315, pp. 18–32.

*Статья поступила в редакцию 03.03.2023; одобрена после рецензирования 10.03.2023; принята к публикации 12.04.2023.*

*The article was submitted 03.03.2023; approved after reviewing 10.03.2023; accepted for publication 12.04.2023.*

Научная статья

УДК 621.3

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-73-79

## АНАЛИЗ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ

*Даниил Викторович Купцов***Daniil V. Kupstov***аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия**Регина Тагировна Хазиева***Regina T. Khazieva***кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия*

### Актуальность

Индуктивно-емкостный преобразователь (ИЕП) является одним из основных элементов устройства заряда емкостного накопителя. При помощи правильного выбора схемы ИЕП в конкретном устройстве можно добиться необходимых показателей энергоэффективности конечной установки. В статье ставится задача выбора наиболее энергоэффективной схемы исполнения индуктивно-емкостного преобразователя для устройства заряда емкостного накопителя, который может использоваться в устройстве электрогидроимпульсной очистки, а также в станциях зарядки электромобилей.

### Цель исследования

Провести аналитический обзор существующих схем индуктивно-емкостного преобразователя тока и выбрать наиболее энергоэффективную схему для устройства заряда емкостного накопителя.

### Методы исследования

Аналитический обзор научной литературы.

### Результаты

В результате проведенного аналитического обзора существующих схмотехнических исполнений индуктивно-емкостного преобразователя выбрана схема, которая удовлетворяет необходимым требованиям энергоэффективности.

### Ключевые слова

индуктивно-емкостный преобразователь, устройство заряда емкостного накопителя, устройство электрогидроимпульсной очистки, станция зарядки электромобилей

**Для цитирования:** Купцов Д. В., Хазиева Р. Т. Анализ схмотехнических решений и способов повышения энергетической эффективности зарядных устройств // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 2. Т. 19. С. 73-79. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-73-79>.

## ANALYSIS OF CIRCUIT SOLUTIONS AND WAYS TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY

### Relevance

An inductive-capacitive converter (ICC) is one of the main elements of a capacitive storage device. With the right choice of the ICC scheme in a particular device, it is possible to achieve the necessary energy efficiency indicators of the final installation. The article sets the task of choosing the most energy-efficient design scheme of an inductive-capacitive converter for a capacitive storage device, which can be used in an electrohydroimpulse cleaning device, as well as in electric vehicle charging stations.

### Aim of research

Conduct an analytical review of existing circuits of an inductive-capacitive current converter and choose the most energy-efficient circuit for charging a capacitive storage device.

### Research methods

Analytical review of scientific literature.

### Results

As a result of the analytical review of the existing circuit designs of the inductive-capacitive converter, a circuit that meets the necessary energy efficiency requirements has been selected.

### Ключевые слова

inductive-capacitive converter, capacitive storage charge device, electrohydroimpulse-cleaning device, electric vehicle charging station

**For citation:** Kuptsov D. V., Khazieva R. T. Analiz skhemotekhnicheskikh resheniy i sposobov povysheniya energeticheskoy effektivnosti zaryadnykh ustroystv [Analysis of Circuit Solutions and Ways to Increase Energy Efficiency]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 2, Vol. 19, pp. 73-79. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-73-79>.

В настоящее время большинство источников питания в составе различных электронных систем построены на основе индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП) тока. В представленной статье мы будем рассматривать индуктивно-емкостный преобразователь в составе устройства заряда емкостного накопителя. Это устройство относится к импульсной технике повышенной мощности [1, 2].

На данный момент наиболее распространенными схемотехническими исполнениями ИЕП являются Г-образная и Т-образная схемы Бушера (рисунок 1), а также мостовая схема Штейнметца (рисунок 2). Отличиями данных схем являются очередность и количество составных элементов, а также исполнение катушек индуктивности.

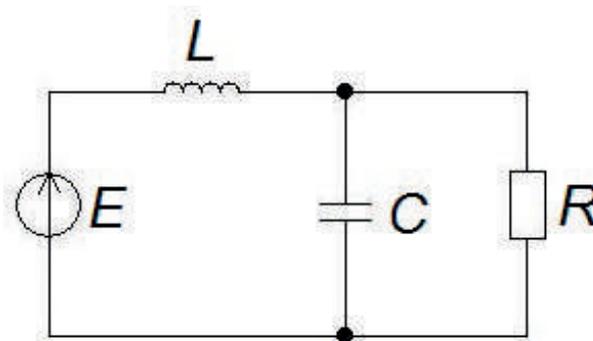
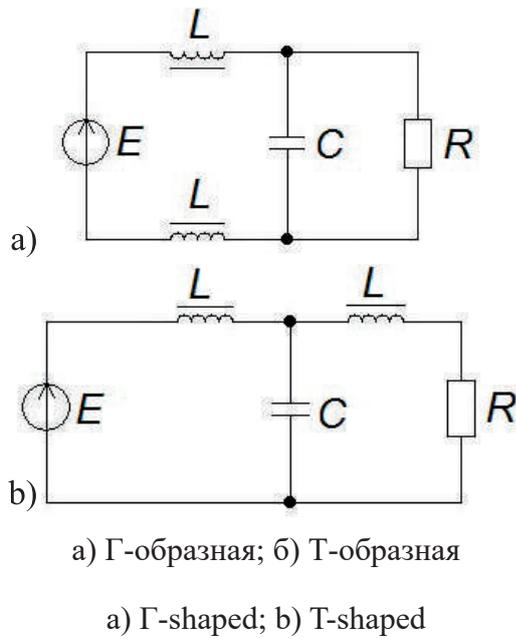


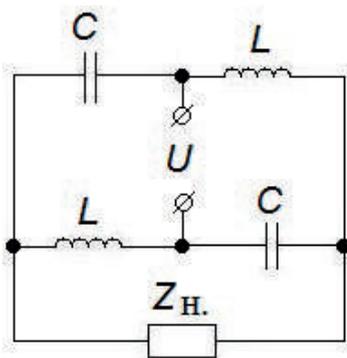
Рисунок 1. Г-образная схема ИЕП

Figure 1. Г-shaped ICC scheme

Достоинствами Г-образного исполнения ИЕП (рисунок 1) являются низкое количество искажений, несложность построения, хорошие массогабаритные показатели. В качестве недостатков можно выделить малые показатели коэффициента полезного действия (КПД) и коэффициента мощности [3].



**Рисунок 2.** Схемы Бушери  
**Figure 2.** Bouchereau diagrams



**Рисунок 3.** Мостовая схема Штейнметца  
**Figure 3.** Steinmetz bridge diagram

В таких видах исполнения, как Т-образная схема Бушери (рисунок 2, б) и схема Штейнметца (рисунок 3), наоборот, более высокие показатели КПД и коэффициента мощности, но проигрывают по массогабаритным показателям и искажениям напряжения в электрической сети [4].

Для достижения более высокой точности стабилизации тока нагрузки и сравнительно лучших массогабаритных показателей ИЕП необходимо выполнить построение преобразователя по симметричной схеме с катушками индуктивности, обладающими взаимной индуктив-

ностью обусловленной наличием магнитной связи между данными катушками индуктивности [5]. Так, например, в Т-образной схеме Бушери, катушки индуктивности, разнесенные на главном магнитопроводе, связаны магнитной связью (рисунок 2, а).

В сравнении с последовательным исполнением симметричная схема Бушери более предпочтительна, так как она обладает лучшими энергетическими и массогабаритными характеристиками, а также улучшенными стабилизационными свойствами (рисунок 2, б) [6–8].

Благодаря таким характеристикам, как простота, надежность схемы и высокая энергетическая эффективность индуктивно-емкостные преобразователи, построенные по схемам Бушери и Штейнметца, являются наиболее распространенными в устройствах заряда емкостных накопителей тока.

Рассмотрим Г-образную схему индуктивно-емкостного преобразователя. Она обладает такими положительными характеристиками, как простота построения, малое влияние на питающую сеть и отличная электромагнитная совместимость. Отрицательными свойствами же являются низкие энергетические показатели.

По результатам аналитического обзора источников [1–8] составлена сравнительная таблица 1.

Авторами в ходе аналитического обзора исследованы существующие схемы исполнения индуктивно-емкостного преобразователя. Из таблицы сравнительного анализа (таблица 1) следует, что симметричная Т-образная схема Бушери с магнитной связью между катушками индуктивности является наиболее совершенной, обладает улучшенными стабилизационными свойствами и энергетическими показателями, меньшими массой и габаритами, поэтому она лучше подходит для исполнения индук-

**Таблица 1.** Сравнительный анализ схем ИЕП**Table 1.** Comparative analysis of ICC schemes

Критерий сравнения	Г-образная схема Бушера	Симметричная Г-образная схема Бушера	Мостовая схема Штейнметца
Конструкция	Простая	Простая	Сложная
Уровень искажений	Низкий уровень нелинейных искажений	Низкий уровень нелинейных искажений	Высокий уровень нелинейных искажений
Массогабаритные показатели	Низкие	Низкие	Высокие
Энергетические показатели	Низкие энергетические показатели	Высокие энергетические показатели — КПД и коэффициент мощности	Высокие энергетические показатели — КПД и коэффициент мощности

тивно-емкостного преобразователя в устройстве заряда емкостного накопителя, которое может использоваться в установке электрогидроимпульсной очистки, а также в станциях зарядки электромобилей.

В представленном литературном обзоре приводятся результаты анализа научной литературы, патентов и технической документации по способам и устройствам повышения энергетической эффективности зарядных устройств. Вторая часть литературного обзора посвящена исследованиям гибридных электромагнитных элементов, использование которых в устройствах заряда является ключевой особенностью данного исследования. Проанализировано более двухсот статей и патентов. Далее приводится краткий литературный обзор на основе данных источников, предлагается рассмотреть основные типы зарядных станций.

### **1. Стационарные зарядные станции**

В [9] представлен тип станций, выполненных в виде зданий или сооружений, получающих энергию от электросети или местного электрогенератора. Данные в [10] позволяют располагать статисти-

ческими данными 2019 г. по численности стационарных зарядных станций в количестве 5,2 млн. В зависимости от доступности подобных решений они подразделяются на общественные и частные зарядные станции, также в [10] отражен один из главных недостатков подобных решений — это медленная скорость зарядки, данный тип подходит для установки дома и на работе, где введен частный доступ, на стоянках жилого комплекса, дома или бизнес-центра.

### **2. Технологии бесконтактной зарядки**

В отличие от стандартных способов зарядки аккумуляторов описываемая технология подразумевает зарядку без соединения с устройством заряда либо замену разряженного аккумулятора на заряженный. Беспроводная передача энергии предполагает зарядку посредством магнитной связи, реализуемой за счет установки катушек на дороге, данная технология лишь исследуется, и среди исследований имеются два общих подхода: емкостная передача мощности и индуктивная передача мощности. Технология замены батареи рассматривается в [11] и заключается в устройстве,

заменяющем разряженную батарею на полностью заряженную, данный процесс в среднем занимает несколько минут.

### **3. Мобильные зарядные станции**

В статье [12] мобильная зарядная станция рассматривается как новый тип оборудования для зарядки, предоставляющего свои услуги в любом месте и в любое время. Мобильные зарядные станции в большинстве своем представляют из себя фургон или грузовик, оснащенный одной или несколькими зарядными батареями. Основные варианты их исполнения приведены в источниках [13, 14].

В исследовании [15] представлены данные о том, что пользователи общественных зарядных станций в среднем тратят на зарядку на 45 мин больше необходимого времени для полной зарядки, что является дополнительным мотивом для использования мобильной версии станции. Помимо этого, в статье [16] сделан вывод о том, что во многих крупных городах большинство жителей не имеют собственного гаража, а, следовательно, не располагают местом для зарядки.

#### **Основные направления исследований устройств заряда**

Таким образом, можно выделить несколько тем для дальнейшего исследования зарядных станций.

Если рассматривать вопрос с точки зрения электрических сетей и распределения энергии, то одним из направлений является изучение внедрения мобильных зарядных станций для снижения негативного влияния в сети от стационарных

накопителей. Следовательно, необходимо уделить внимание изучению эффекта влияния на стабильность электрической сети и качества электроэнергии при использовании мобильной зарядной станции. Помимо этого, можно рассмотреть слияние нескольких технологий зарядки, в том числе связанную с заменой аккумуляторов, для получения гибридной версии зарядной станции.

Еще одним важным направлением исследований является снижение массогабаритных показателей преобразователей электрической энергии. Наличие батареи, инверторов, выпрямителей и фильтров значительно повышает массу.

#### **Вывод**

В результате сравнения существующих схемотехнических решений индуктивно-емкостного преобразователя была выбрана симметричная T-образная схема Бушера, так как она обладает лучшими энергетическими показателями по сравнению с другими исследуемыми схемами. Использование более энергоэффективной схемы в составе устройств импульсной техники поможет снизить расходы на электроэнергию и более дорогостоящие элементы устройства.

В результате аналитического обзора литературных источников выявлено, что наиболее актуальным направлением исследований зарядных устройств является внедрение мобильных зарядных станций для снижения негативного влияния в сети, а также разработка гибридных версий зарядных станций и снижение их массогабаритных показателей.

#### **Список источников**

1. Хазиева Р.Т. Система стабилизации тока на основе гибридного электромагнитного элемента // Севергеоэкотех-2016: сб. XVII Междунар. молодежн. науч. конф. молодых ученых. Ухта: Изд-во УГТУ, 2016. Ч. 1. С. 79-81. EDN: XQRBVB.
2. Рогинская Л.Э., Рахманова Ю.В., Воронин К.А., Источник питания емкостного накопи-

теля энергии // Электротехнические и информационные комплексы и системы 2015. Т. 11. № 3. С. 24-29. EDN: VCPSOT.

3. Бочаров В., Гуренков Н., Корнилов А., Парфенов Е., Резников С. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость вторичных источников импульсного питания с автономными системами электроснабжения перемен-

ного тока. Часть II: Обзор и систематизация известных структур и схем основных узлов. Приближенные критерии оценки элементов // Силовая электроника. 2009. № 22. С. 74–78. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.power-e.ru/2009\\_4\\_74.php](http://www.power-e.ru/2009_4_74.php). EDN: MVRVQH (дата обращения: 03.04.2023).

4. Вакуленко В.М., Иванов Л.П. Источники электропитания лазеров. М.: Сов. радио, 1980. 104 с.

5. Дозоров С.А. Исследование и разработка индуктивно-емкостных источников питания: Дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 203 с.

6. Хазиева Р.Т., Бочкарева Т.А. Индуктивно-емкостные преобразователи для электротехнологий. Обзор схемотехнических решений // Севергеоэкотех-2017: сб. XVIII Междунар. молодежн. науч. конф. молодых ученых. Ухта: Изд-во УГТУ, 2017. Ч. 1. С. 73–78. EDN: YLXNZL.

7. Кабан В.П., Матвеев В.Ю., Губаревич В.Н., Спиринов В.М. Расчет схем Г-образных индуктивно-емкостных преобразователей CL-вида с учетом характера нагрузки // Сб. тр. Института электродинамики НАН Украины. 2012. № 33. С. 83–87. EDN: PZGPYJ.

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

9. Atmaja T.D., Mirdanies M. Electric Vehicle Mobile Charging Station Dispatch Algorithm // 2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, ICSEEA. 2014. <https://core.ac.uk/download/pdf/81110295.pdf> (дата обращения: 03.04.2023).

10. Clinton B.C., Steinberg D.C. Providing the Spark: Impact of Financial Incentives on Battery Electric Vehicle Adoption // MIT Energy Initiative (MITEI), Massachusetts Institute of Technology Cambridge, National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2019. <https://cepr.mit.edu/wp-content/uploads/2021/09/2019-015.pdf> (дата обращения: 03.04.2023).

11. Halvorson B. NIO is Providing a Fully Charged Battery in 3 Minutes for Free in China. [https://www.greencarreports.com/news/1124806\\_nio-is-providing-a-fully-charged-battery-in-3-minutes-for-free-in-china](https://www.greencarreports.com/news/1124806_nio-is-providing-a-fully-charged-battery-in-3-minutes-for-free-in-china) (дата обращения: 03.04.2023).

12. Cui S., Zhao H., Chen H., Zhang C. The Mobile Charging Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Services. 2018. <https://downloads.hindawi.com/journals/cin/2018/5075916.pdf> (дата обращения: 03.04.2023).

13. Yang S.N., Wang H.W., Gan C.H., Lin Y.B. Mobile Charging Information Management for Smart Grid Networks // International Journal of Information Management. 2013. <https://www.ir.nctu.edu.tw/bitstream/11536/21495/1/000316428300002.pdf> (дата обращения: 03.04.2023).

14. Atmaja T.D. Energy Storage System Using Battery and Ultracapacitor on Mobile Charging Station for Electric Vehicle // 2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, ICSEEA. 2014. <https://core.ac.uk/download/pdf/82774674.pdf> (дата обращения: 03.04.2023).

15. Evaluating Electric Vehicle Charging Impacts and Customer Charging Behaviors-Experience from Six Smart Grid Investment Grant Projects / Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. U.S. Department of Energy, 2014. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/12/f19/SGIG-EvaluatingEVcharging-Dec2014.pdf> (дата обращения: 03.04.2023).

16. Rotthier B., Van Maerhem T., Blockx P., Van den Bossche P., Cappelle J. Home Charging Of Electric Vehicles in Belgium // 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27). 2013. P. 1–6.

## References

1. Khazieva R.T. Sistema stabilizatsii toka na osnove gibridnogo elektromagnitnogo elementa [Current stabilization system based on a hybrid electromagnetic element]. *Sbornik XVII Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchennykh «Severgeoeekotekh-2016»*. [Collection of works of XVII International Youth Scientific Conference of Young Scientists «Severgeoeekotekh-2016»]. Ukhta, UGTU Publ., 2016, Ch. 1, pp. 79–81. EDN: XQRBVB. [in Russian].

2. Roginskaya L.E., Rakhmanova Yu.V., Voronin K.A., Istochnik pitaniya emkostnogo nakopitelya energii [Energy Charge Capacitor Power Supply]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2015, Vol. 11, No 3, pp. 24–29. EDN: VCPSOT. [in Russian].

3. Bocharov V., Gurenkov N., Kornilov A., Parfenov E., Reznikov S. Elektroenergeticheskaya i elektromagnitnaya sovместimost' vtorichnykh istochnikov impul'snogo pitaniya s avtonomnymi sistemami elektrosnabzheniya peremennogo toka. Chast' II: Obzor i sistematizatsiya izvestnykh struktur i skhem osnovnykh uzlov. Priblizhennyye kriterii otsenki elementov [Electric Power and Electromagnetic Compatibility of Secondary Sources of Pulsed Power with Autonomous AC Power Supply Systems. Part II: Review and

Systematization of Known Structures and Schemes of the Main Nodes. Approximate Criteria for Evaluating Elements]. *Silovaya elektronika — Power Electronics* [Electronic Resource]. 2009, No. 22, pp. 74–78. URL: [http://www.power-e.ru/2009\\_4\\_74.php](http://www.power-e.ru/2009_4_74.php). EDN: MVRVQH (Accessed 03.04.2023). [in Russian].

4. Vakulenko V.M., Ivanov L.P. *Istochniki elektropitaniya lazerov* [Power Supplies for Lasers]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1980. 104 p. [in Russian].

5. Dozorov S.A. *Issledovanie i razrabotka induktivno-emkostnykh istochnikov pitaniya: Diss. ... kand. tekhn. nauk* [Research and Development of Inductive-Capacitive Power Supplies: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Saint-Petersburg, 2013. 203 p. [in Russian].

6. Khazieva R.T., Bochkareva T.A. Induktivno-emkostnye preobrazovateli dlya elektrotekhnologii. Obzor skhemotekhnicheskikh reshenii [Inductive-Capacitive Converters for Electrical Technologies. Review of Circuit Solutions]. *Sbornik XVIII Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh «Severgeocotekh-2017»*. [Collection of works of XVIII International Youth Scientific Conference of Young Scientists «Severgeocotekh-2017»]. Ukhta, UGTU Publ., 2017, Ch. 1, pp. 73–78. EDN: YLXNZL. [in Russian]

7. Kaban V.P., Matveev V.Yu., Gubarevich V.N., Spirin V.M. Raschet skhem G-obraznykh induktivno-emkostnykh preobrazovatelei CL-vida s uchetom kharaktera nagruzki [Calculation of Schemes of G-Shaped Inductive-Capacitive Transducers of CL-Type with Taking into Consideration the Character of the Load]. *Sbornik trudov Instituta elektrodinamiki NAN Ukrainy — Collection of Works Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2012, No. 33, pp. 83–87. EDN: PZGPYJ. [in Russian].

8. Kaban V.P. Sravnitel'nyi analiz T-obraznykh induktivno-emkostnykh preobrazovatelei CLL-struktury po ustanovlennoi moshchnosti reaktivnykh elementov [Comparative Analysis of T-Shaped Inductance-Capacitance Transducers with CLL-Structure According to The Installed Capacity of Reactive Elements]. *Sbornik trudov Instituta elektrodinamiki NAN Ukrainy — Collection of Works Institute of Electrodynamics of the National*

*Academy of Sciences of Ukraine*, 2012, No. 33, pp. 87–91. EDN: PZGPYT. [in Russian].

9. Atmaja T.D., Mirdanies M. Electric Vehicle Mobile Charging Station Dispatch Algorithm. *2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, ICSEEA*, 2014. <https://core.ac.uk/download/pdf/81110295.pdf> (accessed 03.04.2023).

10. Clinton B.C., Steinberg D.C. Providing the Spark: Impact of Financial Incentives on Battery Electric Vehicle Adoption. *MIT Energy Initiative (MITEI), Massachusetts Institute of Technology Cambridge, National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, 2019. <https://ceep.mit.edu/wp-content/uploads/2021/09/2019-015.pdf> (accessed 03.04.2023).

11. Halvorson B. *NIO is Providing a Fully Charged Battery in 3 Minutes for Free in China*. [https://www.greencarreports.com/news/1124806\\_nio-is-providing-a-fully-charged-battery-in-3-minutes-for-free-in-china](https://www.greencarreports.com/news/1124806_nio-is-providing-a-fully-charged-battery-in-3-minutes-for-free-in-china) (accessed 03.04.2023).

12. Cui S., Zhao H., Chen H., Zhang C. *The Mobile Charging Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Services*, 2018. <https://downloads.hindawi.com/journals/cin/2018/5075916.pdf> (accessed 03.04.2023).

13. Yang S.N., Wang H.W., Gan C.H., Lin Y.B. Mobile Charging Information Management for Smart Grid Networks. *International Journal of Information Management*, 2013. <https://www.ir.nctu.edu.tw/bitstream/11536/21495/1/000316428300002.pdf> (accessed 03.04.2023).

14. Atmaja T.D. Energy Storage System Using Battery and Ultracapacitor on Mobile Charging Station for Electric Vehicle. *2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, ICSEEA*, 2014. <https://core.ac.uk/download/pdf/82774674.pdf> (accessed 03.04.2023).

15. *Evaluating Electric Vehicle Charging Impacts and Customer Charging Behaviors-Experience from Six Smart Grid Investment Grant Projects*, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. U.S. Department of Energy, 2014. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/12/f19/SGIG-EvaluatingEVcharging-Dec2014.pdf> (accessed 03.04.2023).

16. Rotthier B., Van Maerhem T., Blockx P., Van den Bossche P., Cappelle J. Home Charging Of Electric Vehicles in Belgium. *2013 World Electric*

Статья поступила в редакцию 28.04.2023; одобрена после рецензирования 17.05.2023; принята к публикации 24.05.2023.

The article was submitted 28.04.2023; approved after reviewing 17.05.2023; accepted for publication 24.05.2023.

Научная статья

УДК 62-523.8

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-80-89

## ПОДЗАРЯДКА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ВЗЛЕТОМ-ПОСАДКОЙ НА КОНТАКТНЫХ ПЛАТФОРМАХ С АДАПТИРУЕМОЙ ШИРИНОЙ КОНТАКТНЫХ ПОЛОС

**Алексей Владимирович Овчинников***Alexey V. Ovchinnikov**преподаватель Военного учебного центра,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия***Ксения Олеговна Новикова***Kseniya O. Novikova**ассистент кафедры электронной инженерии,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия***Владимир Станиславович Фетисов***Vladimir S. Fetisov**доктор технических наук, профессор кафедры электронной инженерии,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия*

### Актуальность

В статье описывается одна из модификаций наземных зарядных платформ для электрических беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с вертикальным взлетом-посадкой (ВВП). Она относится к классу зарядных платформ с открытыми контактными площадками. Описанные ранее платформы с копланарными полосовыми параллельными электродами (КППЭ) имеют множество параллельных электродов-полос с чередующейся полярностью, изолированных друг от друга узкими диэлектрическими разделителями. Ответные бортовые электроды БПЛА мультироторного типа с симметричной рамой предлагается располагать на концах опорных стоек под соответствующими несущими балками винтомоторных групп. Таким образом, точки контактирования для квадрокоптера будут находиться в вершинах квадрата. При соблюдении определенных геометрических соотношений между шириной полосы наземных электродов и межэлектродными расстояниями бортовых электродов для любого

### Ключевые слова

беспилотный летательный аппарат, вертикальный взлет-посадка, мультикоптер, зарядная станция, посадочная платформа, копланарные полосовые параллельные электроды, аккумуляторная батарея, микроконтроллер, коммутирующее устройство, адаптивное конфигурирование

расположения БПЛА на платформе после посадки практически на 100 % обеспечивается разнополярность бортовых электродов и, как следствие, возможность подвести напряжение от наземного зарядного источника постоянного тока к бортовому зарядному устройству аккумулятора. Достоинствами таких платформ являются: относительная простота конструкции, независимость обслуживания от точности посадки и возможность зарядки нескольких аппаратов одновременно. Однако БПЛА могут иметь различные размеры и, соответственно, разные межэлектродные расстояния, что может нарушить условие разнополярности бортовых электродов после посадки. Поэтому важно найти решение, при котором возможно надежное обслуживание на платформе с КППЭ аппаратов разных типоразмеров.

#### **Цель исследования**

Поиск технического решения по адаптивному изменению ширины полос на посадочной платформе с КППЭ, позволяющего организовать подзарядку БПЛА разных типоразмеров.

#### **Методы исследования**

Макетирование платформы-прототипа и экспериментальное изучение ее функционирования.

#### **Результаты**

Предложенная модификация платформы состоит в организации коммутации полос таким образом, что образуются чередующиеся группы полос одной полярности. Полосы могут группироваться по 1, 2, 3, 4 и т.д. Такая группа функционирует как единая полоса соответствующей ширины, которую можно дискретно изменять. Таким образом, появляется возможность адаптивно настраивать ширину полос платформы в зависимости от типоразмера заходящего на посадку аппарата. Описаны экспериментальная посадочная платформа для мультикоптеров и вариант реализации коммутирующего устройства для ее адаптивного конфигурирования.

**Для цитирования:** Овчинников А. В., Новикова К. О., Фетисов В. С. Подзарядка беспилотных летательных аппаратов с вертикальным взлетом-посадкой на контактных платформах с адаптируемой шириной контактных полос // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 2. Т. 19. С. 80-89. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-80-89>.

Original article

## **RECHARGE OF VTOL UAVs ON LANDING PLATFORMS WITH ADAPTABLE CONTACT BAND WIDTH**

#### **Relevance**

The article describes one of the modifications of ground charging platforms for electric unmanned aerial vehicles (UAVs) with vertical take-off and landing (VTOL). It belongs to the class of charging platforms with open pads. The previously described platforms with coplanar band parallel electrodes (CBPE) have multiple parallel strip electrodes with alternating polarity, isolated from each other by narrow dielectric separators. The corresponding on-board electrodes of the multi-rotor UAV with a symmetrical frame are proposed to be arranged at the ends of the support legs under the bearing beams of the engine-propeller groups. Thus, the contact points for the quadrocopter will be at the vertices of the square. With certain geometric relationships between the width of the ground

#### **Keywords**

unmanned aerial vehicle, vertical take-off and landing, multicopter, charging station, landing platform, coplanar band parallel electrodes, accumulator battery, microcontroller, switching device, adaptive configuration

electrodes and the interelectrode distances of the on-board electrodes for any UAV position on the platform, almost 100% different polarities of the on-board electrodes is ensured after landing, and as a consequence, the ability to bring the voltage from the ground DC source to the on-board battery charger. The advantages of such platforms are: relative simplicity of design, independence of maintenance from the accuracy of landing and the ability to charge several UAVs at the same time. However, UAVs may have various sizes and therefore various interelectrode distances, which may violate the condition of different polarities of on-board electrodes after landing. Therefore, it is important to find a solution in which reliable service of the CBPE platform for UAVs of different sizes is possible.

#### **Aim of research**

Finding a technical solution for adaptive band width change of a CBPE landing platform that allows charging UAVs of different sizes.

#### **Research methods**

Prototyping the adaptable CBPE platform and pilot study of its operation.

#### **Results**

The proposed modification of the platform consists in arranging the switching of bands in such a way that alternating groups of bands of one polarity are formed. Bands can be grouped into 1, 2, 3, 4, etc. Such a group works as a single band of appropriate width, which can be changed discretely. In this way, it is possible to adapt the width of the platform stripes depending on the type of vehicle coming for landing. An experimental landing platform for multicopters and a variant of implementing a commuting device for platform adaptive configuration are described.

**For citation:** Ovchinnikov A. V., Novikova K. O., Fetisov V. S. Podzaryadka bespilotnykh letatel'nykh apparatov s vertikal'nym vzletom-posadkoy na kontaktnykh platformakh s adaptiruyemoy shirinoj kontaktnykh polos [Recharge of VTOL UAVs on Landing Platforms with Adaptable Contact Band Width]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 2, Vol. 19, pp. 80–89. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-80-89>.

#### **Введение**

Для последнего десятилетия характерно бурное развитие беспилотных авиационных систем. Особенно заметным во многих сферах жизни становится широкое использование беспилотных мультикоптеров и других летательных аппаратов с вертикальным взлетом-посадкой. Основными достоинствами таких летательных аппаратов являются: отсутствие требований к наличию взлетно-посадочной полосы, стартовых и посадочных устройств; способность зависать в точке; высокая маневренность. Однако энергоэффективность таких аппаратов по сравнению с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) самолетного типа невысока.

Силовая установка большинства типов БПЛА с вертикальным взлетом-посадкой (ВВП) обычно является чисто электрической, с источником питания в виде аккумуляторной батареи на основе литиевых ячеек. Время полета таких аппаратов обычно не превышает 40–50 мин, чего для выполнения многих задач недостаточно. Для обеспечения длительных и непрерывных миссий вполне естественным и целесообразным является использование групп аппаратов, периодически обслуживаемых на наземных зарядных станциях.

Идея использования зарядных станций для обслуживания электрических БПЛА развивается вместе с развитием беспилотных авиационных систем.

Существует большое количество разработок по этой теме. Сейчас уже очевидно, что необходима инфраструктура наземного автоматического обслуживания БПЛА, преимущественно с целью их подзарядки [1].

Проследить развитие инженерной мысли в области создания наземных зарядных станций, ознакомиться со складывающейся классификацией и терминологией в области таких систем можно в обзорах публикаций, которые все чаще встречаются в научно-технической периодике [2–6].

В монографии [7] систематизирована информация по принципам действия и конструкциям различных зарядных станций, включая обменно-зарядные станции (с функцией замены отработавших аккумуляторных батарей на свежезаряженные), станции с контактными и бесконтактными терминалами.

В работе [8] подробно рассмотрены позиционирующие устройства, обеспечивающие корректное расположение БПЛА на зарядной платформе с целью правильного соединения соответствующих бортовых и наземных электродов.

Довольно перспективны зарядные станции с открытыми контактными площадками, для работы которых не требуются точная посадка аппарата на платформу и какие-либо позиционирующие устройства. Такие зарядные станции содержат, как правило, избыточное количество электродов и могут обеспечивать одновременное обслуживание сразу нескольких БПЛА. Некоторые компании уже успешно реализуют этот принцип в своих серийных изделиях [9].

Несколько лет назад авторами была предложена конструкция зарядной платформы с копланарными полосовыми параллельными электродами (КППЭ) [10]. Рассмотрим кратко принцип ее функционирования.

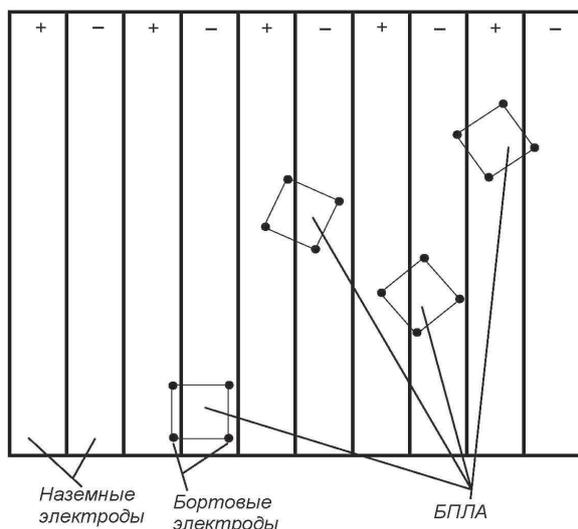
### **Зарядная платформа с копланарными полосовыми параллельными электродами**

Наземная зарядная платформа с КППЭ имеет множество параллельных полосовых электродов с чередующейся полярностью, изолированных друг от друга узкими диэлектрическими разделителями.

Ответные бортовые электроды на БПЛА могут быть расположены по-разному. В случае мультикоптера с симметричной рамой наиболее логичным и естественным является расположение их на концах опорных стоек под соответствующими несущими балками винтомоторных групп. Таким образом, точки контактирования для квадрокоптера будут находиться в вершинах квадрата, а для гексакоптера — вершинах правильного шестиугольника.

В [10] показано, что при выполнении определенных геометрических соотношений между шириной полосы наземных электродов и межэлектродными расстояниями бортовых электродов для любого расположения БПЛА на платформе после посадки практически на 100 % обеспечивается разнополярность бортовых электродов (рисунок 1), т.е. как минимум один из них будет иметь полярность, отличную от других (условие гетерополярности). Количество бортовых электродов должно быть не менее трех.

В случае квадрокоптера, например, необходимо, чтобы ширина полосы наземного электрода равнялась длине стороны квадрата, в вершинах которого находятся точки касания бортовых электродов. При этом можно с помощью простой диодной распределительной схемы на борту выполнить правильное подключение бортового аккумулятора к наземному зарядному источнику при любой комбинации полярностей на бортовых посадочных электродах (рисунок 2).

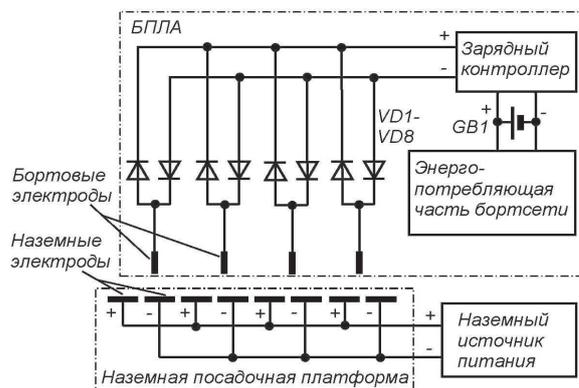


**Рисунок 1.** Возможные случайные варианты расположения точек касания бортовых электродов на платформе с копланарными полосовыми параллельными электродами

**Figure 1.** Possible random variants of arrangement of on-board electrodes contact points on a platform with coplanar band parallel electrodes

В описанной системе в общем случае используется избыточное количество как наземных, так и бортовых электродов. Именно это является необходимым условием обеспечения универсальности платформы в смысле независимости от расположения на ней БПЛА и возможности обслуживания нескольких аппаратов одновременно.

Однако при фиксированной ширине полос наземных электродов и геометрические параметры системы бортовых электродов должны быть постоянными, иначе может быть нарушено упомянутое выше условие гетерополярности. Если же требуется обслуживать БПЛА различных размеров, у которых соответственно различная межэлектродная база, то на зарядной станции необходимо предусмотреть адаптивную подстройку ширины полос под размеры аппарата. Схема, показанная на рисунке 3, соответствует именно такой концепции построения зарядной станции. Ширина полос может задаваться

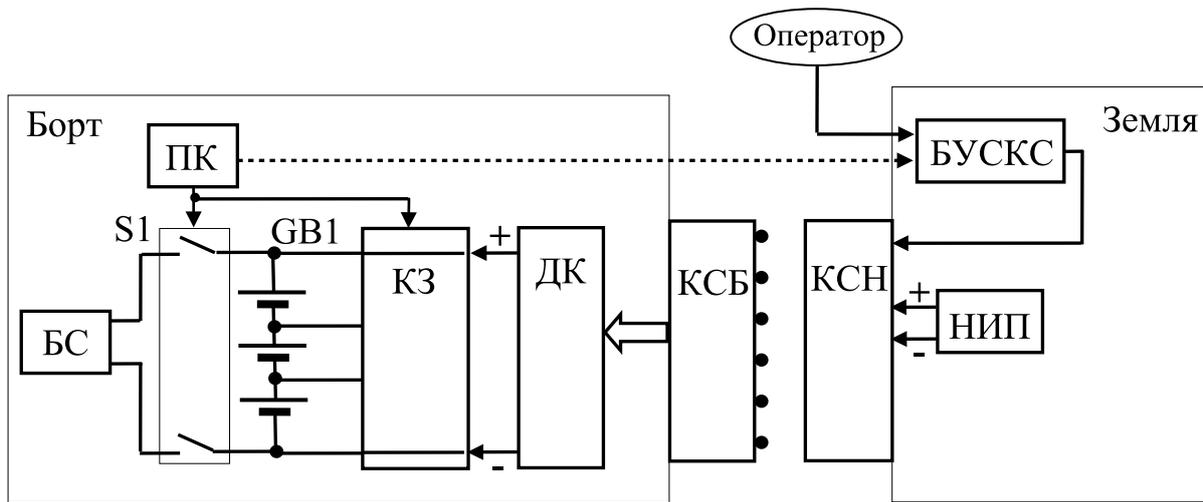


**Рисунок 2.** Схема взаимодействующих узлов бортовой и наземной частей зарядной платформы с КППЭ

**Figure 2.** Diagram of the interacting components of on-board and ground parts of the CBPE charging platform

оператором вручную или полетным контроллером БПЛА автоматически при приближении к зарядной станции (посредством радиоканала). Собственно перестройку контактной системы выполняет обобщенный функциональный блок БУСКС. В его функции может входить, например, сдвигание-раздвижение пластин электродов или их коммутация с полюсами наземного зарядного источника. Бортовая батарея GB1 обычно является многосекционной, поэтому для нее нужен специальный контроллер заряда (КЗ) с балансировкой напряжения ячеек [11]. Этот контроллер предположительно размещен на борту. На время зарядки предусмотрено отключение бортсети от аккумуляторной батареи.

Адаптация зарядной платформы под размеры БПЛА с помощью раздвижных пластин-электродов — довольно сложный и ненадежный процесс, поэтому авторы предложили техническое решение с дискретно изменяемой шириной полос.



ПК — полетный контроллер; БС — бортсеть; КЗ — контроллер зарядки;  
 НИП — наземный источник питания; КСБ — контактная система бортовая;  
 КСН — контактная система наземная; БУСКС — блок управления структурой контактной системы; ДК — диодный коллектор

ПК — flight controller; БС — on-board power network; КЗ — charging controller;  
 НИП — ground power supply; КСБ — on-board contact system; КСН — ground contact system; БУСКС — contact system structure control unit;  
 ДК — diode collector

**Рисунок 3.** Обобщенная схема бортовой и наземной частей зарядной системы с наземными параллельными полосовыми электродами

**Figure 3.** Generalized circuit of on-board and ground parts of the charging system with ground parallel band electrodes

### Зарядная платформа с дискретно перестраиваемой шириной контактных полос

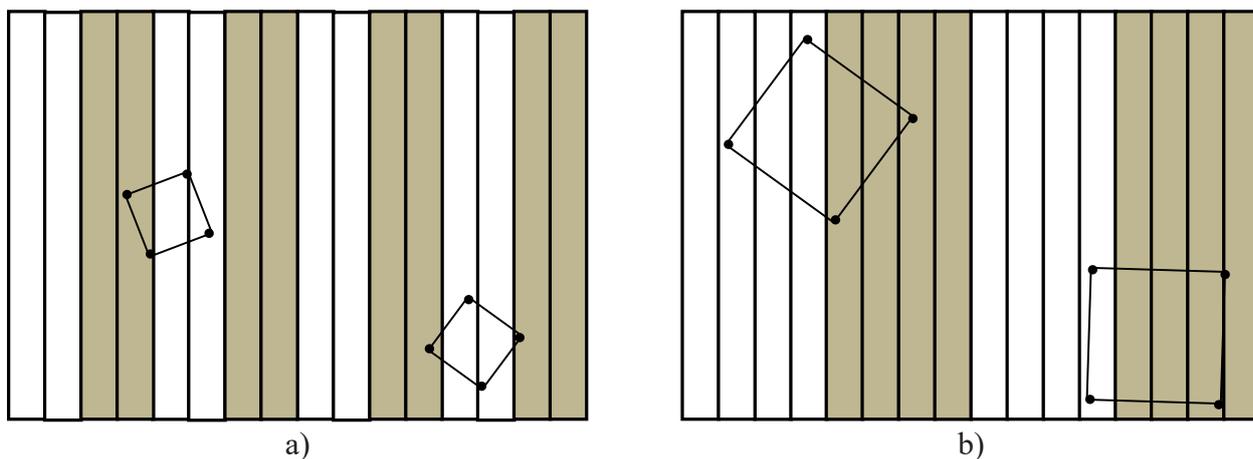
Суть предложенного технического решения состоит в следующем. Пусть имеется узкая полоса с некоторым базовым значением ширины, например 50 мм, для которой отдельно может устанавливаться полярность подключаемого зарядного источника. Набор таких полос, разделенных узкими диэлектрическими промежутками, образует посадочное поле, которое в зависимости от типоразмера заходящего на посадку аппарата может переформатироваться, а именно, чередование полярностей может происходить через 1, 2, 3, 4 и т.д. полос, соответственно, оптимальная межэлектродная база (для квадрокоптера) будет меняться в соответствии с рядом 50, 100, 150, 200 мм и т.д. (рисунок 4). Фактически

несколько подряд расположенных полос с одной полярностью равносильны одной сплошной полосе.

Установка бортовых электродов на аппараты разных типоразмеров в нижней части опорных стоек БПЛА с межэлектродным расстоянием, кратным 20–50 мм, обычно не вызывает технологических сложностей.

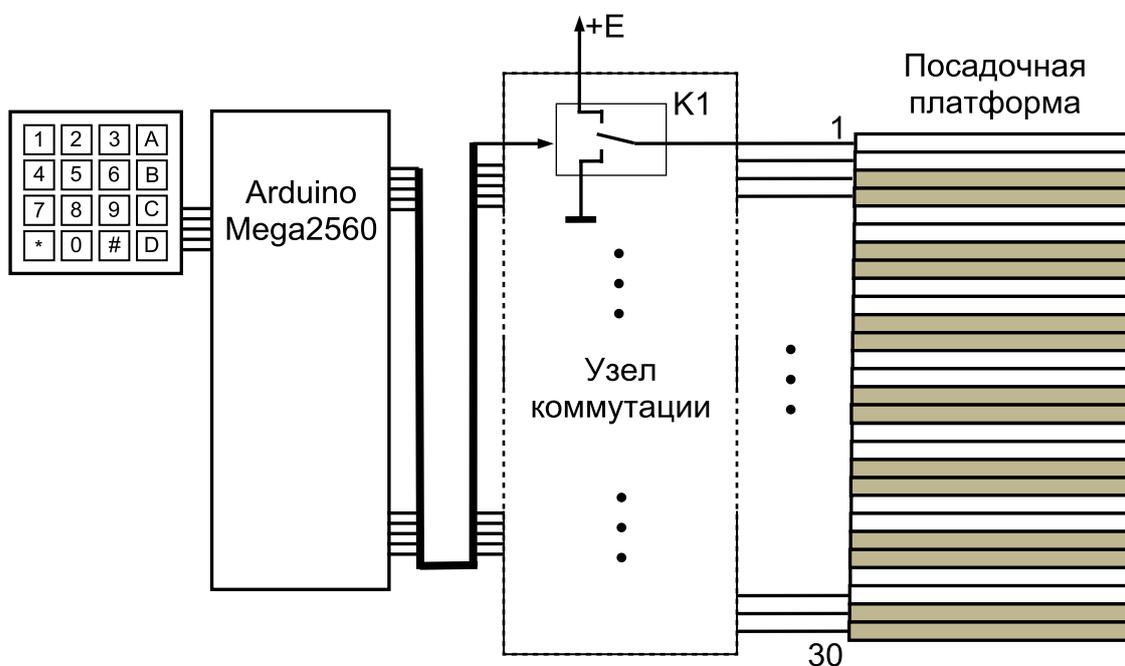
### Практическая реализация предложенного решения

Коммутация полос на определенный полюс зарядного источника может выполняться как автоматически, так и вручную. Последний вариант был реализован в экспериментальной платформе, в которой коммутация полос задается пользователем с пульта управления (рисунок 5).



**Рисунок 4.** Платформа с чередованием полярности контактных полос: через 2 полосы (а); через 4 полосы (б)

**Figure 4.** Platform with alternating polarity of contact bands: through 2 bands (a); through 4 bands (b)



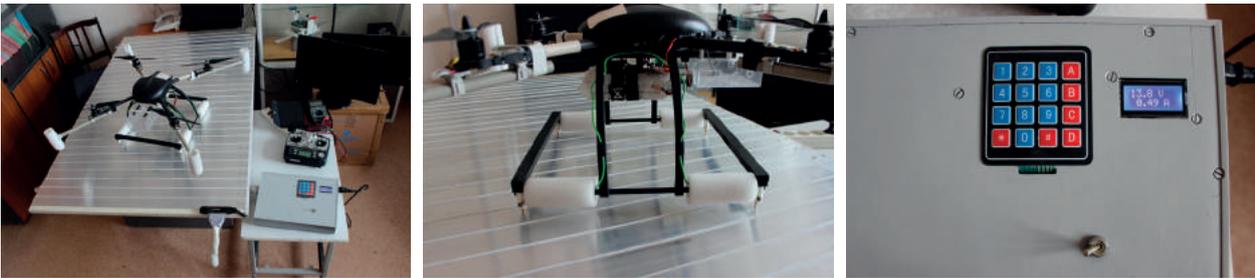
**Рисунок 5.** Схема управления платформой с дискретно перестраиваемой шириной полос

**Figure 5.** Control circuit for the platform with discretely modifiable band width

Основу этого пульта составляет контроллер Arduino Mega2560. Ручная установка количества элементарных полос, через которое происходит смена полярности, задается с клавиатуры. Контроллер задает полярность 30 элементарных полос посредством узла коммутации, в котором собраны управляемые переключающие реле (K1 на рисунке 5), подклю-

чающие к каждой полосе либо положительный полюс источника питания E, либо землю.

Каждый БПЛА, приземляющийся на платформу для зарядки, должен иметь на борту диодно-распределительное устройство (диодный коллектор) и зарядный контроллер, который обычно содержит в своем составе балансер (рисунки 2, 3).



**Рисунок 6.** Экспериментальный образец платформы: общий вид (а); бортовые контакты БПЛА (b); пульт управления зарядной платформой (с)

**Figure 6.** Experimental platform model: general view (a); UAV on-board contacts (b); charging platform control panel (c)

Фотография экспериментального образца зарядной платформы с дискретно изменяемой шириной полос показана на рисунке 6. Ширина полос составляла 50 мм. Квадрокоптер, использованный для апробации процесса посадки и последующей зарядки, имел межэлектродное расстояние 300 мм, бортовой источник питания представлял собой 4-секционную литий-полимерную аккумуляторную батарею емкостью 5000 мАч. Бортовые электроды имели достаточно малую площадь контактирования (порядка  $1 \text{ мм}^2$ ), а изоляторы между полосами платформы были тонкими (0,2 мм), что практически исключало вероятность застревания бортового электрода на изоляторе. На борту был расположен диодный коллектор с зарядным контроллером-балансером. Коммутация полярностей выполнялась с чередованием через 6 полос. В процессе многочисленных экспериментов по посадке аппарата на платформу не выявлено ни одного сбоя, связанного с нарушением условия гетерополярности бортовых электродов.

Еще более гибкую и универсальную систему управления подключением полос к тому или иному полюсу зарядного источника можно получить, если в

нее будет включена наземная подсистема определения наличия бортовых электродов на полосах и сопряженная с этими посадочными электродами бортовая подсистема выдачи при посадке сигнала присутствия. В такой системе коммутация полос происходит уже не регулярным образом, а произвольно, т.е. отдельно взятая элементарная полоса может иметь любую полярность в зависимости от расположения аппарата на платформе после посадки.

### Выводы

Для целей зарядки источников питания электрических БПЛА с вертикальным взлетом-посадкой эффективным и недорогим техническим решением является использование зарядных станций с платформами на базе копланарных полосовых параллельных электродов.

Вариант такой контактной системы с дискретно изменяемой шириной полос позволяет построить зарядную станцию, адаптируемую для приема и обслуживания БПЛА различных типоразмеров. При этом сохраняется главное достоинство таких платформ — нетребовательность к точности посадки и возможность обслуживания нескольких аппаратов одновременно.

### Список источников

1. Fetisov V. Aerial Robots and Infrastructure of Their Working Environment // *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings». Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2021. Vol. 187. Springer, Singapore. 2021. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0_1) (accessed 12.04.2023).
2. Gautam A., Sujit P.B., Saripalli S. A Survey of Autonomous Landing Techniques for UAVs // *Proceedings of the 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2014, Orlando, FL, USA, 27–30 May 2014*. 2014. P. 1210–1218.
3. Noor M.B., Ismail M.A., Khyasudeen M.F., Shariffuddin A., Kamel N.I., Azzuhri S.R. Autonomous Precision Landing for Commercial UAV: A Review // *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. IOS Press: Amsterdam, The Netherlands, 2017.
4. Nguyen M., Nguyen C., Truong L., Le A., Quyen T., Masaracchia A., Teague K. Electromagnetic Field Based WPT Technologies for UAVs: A Comprehensive Survey // *Electronics*. 2020. 9 (3). P. 461.
5. Mourgelas C., Kokkinos S., Milidonis A., Voyiatzis I. Autonomous Drone Charging Stations: A Survey // *PCI '20: Proceedings of the 24th Pan-Hellenic Conference on Informatics*, November 2020. P. 233–236. Available at: <https://doi.org/10.1145/3437120.3437314> (accessed 12.04.2023).
6. Шитов В. Энергия по воздуху: все способы зарядить дрон // *Машины и механизмы [Online]*. Апрель 2022. № 199, URL: <https://21mm.ru/news/tehnologii/energiya-po-vozdukhu-vse-sposoby-zaryadit-dron> (дата обращения: 12.04.2023).
7. Фетисов В.С., Артемьев А.Е., Муфаззалов Д.Ф. Автоматические сервисные станции для обслуживания электрических беспилотных летательных аппаратов. М.: Инновационное машиностроение, 2017. 253 с.
8. Galimov M., Fedorenko R., Klimchik A. UAV Positioning Mechanisms in Landing Stations: Classification and Engineering Design Review // *Sensors*. 2020. Vol. 20. P. 3648. Available at: <https://doi.org/10.3390/s20133648> (accessed 12.04.2023).
9. Skycharge: официальный сайт компании. URL: <https://www.skycharge.de> (дата обращения 12.04.2023).
10. Фетисов В.С., Ахмеров Ш.Р. Системы подзарядки электрических беспилотных летательных аппаратов с вертикальным взлетом-посадкой на основе посадочных платформ с плоскопараллельными открытыми контактными площадками // *Приборы и системы. Управление,* контроль, диагностика. 2015. № 7. С. 41–49. EDN: UAATSH.
11. Рыкованов А., Беляев С. Активные и пассивные системы баланса Li-ion аккумуляторных батарей // *Компоненты и технологии*. 2014. № 3. С. 121–124.

### References

1. Fetisov V. Aerial Robots and Infrastructure of Their Working Environment. *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings». Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2021, Vol. 187. Springer, Singapore. 2021. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0_1) (accessed 12.04.2023).
2. Gautam A., Sujit P.B., Saripalli S. A Survey of Autonomous Landing Techniques for UAVs. *Proceedings of the 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2014, Orlando, FL, USA, 27–30 May 2014*. 2014, pp. 1210–1218.
3. Noor M.B., Ismail M.A., Khyasudeen M.F., Shariffuddin A., Kamel N.I., Azzuhri S.R. Autonomous Precision Landing for Commercial UAV: A Review. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, 2017.
4. Nguyen M., Nguyen C., Truong L., Le A., Quyen T., Masaracchia A., Teague K. Electromagnetic Field Based WPT Technologies for UAVs: A Comprehensive Survey. *Electronics*, 2020, 9 (3), pp. 461.
5. Mourgelas C., Kokkinos S., Milidonis A., Voyiatzis I. Autonomous Drone Charging Stations: A Survey. *PCI '20: Proceedings of the 24th Pan-Hellenic Conference on Informatics*, November 2020. P. 233–236. Available at: <https://doi.org/10.1145/3437120.3437314> (accessed 12.04.2023).
6. Shitov V. Energiya po vozdukhу: vse sposoby zaryadit' dron. *Mashiny i mekhanizmy [Online]*. April' 2022. № 199. URL: <https://21mm.ru/news/tehnologii/energiya-po-vozdukhu-vse-sposoby-zaryadit-dron> (data obrashcheniya: 12.04.2023). [in Russian].
7. Fetisov V.S., Artem'ev A.E., Mufazzalov D.F. *Avtomaticheskie servisnye stantsii dlya obsluzhivaniya elektricheskikh bespilotnykh letatel'nykh apparatov* [Automatic Service Stations for Maintenance of Electric Unmanned Aerial Vehicles]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017. 253 p. [in Russian].
8. Galimov M., Fedorenko R., Klimchik A. UAV Positioning Mechanisms in Landing Stations: Classification and Engineering Design Review. *Sensors*, 2020, Vol. 20, pp. 3648. Available at:

<https://doi.org/10.3390/s20133648> (accessed 12.04.2023).

9. *Skysharge: ofitsial'nyi sait kompanii* [Skycharge: Official Website of the Company]. URL: <https://www.skycharge.de> (accessed 12.04.2023).

10. Fetisov V.S., Akhmerov Sh.R. Sistemy podzaryadki elektricheskikh bespilotnykh letatel'nykh apparatov s vertikal'nym vzletom-posadkoi na osnove posadochnykh platform s ploskoparallel'nymi otkrytymi kontaktnymi ploshchadkami [Charging Stations for Electrical Unmanned Aerial Vehicles with Vertical Take-Off-And-Landing

Based on Landing Platforms with Plane-Parallel Open Contact Pads]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika — Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2015, No. 7, pp. 41–49. EDN: UAATSH. [in Russian].

11. Rykovanov A., Belyaev S. Aktivnye i passivnye sistemy balansa Li-ion akkumulyatornykh batarei [Active and Passive Balance Systems for Li-Ion Batteries]. *Komponenty i tekhnologii — Components and Technologies*, 2014, No. 3, pp. 121–124. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 17.04.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 11.05.2023.*

*The article was submitted 17.04.2023; approved after reviewing 24.04.2023; accepted for publication 11.05.2023.*

Научная статья

УДК 621.3

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-90-97

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫМ ИНВЕРТОРОМ



**Фанис Фанилович Сираев**

**Fanis F. Siraev**

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия



**Регина Тагировна Хазиева**

**Regina T. Khazieva**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия

### Актуальность

В связи с необходимостью регулирования выходных параметров в резонансных инверторах широко применяются различные способы управления, одним из которых является широтно-импульсная модуляция. Данный способ свое распространение получил из-за возможности точного контроля путем изменения ширины импульсов для эффективного управления процессом преобразования энергии.

Для исследования процесса управления выходными параметрами и улучшения параметров электрической энергии переменного тока производится моделирование в системе Matlab/Simulink с использованием библиотеки Power System, которое позволяет уточнить режимы работы и исследуемые параметры.

### Цель исследования

В данной работе выполнено исследование способа управления резонансным инвертором с многофункциональным интегрированным электромагнитным компонентом (МИЭК), позволяющего улучшить выходные параметры и эффективность преобразования электрической энергии.

Основной задачей является получение результатов компьютерного моделирования и их исследование.

### Ключевые слова

резонансный инвертор,  
многофункциональный  
интегрированный  
электромагнитный  
компонент (МИЭК),  
широтно-импульсная  
модуляция (ШИМ)

**Методы исследования**

Основными в данной работе являются анализ научных публикаций и создание компьютерной модели при помощи программного комплекса Matlab.

**Результаты**

Авторами разработана компьютерная модель в Matlab и реализована ШИМ-модуляция для регулирования выходных параметров резонансного инвертора на основе МИЭК, произведена оценка эффективности применения данного способа управления преобразователем.

**Для цитирования:** Сираев Ф. Ф., Хазиева Р. Т. Использование широтно-импульсной модуляции для управления резонансным инвертором // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 2. Т. 19. С. 90-97. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-90-97>.

Original article

## USING PULSE WIDTH MODULATION TO CONTROL THE RESONANT INVERTER

**Relevance**

In connection with the need to regulate the output parameters in resonant inverters, various control methods are widely used, one of which is pulse-width modulation. This method is widespread because of the possibility of precise control by changing the pulse width for effective control of energy conversion.

In order to study the process of controlling the output parameters and improving the parameters of electrical energy alternating current simulation is done in a system Matlab/Simulink, using the library Power System, which allows you to clarify the modes of operation and study parameters.

**Aim of research**

In this paper the research of the control method of the resonant inverter with a multifunctional integrated electromagnetic component (MIEC), which allows to improve the output parameters and the efficiency of the transformation of electrical energy is carried out.

The main task is to obtain the results of computer simulation and study them.

**Research methods**

The basis of research in this work is the analysis of scientific publications and the creation of a computer model using the software package Matlab.

**Results**

The authors have developed a computer model in Matlab and implemented PWM modulation to control the output parameters of the resonant inverter on the basis of MIEC and evaluated the effectiveness of this method of inverter control.

**Keywords**

resonant inverter, multifunctional integrated electromagnetic component (MIEC), pulse-width modulation (PWM)

**For citation:** Siraev F. F., Khazieva R. T. Ispol'zovaniye shirotno-impul'snoy modulyatsii dlya upravleniya rezonansnym invertorom [Using Pulse Width Modulation to Control the Resonant Inverter]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 2, Vol. 19, pp. 90-97. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-90-97>.

Резонансный инвертор может быть предложен для использования в качестве источника питания для потребителей переменного тока. Одним из примеров является применение таких типов преобразователей в солнечной электростанции. Особенностью рассматриваемого инвертора является наличие многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК), который осуществляет роль колебательного контура. Применение МИЭК обосновывается способностью улучшения характеристик инвертора и повышения эффективности преобразования электрической энергии [1–4].

Использование широтно-импульсной модуляции (ШИМ) выходного напряжения резонансного преобразователя позволяет изменять «мёртвое время», когда все коммутационные ключи находятся в закрытом состоянии, в связи с чем увеличивается диапазон регулировки и достигается требуемый уровень выходного напряжения [5–9].

На рисунке 1 представлена модель резонансного инвертора, собранного из полевых транзисторов в мостовую схему с обратными диодами, с ШИМ регулированием выходных параметров. Обратные

диоды в мостовой схеме используются для предотвращения обратной полярности на нагрузке при изменении направления тока через мостовую схему.

Широтно-импульсная модуляция осуществляется с помощью блоков «Comparator» и «Monostable», которые соединяются через логический элемент НЕ — блок «Logical Operator» для обеспечения правильной работы инвертора и защиты от короткого замыкания [10].

Логический элемент НЕ может быть использован после ШИМ-модуля в мостовой схеме инвертора для того, чтобы инвертировать сигнал ШИМ перед его передачей на базу транзистора.

ШИМ-модуль выдает сигнал со скважностью, то есть с отношением времени, в течение которого сигнал имеет высокий уровень, ко времени, в течение которого сигнал имеет низкий уровень. Но в мостовой схеме инвертора транзистор должен быть открыт в течение времени сигнала ШИМ с высоким уровнем, а закрыт в течение времени сигнала ШИМ с низким уровнем.

Если сигнал ШИМ не инвертирован перед подачей на базу транзистора, то в момент, когда ШИМ-сигнал имеет высокий уровень, транзистор будет закрыт, а

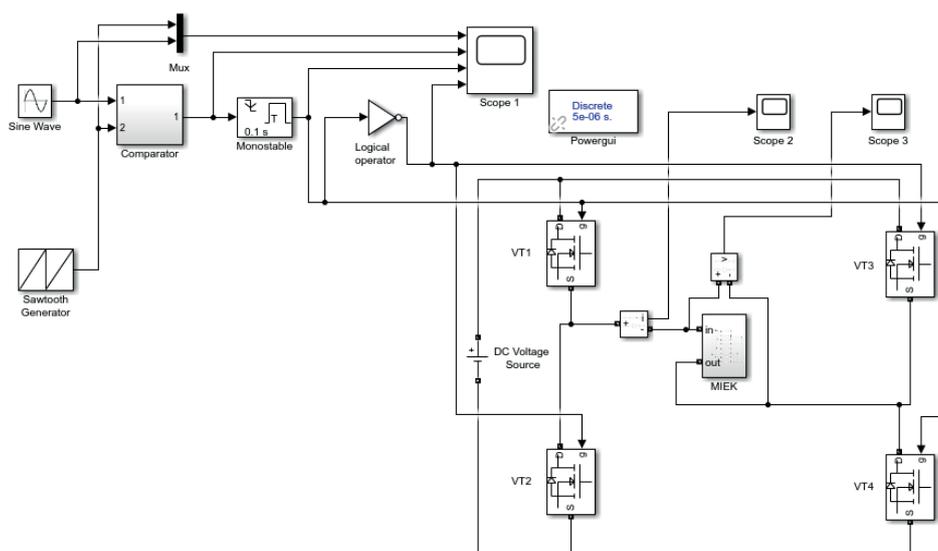


Рисунок 1. Компьютерная модель резонансного инвертора с ШИМ

Figure 1. Computer model of resonant inverter with PWM

в момент, когда ШИМ-сигнал имеет низкий уровень, транзистор будет открыт. Это приведет к неправильной работе инвертора и возможному повреждению устройства.

Чтобы избежать этой проблемы, сигнал ШИМ инвертируется с помощью логического элемента НЕ перед его передачей на базу транзистора. Это позволяет обеспечить правильную работу инвертора, так как транзистор будет открыт в течение времени сигнала ШИМ с высоким уровнем, а закрыт в течение времени сигнала ШИМ с низким уровнем.

В блоке «Comparator» обеспечивается непосредственно ШИМ модуляция, которая записывается с помощью кода. Блок «Monostable» используется при реализации ШИМ-регулирующего для формирования импульсов с заданной длительностью и частотой повторения.

Рассмотрим, как работает данная модель. В один момент времени подаются отпирающие импульсы на полевые транзисторы VT1 и VT4, далее через определенную паузу, наоборот, отпираются транзисторы VT2 и VT3, а VT1 и VT4 в это время замкнуты. Далее опять пауза, и процесс повторяется. При этом длительность синхронного включения ключей меняется, регулируя выходную мощность.

В качестве последовательного колебательного контура используется двухсекционный МИЭК последовательным соединением секций и диагональным подключением источника питания и нагрузки с выводом в середине вторичной обмотки для обеспечения условий резонанса в инверторе. Это позволяет улучшить эффективность преобразования электрической энергии из постоянного напряжения источника питания в переменное напряжение на выходе инвертора. Для рассматриваемого гибридного электромагнитного элемента значение добротности равно  $Q = 10$  [11].

Математическая модель МИЭК [11]:

$$\begin{cases} U_{\text{вх.}} = U_{L1} + U_{C1}; \\ U_{C1} = j \cdot X_{C11} \cdot (I_1 - I_{\text{вх.}}); \\ U_{C2} = j \cdot X_{C22} \cdot (I_{\text{н.}} - I_1); \\ U_{L1} = (R_1 + j \cdot X_{L1} + j \cdot X_{M12}) \cdot (I_{\text{вх.}} + I_{\text{н.}}), \end{cases}$$

где  $U_{\text{вх.}}$  — напряжение источника питания, В;

$U_{L1}$  — напряжение на индуктивном элементе, В;

$U_{C1}$  — напряжение на емкостном элементе, В;

$R_1$  — активное сопротивление, Ом;

$X_{C11}, X_{C22}, X_{M12}$  — индуктивные сопротивления, Ом;

$I_{\text{вх.}}$  — входной ток, А;

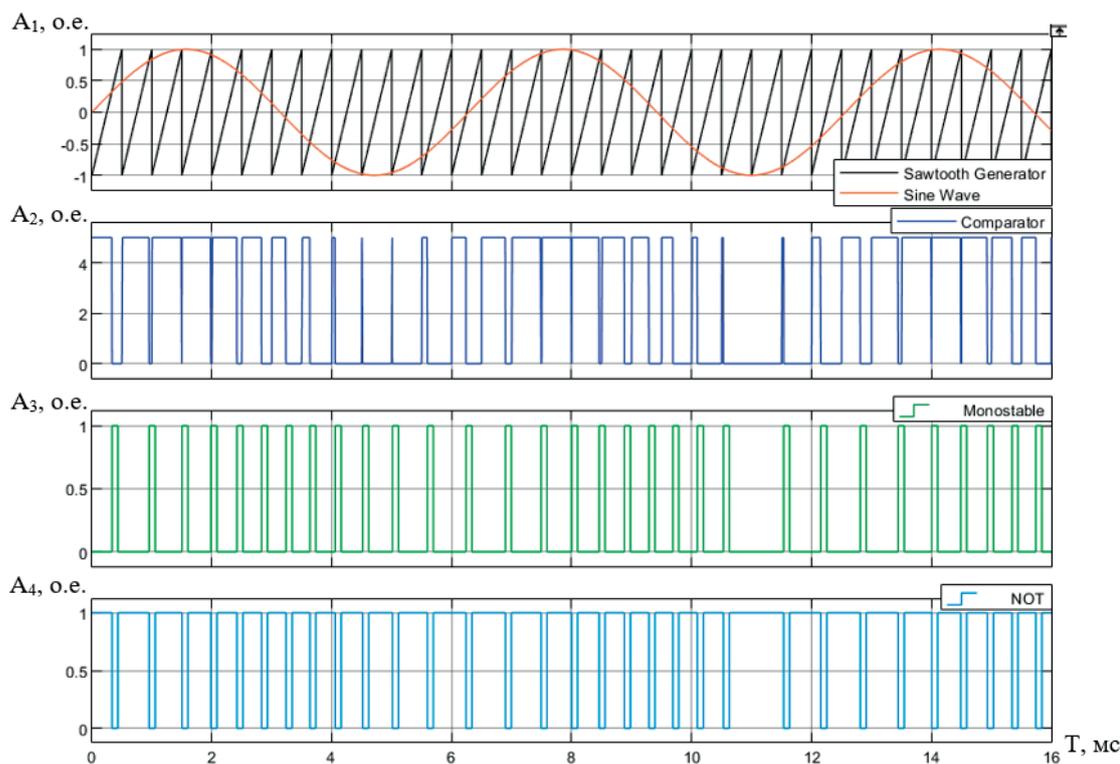
$I_{\text{н.}}$  — ток нагрузки, А.

Напряжение источника питания принимается равным  $U_{\text{вх.}} = 24$  В.

Резонансная частота в рассматриваемом инверторе равна частоте, при которой колебательная система совершает колебания с наибольшей амплитудой при заданных параметрах, тем самым выделяется наибольшее количество энергии на нагрузку. Диапазон изменения данной частоты определяется параметрами колебательного контура. Поэтому использование МИЭК обеспечит регулирование резонансной частоты в широких пределах. Значение данной величины принимается равным  $f_0 = 50$  кГц.

Рассмотрим осциллограммы, осуществляющие ШИМ.

Как видно из первой осциллограммы (рисунок 2), опорное напряжение имеет пилообразную форму, а модулирующее напряжение имеет форму синусоиды. Более качественным считается инвертор, если частота опорного напряжения во много раз превышает частоту модулирующего напряжения, но при этом следует учесть, что данная частота не должна быть ниже времени, которым управляют с помощью ШИМ для того, чтобы не было сильных пульсации выходного параметра. Кроме того, изменение данной частоты влияет также на «мертвое время».



$A_1$  — амплитуды опорного и модулирующего напряжений;  
 $A_2$  — амплитуда сигнала компаратора;  $A_3$  — амплитуда сигнала ШИМ;  
 $A_4$  — амплитуда сигнала ШИМ через логический элемент НЕ

$A_1$  — reference and modulating voltage amplitudes;  
 $A_2$  — comparator signal amplitude;  $A_3$  — PWM signal amplitude;  
 $A_4$  — PWM signal amplitude through the logical element NOT

**Рисунок 2.** Осциллограммы ШИМ

**Figure 2.** PWM oscillograms

В случае, когда модулирующее напряжение превышает опорное напряжение, происходит срабатывание «Comparator», поочередное открытие диагонально противоположных транзисторов и, соответственно, происходит модуляция выходного напряжения.

Из рисунка 3 видно, что осциллограмма выходного напряжения имеет прямоугольную форму, которая наглядно показывает правильность работы резонансного инвертора на основе МИЭК.

Коэффициент полезного действия в резонансном инверторе определяется как

$$\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВЫХ}} + \Delta P},$$

где  $P_{\text{ВЫХ}}$  — выходная мощность, Вт;

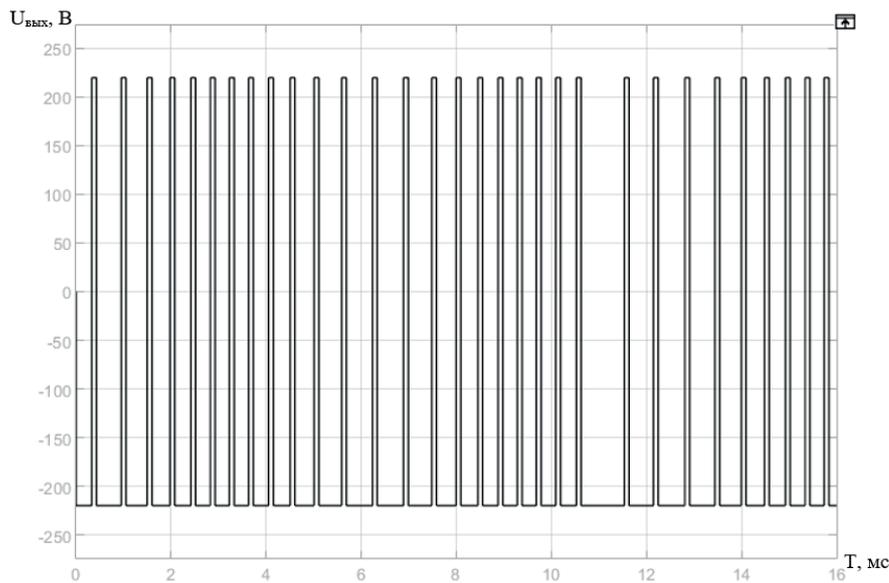
$\Delta P$  — потери мощности в инверторе, Вт.

На рисунке 4 приведена зависимость КПД резонансного инвертора от выходной мощности, из которой наглядно видно, что при малых значениях входных параметров достаточно низкое значение КПД, это связано с коммутационными потерями, что обусловлено большими токами на входе.

Кроме того, при увеличении выходной мощности также наблюдается небольшое снижение КПД из-за увеличения потерь на сопротивление проводов и элементов.

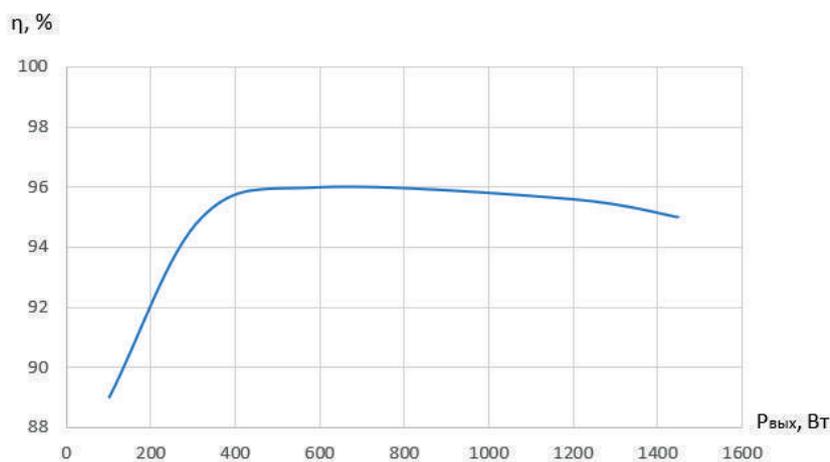
### Выводы

По результатам исследования при реализации ШИМ в резонансном инверторе



**Рисунок 3.** Осциллограмма выходного напряжения инвертора

**Figure 3.** Oscillogram of the inverter output voltage



**Рисунок 4.** Зависимость КПД инвертора от выходной мощности

**Figure 4.** Dependence of efficiency on output power

с МИЭК можно сделать следующие выводы.

1. Проведен анализ широтно-импульсного моделирования и способа управления резонансным инвертором. Моделирование выполнялось в системе Matlab, результаты показали, что ШИМ-модуляция является эффективным способом регулирования выходных параметров резонансного инвертора, достигающегося за счет модуляции сигнала по ширине импульса с постоянной амплитудой в течение всего процесса.

2. Использование МИЭК в резонансном инверторе позволяет улучшить стабилизирующие свойства в преобразователе и обеспечить более точную настройку параметров и стабильную работу устройства.

3. Анализ данного способа управления преобразователем показывает эффективность применения его в различных областях энергетики, в том числе на солнечной электростанции за счет высокой точности регулирования выходных параметров резонансного инвертора.

## Список источников

1. Гельман М.В., Дудкин М.М., Преображенский К.А. Преобразовательная техника: учеб. пособие. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. 425 с.
2. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В. Исследование частотных характеристик двухсекционных многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. № 4 (70). С. 66–71.
3. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Оценка стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2018. № 2. С. 13–20. EDN: YSAXPF.
4. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Силовые преобразователи в электроснабжении: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. 144 с.
5. Ворох Д.А., Махов А.И. Резонансный преобразователь с широтно-импульсной регулировкой выходного напряжения // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15. № 3. С. 143–152.
6. Николаев А.А., Гилемов И.Г., Денисевич А.С. Анализ влияния различных алгоритмов ШИМ активных выпрямителей многоуровневых ПЧ на устойчивость работы при провалах напряжения // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №3 (40). С. 55–62.
7. Осипов А.В., Рулевский В.М. Резонансный LCL-преобразователь с частотно-широотно-импульсным регулированием // Доклады ТУСУР. 2021. Т. 24, № 2. С. 77–83.
8. Осипов А.В., Школьный В.Н., Шиняков Ю.А., Ярославцев Е.В., Шемолин И.С. Последовательный резонансный преобразователь для систем электропитания от аккумуляторов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20. № 2. С. 103–110.
9. Светлов М.Д. Исследование индуктивно-емкостного преобразователя // Academy. 2016. № 8 (11). С. 10–14.
10. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPower Systems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
11. Хазиева Р.Т., Васильев П.И., Купцов Д.В. Исследование стабилизационных свойств двухсекционного многофункционального интегрированного электромагнитного компонента // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2020. Т. 16. № 3. С. 36–42. EDN: TBHXIQ.

## References

1. Gel'man M.V., Dudkin M.M., Preobrazhenskii K.A. *Preobrazovatel'naya tekhnika: uchebnoe posobie* [Converting Technology: a Tutorial]. Chelyabinsk, Izdatel'skii tsentr YuUrGU, 2009. 425 p. [in Russian].
2. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V. Issledovanie chastotnykh kharakteristik dvukhsheksionnykh mnogofunktsional'nykh integrirovannykh elektromagnitnykh komponentov [Investigation of the Frequency Characteristics of Two-Section Multifunctional Integrated Electromagnetic Components]. *Vestnik UGATU — Bulletin of USATU*, 2015, Vol. 19, No. 4 (70), pp. 66–71. [in Russian].
3. Konesev S.G., Khazieva R.T. Otsenka stabilizatsionnykh svoistv induktivno-emkostnykh preobrazovatelei [Assessment of Inductive-Capacitive Converters Stabilization Properties]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2018, No. 2, pp. 13–20. EDN: YSAXPF. [in Russian].
4. Lukutin B.V., Obukhov S.G. *Silovye preobrazovateli v elektrosnabzhenii: uchebnoe posobie* [Power Converters in Power Supply: a Tutorial]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2007. 144 p. [in Russian].
5. Vorokh D.A., Makhov A.I. Rezonansnyi preobrazovatel' s shirotno-impul'snoi regulirovkoi vykhodnogo napryazheniya [Resonant Converter with Pulse-Width Adjustment of the Output Voltage]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie — Bulletin of the Samara University. Aerospace Engineering, Technologies and Mechanical Engineering*, 2016, Vol. 15, No. 3, pp. 143–152. [in Russian].
6. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Denisevich A.S. Analiz vliyaniya razlichnykh algoritmov ShIM aktivnykh vypryamitelei mnogourovnevykh PCh na ustoichivost' raboty pri provalakh napryazheniya [Analysis of the Influence of Various PWM Algorithms of Active Rectifiers of Multilevel FCs on the Stability of Operation during Voltage Dips]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electrical Systems and Complexes*, 2018, No. 3 (40), pp. 55–62. [in Russian].
7. Osipov A.V., Rulevskii V.M. Rezonansnyi LCL-preobrazovatel' s chastotno-shirotno-impul'snym regulirovaniem [Resonant LCL-Converter with Frequency-Width-Pulse Control]. *Doklady TUSUR — Papers of TUSUR*, 2021, Vol. 24, No. 2, pp. 77–83. [in Russian].
8. Osipov A.V., Shkol'nyi V.N., Shinyakov Yu.A., Yaroslavtsev E.V., Shemolin I.S. Posledovatel'nyi

rezonansnyi preobrazovatel' dlya sistem elektropitaniya ot akkumulyatorov [Serial Resonant Converter for Power Supply Systems from Batteries]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki — Papers of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2017, Vol. 20, No. 2, pp. 103–110. [in Russian].

9. Svetlov M.D. Issledovanie induktivno-emkostnogo preobrazovatelya [Investigation of the Inductive-Capacitive Converter]. *Academy*, 2016, No. 8 (11), pp. 10–14. [in Russian].

10. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling Of Electrical Devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink].

Moscow, DMK Press Publ.; Saint-Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p. [in Russian].

11. Khazieva R.T., Vasil'ev P.I., Kuptsov D.V. Issledovanie stabilizatsionnykh svoystv dvukhseksionnogo mnogofunktsional'nogo integrirovannogo elektromagnitnogo komponenta [Research of the Two-Section Multifunctional Integrated Electromagnetic Component Stabilization Properties]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2020, Vol. 16, No. 3, pp. 36–42. EDN: TBHXIQ. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 14.04.2023; одобрена после рецензирования 28.04.2023; принята к публикации 11.05.2023.*

*The article was submitted 14.04.2023; approved after reviewing 28.04.2023; accepted for publication 11.05.2023.*

Научная статья

УДК 621.316.925.1

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-98-109

## ДВУХСТОРОННИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

*Александр Владимирович Сорокин**Alexander V. Sorokin**аспирант кафедры электротехники и электрооборудования предприятий,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия**Виталий Алексеевич Шабанов**Vitaly A. Shabanov**кандидат технических наук, профессор кафедры электротехники  
и электрооборудования предприятий,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия*

### Актуальность

В настоящее время со стороны предприятий, эксплуатирующих распределительные сети 6–35 кВ, существует запрос на глубокую модернизацию сетей и преобразование существующих, устаревших сетей в цифровые. Отдельным аспектом модернизации является внедрение высокоточных измерительных устройств и новых принципов передачи данных. В то же время вероятность возникновения повреждений по различным причинам сохраняется. Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в сетях с изолированной нейтралью по-прежнему остаются наиболее распространенной в распределительных сетях проблемой, не имеющей универсальных решений. Особенно остро проблема обстоит с определением места возникновения ОЗЗ. Возможности, которые дает внедрение цифровых сетей, могут стать основой для реализации новых алгоритмов релейной защиты и определения места повреждения (ОМП).

### Цель исследования

В статье рассмотрен разработанный авторами двухсторонний метод ОМП при однофазных замыканиях на землю по параметрам аварийного режима при установке трансформаторов тока во всех трех фазах. В основе двухстороннего метода ОМП — использование токов и напряжений нулевой последовательности, которые определяются расчетным путем для разностей фазных токов и напряжений в начале и в конце линии. Алгоритм ориентирован на цифровые электрические сети, оснащенные высокоточными измерительными трансформаторами и каналом связи. Для вычисления

### Ключевые слова

определение места повреждения, однофазное замыкание на землю, сеть с изолированной нейтралью, ток и напряжение нулевой последовательности

параметров нулевой последовательности используются разности фазных аварийных параметров в начале и в конце линии.

#### Методы исследования

Для разработки и исследования двухстороннего метода ОМП при ОЗЗ использован принцип наложения в сочетании с методом симметричных составляющих. Разложение трехфазных токов и напряжений на симметричные составляющие является линейной процедурой, поэтому ток нулевой последовательности в трехфазной линии в соответствии с принципом наложения можно представить в виде суммы трех токов нулевой последовательности, каждый из которых определяется по одному из фазных токов при нулевых значениях фазных токов в двух других фазах. Такое применение метода симметричных составляющих справедливо только для чисто аварийных значений фазных токов. Поэтому предварительно из фазных токов аварийного режима должен быть исключен ток нагрузки.

#### Результаты

Показано, что использование метода симметричных составляющих при однофазных замыканиях на землю раздельно для поврежденной и неповрежденных фаз позволяет определить ток нулевой последовательности в месте повреждения и собственный ток нулевой последовательности поврежденной линии. Показано, что такое разделение тока нулевой последовательности позволяет выделить две составляющие нулевой последовательности в разности напряжений по концам линии.

На основе выделения двух составляющих в токе и напряжении нулевой последовательности разработан алгоритм двухстороннего ОМП, позволяющий определять расстояние до ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью. Для исследования двухстороннего метода ОМП реализована модель сети и устройства ОМП в программном комплексе MATLAB Simulink. Представлена функциональная схема устройства двухстороннего ОМП. Выполненные исследования на модели электрической сети показали высокую точность предлагаемого алгоритма ОМП.

**Для цитирования:** Сорокин А. В., Шабанов В. А. Двухсторонний метод определения места однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 2. Т. 19. С. 98-109. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-98-109>.

Original article

## A TWO-WAY METHOD FOR DETERMINING THE LOCATION OF A SINGLE-PHASE EARTH FAULT IN NETWORKS WITH AN ISOLATED NEUTRAL

#### Relevance

Currently, on the part of enterprises operating 6–35 kV distribution networks, there is a request for a deep modernization of networks and the transformation of existing, outdated networks into digital ones. A separate aspect of modernization is the introduction of high-precision measuring devices and new principles of data transmission. At the same time, the probability of damage for various reasons remains. Single-phase earth faults in networks with isolated neutral are still the most common problem in distribution networks that do not have universal solutions. The problem is particularly acute with determining the location of single-phase earth

#### Keywords

determination of the fault location, single-phase earth fault, network with isolated neutral, current and voltage of the zero sequence

faults. The opportunities provided by the introduction of digital networks can become the basis for the implementation of new algorithms for relay protection and determining the location of damage.

#### **Aim of research**

The article considers, developed by the authors, a two-way method for determining the location of damage in single-phase earth faults according to the parameters of the emergency mode when installing current transformers in all three phases. The two-way method of determining the location of damage is based on the use of zero-sequence currents and voltages, which are determined by calculation for phase current and voltage differences at the beginning and end of the line. The algorithm is focused on digital electrical networks equipped with high-precision measuring transformers and a communication channel. To calculate the parameters of the zero sequence, the differences of the phase emergency parameters at the beginning and at the end of the line are used.

#### **Research methods**

To develop and study a two-way method for determining the location of damage in single-phase earth faults, the principle of superposition in combination with the method of symmetrical components was used. Decomposition of three-phase currents and voltages into symmetrical components is a linear procedure. Therefore, the zero-sequence current in a three-phase line, in accordance with the superposition principle, can be represented as the sum of three zero-sequence currents, each of which is determined by one of the phase currents at zero values of phase currents in the other two phases. This application of the method of symmetric components is valid only for purely emergency values of phase currents. Therefore, in advance, the load current must be excluded from the phase currents of the emergency mode.

#### **Results**

It is shown that the use of the method of symmetric components for single-phase earth faults separately for the damaged phase and undamaged phases makes it possible to determine the zero-sequence current at the site of damage and the intrinsic zero sequence current of the damaged line. It is shown that this separation of the zero-sequence current makes it possible to distinguish two components of the zero sequence in the voltage difference at the ends of the line.

Based on the allocation of two components in the current and voltage of the zero sequence, an algorithm for two-way determination of the damage location has been developed, which allows determining the distance to a single-phase earth fault in networks with an isolated neutral. To study the two-way method of determining the location of damage, a network model and a device for determining the location of damage were implemented in the MATLAB Simulink software package. A functional diagram of a two-way damage location detection device is presented. The performed studies on the model of the electrical network have shown the high accuracy of the proposed algorithm for determining the location of damage.

**For citation:** Sorokin A. V., Shabanov V. A. Dvukhstoronniy metod opredeleniya mesta odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu [A Two-Way Method for Determining the Location of a Single-Phase Earth Fault in Networks with an Isolated Neutral]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 2, Vol. 19, pp. 98-109 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-98-109>.

## Введение

Методы определения места повреждения (ОМП) по параметрам аварийного режима (ПАР) основаны на измерении напряжений и токов промышленной частоты в аварийном режиме [1]. Они делятся на односторонние и двухсторонние [2, 3]. В односторонних методах ОМП расстояние до места повреждения определяют по измерениям ПАР на одном конце линии. При этом нет возможности определить ток противоположного конца линии и ток в месте повреждения. Поэтому в односторонних методах ОМП используется приближенная информация о токе в переходном сопротивлении. Ток нулевой последовательности в месте замыкания принимается совпадающим по фазе с током нулевой последовательности в начале линии, а параметры эквивалентной сети, примыкающей к противоположному концу поврежденной линии, не учитываются или учитываются приближенно. В результате при использовании односторонних методов ОМП возникает методическая погрешность [4].

При ОМП по ПАР при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) в сетях с изолированной нейтралью возникают дополнительные проблемы, обусловленные, прежде всего, малой величиной тока в месте замыкания, которые используются в алгоритмах ОМП, и большими погрешностями трансформаторов тока нулевой последовательности. Поэтому методы ОМП по ПАР в настоящее время применяются для определения расстояния до междуфазных коротких замыканий в сетях 6–220 кВ, а в сетях напряжением 110 кВ и выше применяются еще и для определения расстояния до однофазных коротких замыканий на землю [5, 6]. В электрических сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью при ОЗЗ фазные токи изменяются в значительно меньшем диапазоне, и при значительных погрешностях измерительных трансформаторов этих изменений

может быть недостаточно для функционирования методов ОМП по ПАР.

Двухсторонние методы ОМП по ПАР обладают более высокой точностью. В зависимости от алгоритма двухсторонние методы ОМП позволяют либо определить ток в месте замыкания как геометрическую сумму токов с двух сторон линии, либо вообще исключить из алгоритма переходное сопротивление и ток в месте замыкания. Недостатком двухсторонних методов ОМП является необходимость передачи данных о параметрах режима линии с двух концов линии, а при передаче векторов аварийных параметров требуется также синхронизация [7, 8].

Однако в последние годы в связи с развитием цифровых подстанций и цифровых электрических сетей ситуация меняется. В настоящее время проведение синхронизированных векторных измерений (СВИ) становится возможным благодаря устройствам Phasor Measurement Unit (PMU). При использовании устройств PMU появляется возможность измерять, передавать на расстояние и использовать в двухсторонних алгоритмах ОМП как модули, так и векторы ПАР в режиме реального времени [9, 10].

Применение технологии СВИ развивается в распределительных сетях не только высокого, но и среднего напряжения [11, 12]. Специалистами «Инженерный центр «Энергосервис»» (г. Архангельск) разработано оборудование для фиксации СВИ в городских электрических сетях [13, 14]. Для локализации ОЗЗ разработано устройство измерения синхровекторов нулевой последовательности. При этом для обнаружения места ОЗЗ используются напряжение нулевой последовательности и действующие значения и синхровекторы токов нулевой последовательности в начале и конце каждого участка сети.

С внедрением цифровых технологий проблема точности измерительных

трансформаторов также решается. Источниками ПАР на цифровых подстанциях являются оптические измерительные трансформаторы тока (ТТ) и трансформаторы напряжения (ТН). Если погрешность традиционных ТТ существенно зависит от сопротивления соединительных проводов и величины измеряемого тока, то оптические ТТ имеют меньшую и стабильную погрешность, в том числе при измерении малых токов. Благодаря этому решается вопрос повышения точности ТТ и ТН при ОМП. Вся информация от оптических ТТ и ТН передается в устройства защиты и ОМП по локальной вычислительной сети. При этом передача данных в цифровой форме происходит без снижения точности.

Кроме того, ведутся активные разработки алгоритмов идентификации параметров линий электропередачи. Разрабатываются способы определения параметров воздушных линий (ВЛ) на основе данных, получаемых регистраторами электрических процессов, а также на основе синхронизированных двухсторонних измерений [15]. В [16] предложен алгоритм определения параметров ВЛ, нечувствительный к погрешностям синхронизации измерений, в котором используются только интегральные (скалярные) значения параметров режима по концам линии электропередачи. Ведутся исследования по уточнению параметров ВЛ и места однофазного замыкания на землю ВЛ напряжением 6 (10) кВ с учетом климатических условий [17].

Все это создает условия для разработки новых способов ОМП, в том числе дает возможность реализовывать более сложные алгоритмы двухстороннего ОМП по ПАР при ОЗЗ в сетях с малыми токами замыкания.

### Базовые положения

Для разработки и исследования двухстороннего метода ОМП ОЗЗ использован

принцип наложения в сочетании с методом симметричных составляющих. Разложение трехфазных токов и напряжений на симметричные составляющие является линейной процедурой. Поэтому ток нулевой последовательности в трехфазной линии в соответствии с принципом наложения можно представить в виде суммы трех токов нулевой последовательности, каждый из которых определяется по одному из фазных токов при нулевых значениях токов в двух других фазах.

В случае ОЗЗ ток нулевой последовательности в начале линии, работающей в режиме холостого хода, можно представить в виде:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0\text{ПФ}} + \dot{I}_{0\text{НФ1}} + \dot{I}_{0\text{НФ2}} = \dot{I}_{0\text{ПФ}} + \dot{I}_{0\text{НФ}}, \quad (1)$$

где  $\dot{I}_{0\text{ПФ}}$  — ток нулевой последовательности, найденный по току в поврежденной фазе  $\dot{I}_{\text{ПФ}}$  в предположении, что токи в неповрежденных фазах  $\dot{I}_{\text{НФ1}}$  и  $\dot{I}_{\text{НФ2}}$  равны нулю:

$$\dot{I}_{0\text{ПФ}} = \dot{I}_{\text{ПФ}} / 3, \quad (2)$$

$\dot{I}_{0\text{НФ}}$  — ток нулевой последовательности, найденный по геометрической сумме фазных токов в неповрежденных фазах  $\dot{I}_{\text{НФ}} = \dot{I}_{\text{НФ1}} + \dot{I}_{\text{НФ2}}$ , в предположении, что ток в поврежденной фазе  $\dot{I}_{\text{ПФ}}$  равен 0:

$$\dot{I}_{0\text{НФ}} = (\dot{I}_{\text{НФ1}} + \dot{I}_{\text{НФ2}}) / 3. \quad (3)$$

Описанные процедуры справедливы только для чисто аварийных значений фазных токов. Поэтому предварительно необходимо выделить фазные токи чисто аварийного режима путем исключения тока нагрузки. Такое использование метода симметричных составляющих позволяет определить ток нулевой последовательности в месте повреждения и емкостные токи неповрежденных фаз.

### Разработка двухстороннего метода ОМП при ОЗЗ

Устройство двухстороннего ОМП при ОЗЗ устанавливается на линии со стороны источника питания. На другом

конце линии устанавливаются датчики тока ТА2 и напряжения TV2 (рисунок 1). На рисунке 1 токи и напряжения в начале линии обозначены одним штрихом, в конце линии — двумя штрихами.

**Разность токов в поврежденной фазе в начале и в конце линии.** При ОЗЗ на линии Л (рисунок 1) в точке К фазный ток поврежденной фазы в начале линии равен сумме тока нагрузки  $\dot{I}_н$  и аварийного тока  $\dot{I}_{пф}^{ав}$ :

$$\dot{I}'_{пф} = \dot{I}_н + \dot{I}_{пф}^{ав} \quad (4)$$

В конце линии емкостной ток по поврежденной фазе не протекает. Поэтому фазный ток поврежденной фазы в конце линии содержит только ток нагрузки:

$$\dot{I}''_{пф} = \dot{I}_н.$$

При этом разность фазных токов в поврежденной фазе в начале и конце линии будет равна аварийному току в начале линии:

$$\Delta \dot{I}_{пф} = \dot{I}'_{пф} - \dot{I}''_{пф} = \dot{I}_{пф}^{ав} \quad (5)$$

Отметим, что разность токов поврежденной фазы в начале линии до замыкания и при замыкании кроме аварийного тока замыкания будет содержать емкостной ток, протекающий в междуфазной емкости. Поэтому использование разности токов по концам линии в алгоритме

ОМП может вносить методическую погрешность.

**Разность токов в неповрежденных фазах в начале и в конце линии.** В начале линии в каждой из неповрежденных фаз протекает векторная сумма тока нагрузки и емкостных токов  $\dot{I}_{с.нф}$ , протекающих в емкости неповрежденной фазы относительно земли:

$$\dot{I}'_{н.ф} = \dot{I}_н + \dot{I}_{с.нф} \quad (6)$$

В конце линии в каждой из неповрежденных фаз протекает только ток нагрузки. При этом разность токов в начале и в конце линии в каждой из неповрежденных фаз будет равна емкостному току, протекающему в емкости неповрежденной фазы относительно земли в аварийном режиме:

$$\Delta \dot{I}_{нф} = \dot{I}'_{нф} - \dot{I}''_{нф} = \dot{I}_{с.нф} \quad (7)$$

Если к поврежденной линии подключены трансформатор или двигатель, или смежная линия, то кроме собственного емкостного тока поврежденной линии в неповрежденной фазе и в конце, и в начале линии будут также протекать емкостные токи неповрежденных фаз трансформатора, двигателя или линии. При этом и в этих случаях разность токов в начале и конце линии в каждой из неповрежденных фаз будет определяться по (7) и равна только емкостным токам, про-

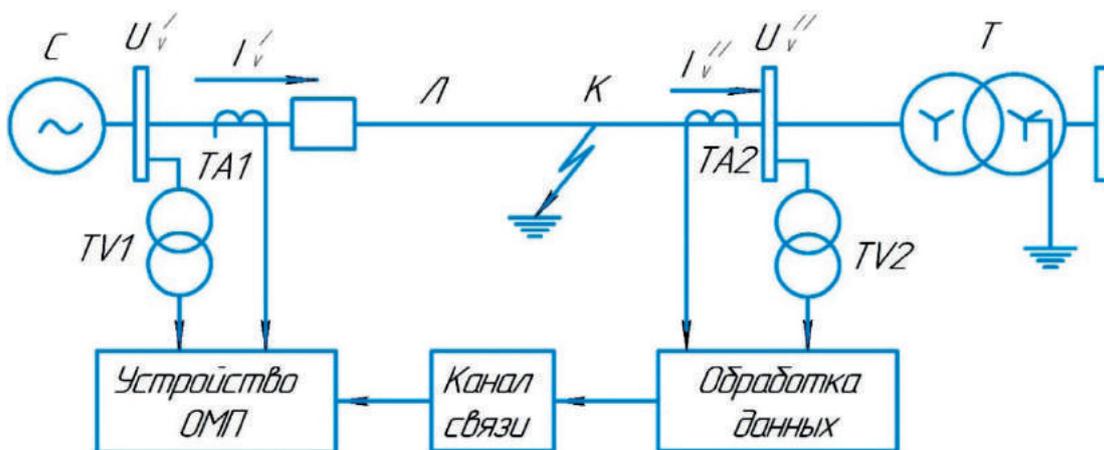


Рисунок 1. Схема двухстороннего определения места повреждения

Figure 1. The scheme of damage two-way determination

текающим в емкостях неповрежденных фаз линии относительно земли в аварийном режиме.

**Определение токов нулевой последовательности.** В односторонних алгоритмах ОМП при ОЗЗ по ПАР в качестве опорного тока используется ток нулевой последовательности, измеряемый в начале линии [18]. При использовании этого тока для целей ОМП возникают две проблемы. Во-первых, ток нулевой последовательности в начале линии не равен току нулевой последовательности в месте замыкания. И, во-вторых, ток нулевой последовательности носит распределенный характер и увеличивается от начала линии к месту повреждения.

Оба эти свойства тока нулевой последовательности приводят к методической погрешности в односторонних методах ОМП. При использовании двухстороннего метода ОМП такую методическую погрешность можно исключить. Для этого применим описанное выше сочетание методов наложения и симметричных составляющих к разностям фазных токов по выражениям (5) и (7). Примем разности токов в неповрежденных фазах по (7) равными нулю. Тогда для составляющей тока нулевой последовательности, обусловленной разностью токов в поврежденной фазе по (5), в соответствии с (2) можем записать:

$$\dot{I}_{0\text{нф}} = \Delta \dot{I}_{\text{нф}} / 3. \quad (8)$$

Ток нулевой последовательности по (8) протекает на участке поврежденной линии от начала до места повреждения.

Принимая разность токов в поврежденной фазе по (5) равной нулю, для тока нулевой последовательности, найденного по разностям токов в двух неповрежденных фазах по (7) в соответствии с (3), можем записать:

$$\dot{I}_{0\text{нф}} = (\Delta \dot{I}_{\text{нф}1} + \Delta \dot{I}_{\text{нф}2}) / 3. \quad (9)$$

Ток нулевой последовательности  $\dot{I}_{0\text{нф}}$  по (9) носит распределенный характер и протекает по всей длине линии.

**Определение падения напряжения нулевой последовательности.** Рассмотрим разности фазных напряжений для каждой фазы по данным измерения напряжений в начале и конце линии:

$$\Delta \dot{U}_v = \dot{U}'_v - \dot{U}''_v. \quad (10)$$

Разность фазных напряжений поврежденной фазы по (10) будет равна сумме падения напряжения  $\Delta \dot{U}_{\text{лн}}$  в продольном сопротивлении линии от протекания тока нагрузки и падения напряжения  $\Delta \dot{U}_{\text{ав}}$  от протекания аварийного тока на участке от начала линии до места повреждения:

$$\Delta \dot{U}_{\text{нф}} = \Delta \dot{U}_{\text{лн}} + \Delta \dot{U}_{\text{ав}}. \quad (11)$$

В неповрежденных фазах разность фазных напряжений по (10) равна сумме падения напряжения от тока нагрузки  $\Delta \dot{U}_{\text{лн}}$  и падения напряжения  $\Delta \dot{U}_{\text{ав}}$  от протекания емкостных токов неповрежденных фаз в продольных сопротивлениях линии:

$$\Delta \dot{U}_{\text{ннф}} = \Delta \dot{U}_{\text{лн}} + \Delta \dot{U}_{\text{лс}}. \quad (12)$$

Принимая во внимание выражения (11) и (12), определим составляющую напряжения нулевой последовательности  $\Delta \dot{U}_0$  в разностях фазных напряжений (10). Падение напряжения от тока нагрузки в (11) и (12) симметричное. Поэтому напряжение нулевой последовательности в разности фазных напряжений по (10) будет содержать составляющие, обусловленные падением напряжения  $\Delta \dot{U}_{\text{ав}}$  от протекания аварийного тока на участке от начала линии до места повреждения в (11) и падением напряжения  $\Delta \dot{U}_{\text{лс}}$  от протекания емкостных токов неповрежденных фаз в продольных сопротивлениях линии в (12). Применим разложение тока нулевой последовательности на две составляющие по (8) и (9). Тогда падение напряжения нулевой последовательности в поврежденной

линии  $\Delta\dot{U}_0$  можно представить в виде векторной суммы двух падений напряжения:

$$\Delta\dot{U}_0 = \Delta\dot{U}_{s0} + \Delta\dot{U}_{c0}, \quad (13)$$

где  $\Delta\dot{U}_{s0}$  — падение напряжения от тока нулевой последовательности  $\dot{I}_{0\text{нф}}$  найденного при равенстве нулю токов в двух неповрежденных фазах;

$\Delta\dot{U}_{c0}$  — падение напряжения от тока нулевой последовательности  $\dot{I}_{0\text{нф}}$  найденного при равенстве нулю тока в поврежденной фазе.

Напряжение  $\Delta\dot{U}_{s0}$  представляет собой падение напряжения в сопротивлении нулевой последовательности линии до места повреждения:

$$\Delta\dot{U}_{s0} = \dot{I}_{0\text{нф}} \cdot l \cdot Z_{0\text{уд}}, \quad (14)$$

где  $l$  — расстояние до места замыкания;

$Z_{0\text{уд}}$  — удельное сопротивление линии нулевой последовательности.

Емкостной ток, протекающий через емкости неповрежденных фаз относительно земли, а, следовательно, и ток нулевой последовательности неповрежденных фаз линейно изменяются вдоль линии. Ток нулевой последовательности неповрежденных фаз изменяется от нуля в конце линии до его значения  $\dot{I}_{0\text{нф}}$  в начале линии и его среднее значение будет равно  $0,5\dot{I}_{0\text{нф}}$ . При этом напряжение нулевой последовательности  $\Delta\dot{U}_{c0}$  от протекания тока нулевой последовательности неповрежденных фаз в сопротивлении линии  $Z_{0\text{лин}}$ :

$$\Delta\dot{U}_{c0} = 0,5 \cdot \dot{I}_{0\text{нф}} \cdot Z_{0\text{лин}}. \quad (15)$$

Подставим (14) и (15) в (13) и решим относительно расстояния до места замыкания. Принимая вещественную часть полученного решения, получаем для расстояния до места замыкания:

$$l = \text{Re} : \left[ \frac{\Delta\dot{U}_0 - 0,5 \cdot \dot{I}_{0\text{нф}} \cdot Z_{0\text{лин}}}{\dot{I}_{0\text{нф}} \cdot Z_{0\text{уд}}} \right]. \quad (16)$$

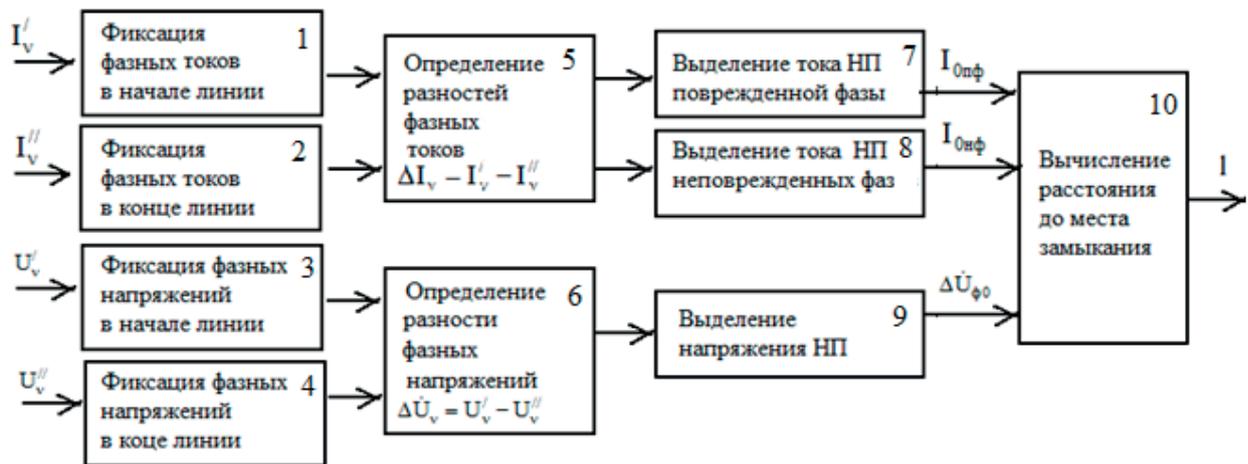
Описанный алгоритм не учитывает наличия токов, протекающих в между-

фазных емкостях. Это может стать причиной погрешностей работы алгоритма при определении места повреждения при работе его на кабельных линиях, где междуфазные емкости значительно больше, чем у воздушных линий. Следовательно, алгоритм (16) будет иметь более высокую точность результатов для воздушных линий, междуфазный емкостной ток которых, не будет оказывать существенного влияния на точность алгоритма ОМП.

### Исследование алгоритма двухстороннего ОМП на модели

Для оценки работоспособности двухстороннего алгоритма ОМП были реализованы модели электрической сети и алгоритм в программном комплексе MATLAB Simulink. Входной информацией для модели электрической сети являются длины линий, параметры нагрузки, удельные параметры линии. Выходными величинами модели сети являются комплексы фазных токов и фазных напряжений в начале и в конце линии. Функциональная схема алгоритма приведена на рисунке 2.

При возникновении ОЗЗ происходит пуск устройства ОМП и в блоках 1–4 (рисунок 2) устройство ОМП фиксирует и обрабатывает комплексы фазных напряжений на шинах  $U'_v; \dot{U}''_v$ ; и фазных токов в начале и конце поврежденной линии  $\dot{I}'_v; \dot{I}''_v$ . По полученным значениям устройство определяет поврежденную фазу [19] и в блоках 5 и 6 определяются разности фазных токов по (5) и (7) и напряжений по (10) по концам линии. В блоках 7 и 8 определяются составляющие нулевой последовательности разностей фазных токов в поврежденной фазе по (8) и в неповрежденных фазах по (9). В блоке 9 формируется составляющая нулевой последовательности разности фазных напряжений, замеренных в начале и в конце линии  $\Delta\dot{U}_0$ . По получен-



**Рисунок 2.** Функциональная схема алгоритма двухстороннего определения места повреждения

**Figure 2.** Functional diagram of the algorithm for damage two-way determination

ным данным и удельному сопротивлению линии нулевой последовательности в блоке 10 по выражению (16) вычисляется расстояние до места ОЗЗ.

Параметры сети с изолированной нейтралью приведены в таблице 1.

Результаты исследования работы двухстороннего алгоритма ОМП представлены в таблице 2.

Результаты исследований на модели подтвердили работоспособность алгоритма двухстороннего ОМП. Из результатов исследований на модели, представленных в таблице 2, следует, что во всех случаях относительная погрешность работы алгоритма ОМП при ОЗЗ с использованием параметров нулевой не превышает 2 %.

**Таблица 1.** Основные характеристики модели сети

**Table 1.** The main characteristics of the network model

Параметры сети	Значение параметра
Номинальное напряжение, кВ	6
Тип испытываемой линий	ВЛ
Протяженность испытываемой линии, км	5
Суммарный емкостной ток сети, А	19,6

**Таблица 2.** Результаты проверки работы алгоритма определения места повреждения на модели

**Table 2.** Results of checking the operation of the algorithm for damage determining on the model

Параметр	Расстояние до ОЗЗ, км					
	0,5	1,25	2,5	3,75	4,5	5
Металлическое ОЗЗ						
Расстояние по алгоритму, км	0,51	1,26	2,55	3,79	4,5	4,99
Относительная погрешность, %	2	0,8	2	1,07	0	-0,2
ОЗЗ с переходным сопротивлением — 200 Ом						
Расстояние по алгоритму, км	0,51	1,25	2,5	3,75	4,5	4,99
Относительная погрешность, %	2	0	0	0	0	-0,2

## Выводы

1. Предложено использовать метод симметричных составляющих при однофазных замыканиях на землю отдельно для поврежденной фазы и неповрежденных фаз, что позволяет определить ток нулевой последовательности в месте повреждения и собственный ток нулевой последовательности поврежденной линии. Показано, что такое разделение тока нулевой последовательности на две составляющие позволяет выделить две составляющие нулевой последовательности в разности напряжений по концам линии.

## Список источников

1. Шалыт Г.М., Айзенфельд А.И., Малый А.С. Определение мест повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима. М.: Энергоатомиздат, 1983. 208 с.
2. Аржанников Е.А., Чухин А.М. Методы и приборы определения места короткого замыкания на линиях: учеб. пособие // Ивановский государственный энергетический университет. Иваново, 1998. 74 с.
3. Висящев А.Н. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи: учебн. пособие: в 2 ч. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. Ч. 1. 188 с.
4. Куликов А.Л., Вуколов В.Ю., Шарыгин М.В., Бездушный Д.И., Темирбеков Ж. Алгоритм определения места повреждения линии электропередачи с ответвлениями // Вестник НГИЭИ. 2017. № 9 (76). С. 29-38. EDN: ZJTXDF.
5. Аржанников Е.А., Лукоянов Е.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Под ред. М.А. Шуина. М.: Энергоатомиздат, 2003. 272 с.
6. Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E. Fault Location on Power Networks. London: Springer, 2010. ISBN: 978-1-84882-885-8.
7. Brahma S.M. New Fault Location Scheme for a Two-Terminal Transmission Line Using Synchronized Phasor Measurements // Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, May 2006. 2006. P. 853–857.
8. Izykowski J., Rosolowski E., Balcerak P., Fulczyk M., Saha M.M. Accurate Noniterative Fault Location Algorithm Utilizing Two-End Unsynchronized Measurements // IEEE Transactions on Power Delivery. 2010. Vol. 25, No. 1. P. 72–80.
2. На основе выделения двух составляющих в токе и напряжении нулевой последовательности разработан алгоритм двухстороннего ОМП, позволяющий определять расстояние до однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью. Алгоритм ориентирован на цифровые электрические сети, оснащенные высокоточными измерительными трансформаторами и каналом связи.
3. Выполненные исследования на модели электрической сети показали высокую точность предложенного алгоритма.
9. Yin Z., Wei Z., Sun G., et al. High Sensitivity Fault Location Technology for Distribution Networks Considering Measurement Error // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2022. Vol. 140. P. 108055. DOI 10.1016/j.ijepes.2022.108055. EDN UZPWYV.
10. Пленков Э.Р. Синхронизация векторов токов и напряжений при определении места повреждения на воздушных линиях // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. № 22 (12). С. 202–210. DOI: 10.21285/1814-3520.-2018-12-202-210. EDN: VRFVBV.
11. Saeid Khavari, Rahman Dashti, Hamid Reza Shake, Athila Santos. High Impedance Fault Detection and Location in Combined Overhead Line and Underground Cable Distribution Networks Equipped with Data Loggers // Energies. 2020. No. 13. P. 2331. doi: 10.3390/en13092331.
12. Пискунов С.А., Мокеев А.В., Ульянов Д.Н. Автоматизация распределительных сетей среднего напряжения на базе синхронизированных векторных измерений // Релейная защита и автоматизация. 2021. № 4 (45). С. 54–60. EDN: IEDTMD.
13. Попов А.И., Мокеев А.В., Пискунов С.А., Родионов А.В. Применение технологии синхронизированных векторных измерений для повышения надежности и эффективности работы энергосистем // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: матер. 92-го заседания-семинара, учрежденного при ИСЭМ СО РАН: в 3 кн. Казань, 21-26 сентября 2020 г. Иркутск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии

наук, 2020. Вып. 71. Кн. 2. С. 302–311. EDN PZJRJJ. <https://energybase.ru/news/articles/applications-of-synchronized-vector-measurement-technology-to-improve-reliability-2020-09-23>.

14. Mokeev A.V., Piskunov S.A., Ulyanov D.N., Khromtsov E.I. Improving the Efficiency and Reliability of RPA Systems of Digital Step-Down Substations and Digital Grids // E3S Web of Conferences. 2020.

15. Пирогов М.Г., Чепелев В.Н. Дистанционное определение места повреждения на линии с применением нового адаптивного алгоритма // Энергоэксперт. 2009. № 4. С. 54–55.

16. Хрущев Ю.В., Бацева Н.Л., Абрамочкина Л.В. Идентификация параметров схем замещения воздушных линий электропередачи по данным регистраторов электрических сигналов // Энергетика глазами молодежи: сб. научн. тр. Всеросс. научн.-техн. конф.: в 2 т. Екатеринбург: Урфу, 2010. Т. 1. С. 108–113.

17. Сидоров С.В., Сушков В.В., Сухачев И.С. Разработка методики определения места однофазного замыкания на землю воздушной линии электропередачи напряжением 6(10) кВ с учетом климатических условий // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 2. С. 115–123. EDN: RCSGOT.

18. Шабанов В.А., Сорокин А.В. Алгоритмы дистанционного определения расстояния до места однофазного замыкания с использованием тока нулевой последовательности в качестве опорного тока // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. № 1, Т. 17. С. 33–43. EDN: RSKXOJ.

19. Шабанов В.А., Сорокин А.В. Признаки поврежденной фазы при однофазных замыканиях на землю // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. № 3-4, Т. 18. С. 89–100. EDN: HBMKZO.

## References

1. Shalyt G.M., Aizenfel'd A.I., Malyi A.S. *Opređenje mest povrezhdeniya linii elektropere-dachi po parametram avarinogo rezhima* [Determination of the Places of Damage to Power Transmission Lines According to the Parameters of the Emergency Mode]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 208 p. [in Russian].

2. Arzhannikov E.A., Chukhin A.M. *Metody i pribory opredeleniya mesta korotkogo замыкания na liniyakh: uchebnoe posobie* [Methods and Devices for Determining the Location of a Short Circuit on Lines: Textbook]. Ivanovo State Power Engineering University. Ivanovo, 1998. 74 p. [in Russian].

3. Visyashchev A.N. *Pribory i metody opredeleniya mesta povrezhdeniya na liniyakh elektropere-dachi: uchebnoe posobie: v 2 ch.* [Devices and Methods for Determining the Location of Damage on Power Transmission Lines: Textbook: in 2 Ch.]. Irkutsk, Izd-vo IrGTU, 2001. Ch. 1. 188 p. [in Russian].

4. Kulikov A.L., Vukolov V.Yu., Sharygin M.V., Bezdushnyi D.I. Temirbekov Zh. Algoritm opredeleniya mesta povrezhdeniya linii elektropere-dachi s otvetvleniyami [Fault Location Algorithm for a Power Line with Taps]. *Vestnik NGIEI — Bulletin of the NGIEI*, 2017, No. 9 (76), pp. 29-38. EDN: ZJTXDF. [in Russian].

5. Arzhannikov E.A., Lukoyanov E.Yu., Mirikhanov M.Sh. *Opređenje mesta korotkogo замыкания na vysokovol'tnykh liniyakh elektropere-dachi* [Determining the Location of a Short Circuit on High-Voltage Power Transmission Lines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2003. 272 p. [in Russian].

6. Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E. *Fault Location on Power Networks*. London, Springer, 2010. ISBN: 978-1-84882-885-8.

7. Brahma S.M. New Fault Location Scheme for a Two-Terminal Transmission Line Using Synchronized Phasor Measurements. *Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, May 2006*, 2006, pp. 853–857.

8. Izykowski J., Rosolowski E., Balcerek P., Fulczyk M., Saha M.M. Accurate Noniterative Fault Location Algorithm Utilizing Two-End Unsynchronized Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, Vol. 25, No. 1, pp. 72–80.

9. Yin Z., Wei Z., Sun G., e.a. High Sensitivity Fault Location Technology for Distribution Networks Considering Measurement Error. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, Vol. 140, pp. 108055. doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108055. EDN UZPWYV.

10. Plenkov E.R. Sinkhronizatsiya vektorov tokov i napryazhenii pri opredelenii mesta povrezhdeniya na vozduzhnykh liniyakh [Surrent and Voltage Phasor Synchronization at Fault Localization in Overhead Power Lines]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2018, No. 22 (12), pp. 202–210. doi: 10.21285/1814-3520.-2018-12-202-210. EDN: VRFVBV. [in Russian].

11. Saeid Khavari, Rahman Dashti, Hamid Reza Shake, Athila Santos. High Impedance Fault Detection and Location in Combined Overhead Line and Underground Cable Distribution Networks Equipped with Data Loggers. *Energies*, 2020, No. 13, pp. 2331. doi: 10.3390/en13092331.

12. Piskunov S.A., Mokeev A.V., Ul'yanov D.N. Avtomatizatsiya raspredelitel'nykh setei srednego napryazheniya na baze sinkhronizirovannykh vektornykh izmerenii [Medium Voltage Distribution Network Automation Based on Synchronized Phasor Measurements]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya — Relay Protection and Automation*, 2021, No. 4 (45), pp. 54–60. EDN: IEDTMD. [in Russian].

13. Popov A.I., Mokeev A.V., Piskunov S.A., Rodionov A.V. Primenenie tekhnologii sinkhronizirovannykh vektornykh izmerenii dlya povysheniya nadezhnosti i effektivnosti raboty energosistem. [Application of the Technology of Synchronized Vector Measurements to Improve the Reliability and Efficiency of Power Systems]. *Materialy 92 zasedaniya-seminara «Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki», uchrezhdennogo pri ISEM SO RAN: v 3 kn. Kazan', 21-26 sentyabrya 2020 g.* [Materials of 92 Meeting-Seminar «Methodical Issues of Researching the Reliability of Large Energy Systems» Established at the ISEM SB RAS: in 3 Books. Kazan', 21-26 September 2020]. Irkutsk, Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut sistem energetiki im. L.A. Melent'eva Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk, 2020. Issue 71, Book 2, pp. 302–311. EDN PZJRJJ. <https://energybase.ru/news/articles/applications-of-synchronized-vector-measurement-technology-to-improve-reliability-2020-09-23>. [in Russian].

14. Mokeev A.V., Piskunov S.A., Ulyanov D.N., Khromtsov E.I. Improving the Efficiency and Reliability of RPA Systems of Digital Step-Down Substations and Digital Grids. *E3S Web of Conferences*. 2020.

15. Pirogov M.G., Chepelev V.N. Distantionnoe opredelenie mesta povrezhdeniya na linii s primeneniem novogo adaptivnogo algoritma [Remote Determination of the Damage Location on the Line Using a New Adaptive Algorithm]. *Energoekspert*, 2009, No. 4, pp. 54–55. [in Russian].

16. Khrushchev Yu.V., Batseva N.L., Abramochkina L.V. Identifikatsiya parametrov skhem zameshcheniya vozdushnykh linii elektro-

peredachi po dannym registratorov elektricheskikh signalov [Identification of Parameters of Overhead Transmission Line Replacement Schemes according to the Data of Electrical Signal Recorders]. *Sbornik nauchnykh trudov Vserossiiskoi nauchnotekhnicheskoi konferentsii «Energetika glazami molodezhi»: v 2 t.* [Collection of Scientific Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference «Power Engineering by the Eyes of Youth»: in 2 Vol.]. Ekaterinburg, URFU, 2010, Vol. 1, pp. 108–113. [in Russian].

17. Sidorov S.V., Sushkov V.V., Sukhachev I.S. Razrabotka metodiki opredeleniya mesta odnofaznogo zamykaniya na zemlyu vozdushnoi linii elektroperedachi napryazheniem 6(10) kV s uchetom klimaticheskikh uslovii [Development of a Method for Determining the Location of a Single-Phase Ground Fault of an Overhead Power Line 6(10) kV Voltage Considering Climatic Factors]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, Vol. 331, No. 2, pp. 115–123. EDN: RCSGOT. [in Russian].

18. Shabanov V.A., Sorokin A.V. Algoritmy distantsionnogo opredeleniya rasstoyaniya do mesta odnofaznogo zamykaniya s ispol'zovaniem toka nulevoi posledovatel'nosti v kachestve opornogo toka [Algorithms for Remote Determination of the Distance to the Single-Phase Fault Location Using the Zero-Sequence Current as the Reference Current]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2021, No. 1, Vol. 17, pp. 33–43. EDN: RSKXOJ. [in Russian].

19. Shabanov V.A., Sorokin A.V. Priznaki povrezhdennoi fazy pri odnofaznykh zamykaniyakh na zemlyu [Features of a Faulty Phase at Single Phase-to-Ground Faults]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2022, No. 3–4, Vol. 18, pp. 89–100. EDN: HBMKZO. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 18.04.2023; одобрена после рецензирования 17.05.2023; принята к публикации 24.05.2023.

The article was submitted 18.04.2023; approved after reviewing 17.05.2023; accepted for publication 24.05.2023.

Научная статья

УДК 621.314.21

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-110-122

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Андрей Владиславович Стыскин****Andrey V Styskin**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Электромеханика»,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия

**Любовь Эммануиловна Рогинская****Lyubov E. Roginskaya**

доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник кафедры «Электромеханика»,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия

**Ильгиз Флюсович Янгиров****Ilgiz F. Yangirov**

доктор технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Электромеханика»,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия

**Антон Сергеевич Горбунов****Anton S. Gorbunov**

кандидат технических наук, младший научный сотрудник  
кафедры «Авиационная теплотехника и теплоэнергетика»,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия

**Руслан Динарович Каримов****Ruslan D. Karimov**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Авиационная теплотехника и теплоэнергетика»,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия

**Денис Вилевич Максудов****Denis V Maksudov**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электромеханика»,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия

## Посвящается памяти Уразбахтиной Нэли Гиндуллаевны

### Актуальность

При эксплуатации полупроводниковых преобразователей и электротехнических установок (например, агрегатов зажигания, преобразователей озонаторов и газоразрядных ламп, объектов энергетики, где периодически возникает коронный разряд и т.п.) зачастую возникает повышенный уровень электромагнитных помех. В этих условиях к источникам питания и устройствам передачи информации предъявляются повышенные требования по электромагнитной совместимости и гальванической развязке. Подобные же вопросы иногда возникают при установке информационного оборудования в полевых условиях, где нет возможности подключить заземление. Удовлетворение указанных требований возможно при использовании параметрических трансформаторов (ПТ). При этом работа ПТ характеризуется специальными требованиями к их конструкции и выбору основных параметров их элементов ввиду электромагнитного режима, связанного с необходимостью насыщения сердечника, и из-за возникновения значительной реактивной мощности, циркулирующей в ПТ вместе с активной. Ввиду специальной области применения ПТ, а также сложности протекающих в них электромагнитных процессов в настоящее время не существует обобщенных и достаточно точных для практики методик расчета ПТ. Известные же приближенные методики проектирования ПТ затрагивают лишь отдельные вопросы выбора их параметров.

### Цель исследования

В данной статье предлагается создание методики расчета ПТ, которая при этом позволяет производить проектирование устройства не только для обеспечения электромагнитной совместимости, но и с целью дальнейшей возможности перехода к оптимизации получаемых параметров в результате расчета ПТ, а также с целью дальнейшей разработки обобщенных методик проектирования параметрических электрических машин, которые тоже представляют особый интерес.

### Объекты исследования

Параметрические трансформаторы, ортогональные магнитные системы.

### Методы исследования

При разработке методики расчета параметрических трансформаторов использовались традиционные методы исследований, основанные на классической теории электрических и магнитных цепей.

### Результаты

В результате проведенной работы удалось создать методику расчета параметрических трансформаторов, которая может быть использована при проектировании специальных источников вторичного электропитания и других устройств преобразования электроэнергии. Определен алгоритм расчета и методы вычисления основных параметров трансформаторов данного вида.

### Ключевые слова

методика расчета, параметрический трансформатор, параметрическая ЭДС, параметрическое возбуждение, магнитная проницаемость, изменение индуктивности

**Для цитирования:** Стыскин А. В., Рогинская Л. Э., Янгиров И. Ф., Горбунов А. С., Каримов Р. Д., Максудов Д. В. Разработка методики расчета параметрических трансформаторов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 2. Т. 19. С. 110-122. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-110-122>.

Original article

## DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CALCULATION OF PARAMETRIC TRANSFORMERS

### Relevance

During the operation of semiconductor converters and electrical installations (for example: ignition units, converters of ozonizers and gas-discharge lamps, energy facilities where corona discharge periodically occurs, etc.), an increased level of electromagnetic interference often occurs. Under these conditions, increased requirements for electromagnetic compatibility and galvanic isolation are imposed on power sources and information transmission devices. Similar questions sometimes arise when installing information equipment in the field, where it is not possible to connect the ground. Satisfaction of these requirements is possible when using parametric transformers (PT). At the same time, the operation of the PT is characterized by special requirements for their design and the choice of the main parameters of its elements due to the electromagnetic mode associated with the need to saturate the core and due to the occurrence of significant reactive power circulating in the PT along with active power. Due to the special field of application of PTs, as well as the complexity of the electromagnetic processes occurring in them, at present there are no generalized and sufficiently accurate methods for calculating PTs for practice. The well-known approximate methods for designing PTs affect only certain issues of choosing their parameters.

### Aim of research

This article proposes the creation of a methodology for calculating the PT, which at the same time allows the design of a device not only to ensure electromagnetic compatibility, but also with the aim of further possibility of transition to optimization of the parameters obtained as a result of the calculation of the PT, as well as with the aim of further developing generalized methods for designing parametric electrical machines, which are also of particular interest.

### Research objects

Parametric transformers, orthogonal magnetic systems.

### Research methods

When developing a methodology for calculating parametric transformers, traditional research methods based on the classical theory of electrical and magnetic circuits were used.

### Results

As a result of the work carried out, it was possible to create a methodology for calculating parametric transformers, which can be used in the design of special secondary power sources and other power conversion devices. The calculation algorithm and methods for calculating the main parameters of transformers of this type are determined.

### Keywords

calculation technique, parametric transformer, parametric EMF, parametric excitation, magnetic permeability, inductance change

**For citation:** Styskin A. V., Roginskaya L. E., Yangirov I. F., Gorbunov A. S., Karimov R. D., Maksudov D. V. Razrabotka metodiki rascheta parametricheskikh transformatorov [Development of a Method for Calculation of Parametric Transformers]. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekxy i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 2, Vol. 19, pp. 110-122 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-110-122>.

### Введение. Постановка задачи

Принцип действия параметрических трансформаторов (ПТ) достаточно подробно описан в источниках [1–3], согласно которым ПТ представляет собой резонансный параметрический усилитель, при работе которого приток энергии осуществляется из заранее запасенной энергии магнитного поля при изменении индуктивности в  $LC$ -цепи. При этом при идеальном резонансе в таком контуре реактивная мощность в нагрузке минимальна, так как индуктивность и ёмкость друг друга компенсируют. В свою очередь, реактивная мощность, запасаемая в магнитном поле индуктивности, должна быть не меньше активной, что является энергоопределяющим параметром ПТ [4].

В настоящее время известно большое количество работ, посвященных исследованию электромагнитных процессов при параметрическом возбуждении колебаний в электрических и магнитных цепях [5–9]. Так, изучением этих вопросов занимались советские ученые под руководством Л.И. Мандельштама и Н.Д. Папалекси [6–9], в результате была разработана теория и опробован новый метод генерирования переменных токов посредством параметрического возбуждения.

При разработке методики расчета ПТ, в первую очередь, необходимо определиться с концепцией и подходом к расчету с учетом общих принципов проектирования и оптимизации электромагнитных устройств [10–13]. Расчет ПТ должен начинаться с определения основных энергетических показателей. Так, энергия, запасаемая в индуктивности:

$$W_L = \frac{L_1 \cdot I^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2 \cdot L_1} = \frac{B^2 \cdot S \cdot I}{2 \cdot \mu \cdot \mu_0}, \quad (1)$$

где  $L_1$  — индуктивность выходной обмотки ПТ, Гн;

$i$  — ток, А;

$\Phi$  — магнитный поток в сердечнике, Вб;

$B$  — магнитная индукция, Тл;

$S$  — площадь сечения рабочего сердечника, м<sup>2</sup>;

$\mu$  — относительная магнитная проницаемость материала сердечника;

$\mu_0$  — магнитная постоянная, Гн/м.

Магнитная проницаемость  $\mu$  и связанная с ней индуктивность выходной обмотки ПТ при его работе будут периодически изменяться в соответствии с формулой:

$$\Delta L = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot w^2 \cdot S}{10^6 \cdot l} (\mu_{\Delta \max} - \mu_{\Delta \min}), \quad (2)$$

где  $w$  — число витков выходной обмотки;

$l$  — длина рабочего сердечника, м.

Изменение энергии в индуктивности определяется по формуле:

$$\Delta W_L = \frac{\Delta L \cdot I^2}{2}. \quad (3)$$

Приток энергии за счет параметрического воздействия ограничен и определяется индукцией насыщения, коэффициентом модуляции индуктивности и амплитудой колебаний тока. При импульсном воздействии также значение имеет длительность импульса.

В настоящее время известно большое количество литературных источников, посвященных исследованию электромагнитных и тепловых процессов в трансформаторах с различными магнитными системами [14–21], а также способов расчета магнитных потерь и токов холостого хода [22–24]. Как известно, разные конструкции ПТ определяют различные диапазоны изменения их параметров. В конструкциях с пересечением сердечников пространственная область насыщения невелика, поэтому степень изменения магнитной проницаемости также небольшая. Кроме этого, в таких конструкциях в зоне пересечения сердечников существует выпучивание магнитного потока как со стороны магнитной цепи возбуждения, так и со стороны силовой

магнитной цепи. Это явление зависит от конструкции и сечений сердечников и приводит к уменьшению насыщения магнитной цепи.

Известно большое количество работ, посвященных исследованию процессов в электромагнитных элементах (трансформаторы, дроссели) при наличии магнитных систем с воздушными зазорами при наличии выпучивания магнитного потока. Так, в [25] вводятся понятия относительного зазора и коэффициента фиктивного зазора, и при помощи специальных кривых для нормализованных магнитопроводов выбирается величина реального воздушного зазора. В [26] предлагается методика расчета увеличения магнитных потерь при наличии воздушных зазоров в магнитных системах. Дополнительные потери в области одного открытого зазора:

$$P_B = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left( 2 \cdot \sqrt{\frac{b}{\delta}} + 1 \right) \times \\ \times (f \cdot U_{Mm} \cdot b \cdot \mu)^2 \cdot \gamma \cdot \delta \cdot F_B, \quad (4)$$

где  $b$  — размер магнитопровода, соответствующий ширине ленты/пластины (в случае ленточного/пластинчатого сердечника), м;

$\delta$  — размер воздушного зазора, м;

$f$  — частота тока, Гц;

$U_{Mm}$  — амплитуда магнитного напряжения в зазоре, А;

$\gamma$  — удельная проводимость материала сердечника при заданной температуре его нагрева, См/м;

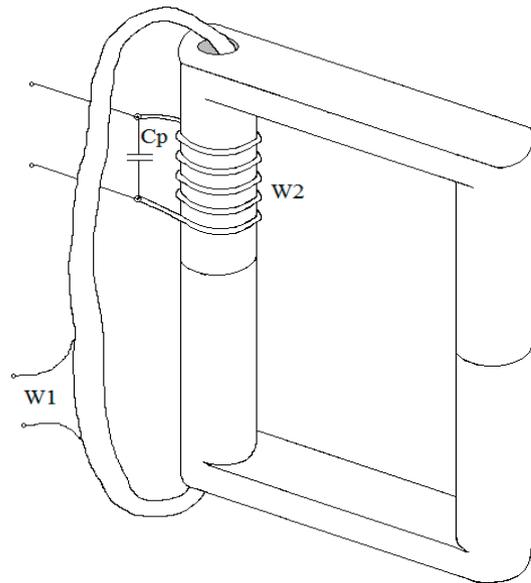
$F_B$  — функция геометрических размеров воздушного зазора [26].

В случае, если область зазора окружена обмоткой, вводится коэффициент экранирования  $k_G$  [26], тогда дополнительные потери от выпучивания магнитного потока:

$$P_B = k_G^2 \cdot P_B. \quad (5)$$

Существуют конструкции с интегрированными ортогональными магнит-

ными цепями (рисунок 1), в которых проблема выпучивания магнитного потока отсутствует. Предлагаемая в статье методика расчета предназначена для этого типа ПТ. При этом следует отметить, что при увеличении объема насыщаемой части будут увеличиваться потери в сердечнике и потребляемая мощность ПТ.



**Рисунок 1.** Параметрический трансформатор с интегрированными ортогональными магнитными цепями

**Figure 1.** Parametric transformer with integrated orthogonal magnetic circuits

Для разработки методики расчета нужно предварительно ориентировочно определить пределы изменения индуктивности, присущие разным конструкциям ПТ. Эти пределы зависят от объема насыщаемой части сердечника, его протяженности и разности магнитных сопротивлений в насыщенном и ненасыщенном состояниях.

Рассчитать параметры магнитной цепи ПТ можно, используя величины магнитной проницаемости насыщенного сердечника и размеры насыщаемой части:

$$L = \frac{w_p^2}{R_{\mu_1} + R_{\mu_2}} = \frac{w_p^2 \cdot \mu_0}{\frac{l_1}{\mu_1 \cdot S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 \cdot S_2}}, \quad (6)$$

где  $R_{\mu 1}, R_{\mu 2}$  — магнитные сопротивления ненасыщенного и насыщенного участков,  $\text{Гн}^{-1}$ ;

$w_p$  — число витков резонансной обмотки;

$l_1, l_2$  — длины участков магнитопровода, м;

$S_1, S_2$  — площади поперечного сечения участков магнитопровода,  $\text{м}^2$ .

Воздушные зазоры оказывают очень сильное влияние на характеристики магнитных элементов, поэтому при сборке ПТ их по возможности нужно исключить. Сборные сердечники следует соединять при помощи магнитопроводящего клея и надежно фиксировать. Если зазоры исключить невозможно, то их необходимо учитывать при расчете.

При выборе частоты возбуждения нужно исходить из того, что параметрическое воздействие должно действовать на каждом полупериоде колебаний, и если первичный ток синусоидальный, то частота возбуждения должна быть равна резонансной частоте  $f_b = f_p$ , а если ток импульсный, то частота следования импульсов должна быть в 2 раза больше резонансной частоты  $f_b = 2 \cdot f_p$ . Но частота возбуждения ограничена предельным значением индуктивного сопротивления  $X_{L1}$ , при котором первичный ток падает настолько, что насыщение уже невозможно, поэтому нужно учитывать граничную частоту для выбранной индуктивности. При импульсном возбуждении для ограничения постоянной составляющей индукции также нужно ограничивать длительность импульсов.

Для повышения точности расчета первичной цепи ПТ нужно учитывать влияние вторичного тока. Для этого следует рассматривать насыщение сердечника от суммарного вектора магнитодвижущей силы (МДС), который является результатом векторного сложения первичной и вторичной МДС в зоне насыщения и зависит от пространственного и времен-

ного углов между ними. Это влияние является ограничивающим фактором для параметрического возбуждения. Первичная и вторичная МДС при пространственном угле между ними в  $90^\circ$  действуют друг на друга взаиморазмагничивающе, а на магнитную проницаемость их действие согласовано. Поэтому от вторичного тока в некоторой степени зависит первичная индуктивность, и при точном расчете её нужно корректировать по магнитной проницаемости от суммарного вектора МДС.

Фазовый (временной) угол между первичным и вторичным токами зависит от добротности и отклонения частоты возбуждения от резонансной. Для проектируемых ПТ оптимальная фаза [2] между первичным и вторичным напряжением составляет  $50\text{--}70^\circ$  (при этом намагничивающим фактором является ток).

Точное определение искомого фазового угла между токами представляет собой определенные трудности и может быть произведено путем компьютерного моделирования. Разность фаз параметрической электродвижущей силы (ЭДС)  $E_{\text{пар}}$  и вторичного тока можно определить при схмотехническом моделировании вторичной цепи. В литературе известны попытки моделирования параметрических резонансных систем [4, 27], но они, по своей сути, являются упрощенными, и в них не учитываются многие параметры реальных ПТ.

### Методика расчета

#### параметрического трансформатора

Исходными данными при расчете ПТ является следующий набор параметров: первичное напряжение  $U_1$ , напряжение нагрузки  $U_n$ , ток нагрузки  $I_n$ , мощность нагрузки  $P_n$ , активное сопротивление нагрузки  $R_n$ , частота  $f_1$ , добротность резонансной цепи  $q$ .

При предварительном расчете примем, что МДС цепи управления и МДС

силовой цепи ПТ примерно равны друг другу (в соответствии с теорией магнитных усилителей). Для расчета также нужно задаться фазой между первичным и вторичным токами и определить диапазон изменения индуктивности в зависимости от векторной суммы первичной и вторичной МДС.

При расчете ПТ должен учитываться энергетический баланс для параметрической мощности возбуждения:

$$P_{\text{возб}} = E_{\text{пар}} \cdot I = I^2 \cdot \frac{dL}{dt} \geq P_{\text{н}}. \quad (7)$$

Далее приведем последовательность расчета ПТ по этапам.

1. Приблизительно задаются потери в сердечнике и резонансной обмотке (т.е. потери вторичной цепи)  $P_{\text{н2}}$ , и с их учетом вычисляется активная мощность вторичной цепи:

$$P_{\text{а}} = P_{\text{н}} + P_{\text{н2}}. \quad (8)$$

2. Рассчитывается эквивалентный активный ток:

$$I_{\text{эк}} = \frac{P_{\text{а}}}{U_{\text{н}}}. \quad (9)$$

3. Исходя из заданной добротности контура  $q$  (например, в устройствах индукционного нагрева добротность нагрузочного контура бывает в пределах 3–10) находится индуктивная реактивная мощность:

$$Q_L = q \cdot P_{\text{а}}. \quad (10)$$

При этом при резонансе индуктивная мощность равна емкостной  $Q_L = Q_C$

4. В соответствии с добротностью определяются реактивный ток и полный ток вторичной обмотки:

$$I_Q = \frac{Q_L}{U_{\text{н}}}; \quad (11)$$

$$I_2 = \sqrt{I_{\text{эк}}^2 + I_Q^2}. \quad (12)$$

5. Определяются параметрическая ЭДС и параметрическая мощность возбуждения:

$$E_{\text{пар}} = I_2 \cdot \frac{dL}{dt} = \frac{P_{\text{а}}}{I_2}; \quad (13)$$

$$P_{\text{возб}} = I_2 \cdot E_{\text{пар}}. \quad (14)$$

6. Определяются реактивное сопротивление и индуктивность резонансного контура по формуле:

$$X_L = \frac{Q_L}{I_2^2}; \quad (15)$$

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f}. \quad (16)$$

Далее рассчитывается внутреннее сопротивление обмотки:

$$r = \frac{P_{\text{н2}}}{I_2^2}. \quad (17)$$

8. По условию резонанса подбирается емкость  $C$  (поскольку точные параметры вторичной обмотки пока не известны):

$$2 \cdot \pi \cdot f = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}. \quad (18)$$

9. Далее рассчитывается колебательный контур и определяется напряжение при резонансе, которое должно примерно совпадать с заданным. Параллельный колебательный контур при резонансе в некоторой степени обладает свойством источника тока, поэтому напряжение будет зависеть от нагрузки. Вторичную цепь можно рассчитывать как для обычного трансформатора, применяя вместо трансформаторной ЭДС параметрическую ЭДС (если считать ее неизменной), а вместо изменяющейся индуктивности брать ее среднее значение, являющееся составной частью резонансной цепи. Это можно сделать в любой из программ схемотехнического моделирования.

В рассчитываемом ПТ высокоомную нагрузку можно подключать непосредственно к резонансной цепи (рисунок 2, а), а для подключения низкоомной нагрузки необходима дополнительная понижающая обмотка (рисунок 2, б). Если обмотки разделены на резонансную и нагрузочную:

— для начального расчета двухобмоточную вторичную цепь нужно приводить к однообмоточной;

— напряжение выходной обмотки задается меньше, чем напряжение резонансной обмотки;

— при расчете ПТ производится определение сечения и диаметра для каждой обмотки, включая выходную обмотку, рассчитываемую как трансформаторную.

10. Вычисляется габаритная мощность магнитной системы (или активной её части) в соответствии со значением полной мощности (т.к. в индуктивности даже при идеальном резонансе действуют обе мощности — и активная, и реактивная):

$$S \geq \sqrt{Q_L^2 + P_a^2}. \quad (19)$$

11. Определяются конструкция и параметры вторичной магнитной цепи, рассчитываются габариты вторичного сердечника как для обычного трансформатора. Методики расчета трансформаторов с различными конструкциями магнитной системы изложены в литературных источниках. Например, в [10, 11, 28] основательно рассмотрены вопросы оптимального проектирования электромагнитных устройств различной конструкции, в том числе при высокой мощности и высокой частоте. В [29, 30] методика расчета состоит в том, что для проектируемых трансформаторов сначала определяется произведение площадей окна и сечения сердечника, а затем сечение сердечника находится в соответствии с оптимизационными показателями. В

[31, 32] площадь поперечного сечения сердечника определяется исходя из заданного соотношения массы меди и стали.

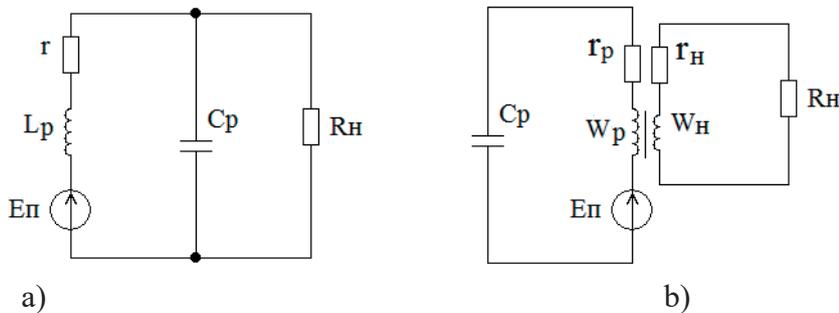
12. По рассчитанным значениям максимальной индуктивности и параметрам магнитной цепи определяется число витков вторичной обмотки:

$$W_2 = \sqrt{L \cdot R_{\mu}}. \quad (20)$$

13. Расчет пределов изменения индуктивности  $\Delta L$ . Непосредственное определение этой величины находится путем интегрирования выражения  $dL = \frac{E_{\text{нап}}}{I_2} dt$ .

Однако данный способ при аналитическом расчете связан с рядом трудностей. Для интегрирования необходимо задать пределы по времени и начальное значение индуктивности, которое соответствует максимальному. Уменьшение индуктивности начинается, когда сердечник входит в насыщение, а заканчивается когда суммарная МДС достигает максимума. Точно определить эти временные точки при аналитическом расчете сложно, но исходя из опыта расчетов ПТ ориентировочно можно принять временной интервал между этими точками как составляющий четверть периода колебаний ( $\approx 1/4 \cdot T$ ).

Так как для предварительного расчета ПТ нужно определить возможные пределы изменения индуктивности, это можно сделать, например, выбрав эффек-



**Рисунок 2.** Схема замещения параметрического трансформатора при подключении высокоомной нагрузки (а); при подключении низкоомной нагрузки (б)

**Figure 2.** Parametric transformer equivalent circuit when connecting a high-resistance load (a); when connecting a low-resistance load (b)

тивный диапазон изменения магнитной проницаемости по справочным данным на принятый магнитный материал. Тогда при проектировании после сравнения полученных значений  $L$  и  $\Delta L$  расчет при необходимости может быть скорректирован.

14. При необходимости уточняются габариты сердечника. Определяются потери в сердечнике, учитывая его насыщение.

15. По заданному току определяется сечение провода резонансной обмотки и рассчитывается ее активное сопротивление. Проверяется коэффициент заполнения окна, уточняются потери во вторичной цепи  $P_{\text{н2}}$  и при необходимости предыдущий расчет корректируется.

Первичная цепь может быть рассчитана как дроссель насыщения переменного или импульсного токов. В этом случае минимальная величина индуктивности дросселя соответствует максимальной индукции в сердечнике. Это может обеспечиваться при разном соотношении первичного и вторичного токов по амплитуде и фазе.

Можно рассмотреть три варианта:

а) режим соответствует «холостому ходу» первичной цепи или началу возбуждения (так как не учтено влияние вторичного тока);

б) МДС цепи возбуждения и МДС силовой цепи примерно равны. В этом случае может быть использовано для расчета индукции и других параметров среднеквадратичное значение напряженности:

$$H_{\text{в}} = \sqrt{H_1^2 + H_2^2}, \quad (21)$$

где  $H_1, H_2$  — напряженности магнитного поля первичной и вторичной магнитных цепей, А/м.

Если магнитные цепи примерно одинаковы, то для упрощенного расчета можно перейти к токам:

$$I_{\text{в}} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2}, \quad (22)$$

где  $I_1$  — ток первичной цепи, А.

Если принять  $I_1 = I_2$ , тогда можно считать, что  $I_{\text{в}} = 1,41 \cdot I_2$ . Это соотношение характерно для установившегося режима работы ПТ;

в) МДС цепи возбуждения меньше, чем МДС силовой цепи. Это возможно для высокодобротных резонансных цепей или при отключении нагрузки. Параметры вторичной цепи для этого режима могут быть определены на схемотехнической модели. При этом при отключении нагрузки должна быть уменьшена величина параметрической ЭДС, что возможно с помощью системы регулирования или системы защиты.

В связи с этим важным моментом является определение напряженности магнитных полей, создаваемых в ПТ, с учетом фазовых сдвигов. Одним из вариантов определения величин напряженностей, который можно использовать при компьютерном моделировании [33], является вычисление магнитных потоков, например на основе выражений:

$$\psi = \int U \cdot dt; \quad (23)$$

$$\Phi = \frac{\Psi}{w}, \quad (24)$$

где  $\psi$  — потокосцепление, Вб.

Затем величина напряженности определяется по кривой намагничивания выбранного материала магнитопровода.

16. Рассчитываются первичный сердечник (если он есть) или первичная магнитная цепь на основном сердечнике, но с ортогональным магнитным потоком; определяются габариты, магнитное сопротивление участков магнитопровода в насыщенном и ненасыщенном состоянии, а также индукция, необходимая для насыщения и МДС; определяются параметры первичной обмотки и необходимый ток.

17. Задается плотность тока, выбирается провод, проверяется коэффициент заполнения окна, вычисляются активные и реактивные параметры первичной

обмотки ПТ по стандартной методике для обычных трансформаторов.

18. Производится проверка рассчитанных параметров: по активным потерям и реактивным параметрам рассчитывается первичный ток ПТ при заданном напряжении и частоте. Полученный результат сверяется со значением по предыдущему пункту, и при необходимости производится корректировка числа витков первичной обмотки.

19. Для повышения точности расчет может быть повторен путем нескольких итераций на основании выходных результатов по данной методике. Кроме того, важно провести тепловой расчет ПТ выбранной конструкции с учетом потерь в сердечнике, т.к. при повышенной индукции эти потери могут быть значительными и существенно влиять на

нагрев устройства. Методики теплового расчета устройств, работающих в вынужденном тепловом режиме при наличии насыщения сердечника, представлены, например, в [10]. Для интенсификации отвода тепла целесообразно применение водяного охлаждения [34].

### Выводы

В статье представлена разработанная авторами методика расчета параметрических трансформаторов, которую можно использовать при расчете источников вторичного электропитания. Дальнейшее развитие методики предполагает:

- дополнение методики моделированием тепловых процессов в ПТ;
- разработку программного обеспечения для реализации данной методики в процессе компьютерного моделирования.

### Список источников

1. Розенблат М.А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. М.: Наука, 1966. 719 с.
2. Задерей Г.П., Заика П.Н. Многофункциональные трансформаторы в средствах вторичного электропитания. М.: Радио и связь, 1989. 176 с.
3. Парамонов М.И. О процессах в нелинейных реактивностях, провоцирующих возникновение и накопление энергии при параметрическом резонансе // *European Science*. 2014. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-protsessah-v-nelineynyh-reaktivnostyah-provotsiruyuschih-vozniknovenie-i-nakoplenie-energii-pri-parametricheskom-rezonanse> (дата обращения: 01.05.2023).
4. Lee Y.-K., Chechurin L.S. Conditions of Parametric Resonance in Periodically Time-Variant Systems with Distributed Parameters // *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2009. Vol. 131. Issue 3. P. 68–79.
5. Piacibello A., Ramella Ch., Camarchia V., Quaglia R. A Simple Method to Identify Parametric Oscillations in Power Amplifiers Using Harmonic Balance Solvers // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. March 2021. Vol. 31, Issue 3. P. 269–271.
6. Мандельштам Л.И., Папалекси Н.Д. О явлениях резонанса  $n$ -го рода // Л.И. Мандельштам. Полное собрание трудов; под ред. проф.

- С. М. Рытова. Л.: Изд-во акад. наук СССР, 1947. Т. 2. С. 13–62.
7. Мандельштам Л.И., Папалекси Н.Д. О возбуждении колебаний в электрической колебательной системе при помощи периодического изменения емкости // Л.И. Мандельштам. Полное собрание трудов; под ред. проф. С. М. Рытова. Л.: Изд-во акад. наук СССР, 1947. Т. 2. С. 63–69.
8. Мандельштам Л.И., Папалекси Н.Д. О параметрическом возбуждении электрических колебаний // Л.И. Мандельштам. Полное собрание трудов; под ред. проф. С. М. Рытова. Л.: Изд-во акад. наук СССР, 1947. Т. 2. С. 85–116.
9. Папалекси Н.Д. Параметрическое генерирование переменных токов // *Электричество*. 1938. № 11. С. 67–76.
10. Бальян Р.Х., Обрусник В.П. Оптимальное проектирование силовых высокочастотных ферромагнитных устройств. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1987. 168 с.
11. Обрусник В.П. Магнитные элементы электронных устройств: учебн. пособие. Томск: ТГУСУиР, 2012. 125 с.
12. Русин Ю.С., Гликман И.Я., Горский А.Н. Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры: справочник. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
13. Калужников Н.А. Об упрощенных расчетах магнитных усилителей с сердечниками из железо-никелевых сплавов // *Автоматика и телемеханика*. 1957. Т. 18, вып. 3. С. 262–266.

14. Roginskaya L., Gorbunov A., Mednov A., Gusakov D. Hybrid Magnetic Systems as a Way to Obtain Required Magnetic Properties // 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). 2021. doi: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657429.
15. Vakhnina V.V., Chernenko A.N., Pudovinnikov R.N. Computer-Assisted Modeling of Magnetic Fluxes of Power Transformer Affected by Quasi Direct Currents // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2021. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446288.
16. Stavinskii A., Koshkin D. Technical Solutions of Laminated Magnetic Cores of Transformers with Combination of Electrical Steel // 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). 2021. doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598810.
17. Reva I., Bialobrzheskyi O., Todorov O., Bezzub M. Three-Phase Core-Type Transformer Model Investigation Taking into Account Hysteresis Phenomena in Asymmetric Load Mode // 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2021. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570085.
18. Stavinskii A., Avdieieva E., Babenko D., Plakhtyr O., Sadovoy O., Stavinskii R. Comparison of Thermal Loads a Single-Phase Transformer With a Laminated Magnetic Core // 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). 2022.
19. Yablokov A., Filatova G., Gotovkina E., Sharygin D., Evdakov A. Development of Algorithm for Monitoring Saturation and Residual Magnetization of Current Transformer Magnetic Core // 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). 2022. doi: 10.1109/REEPE53907.2022.9731422.
20. Altayef E., Anayi F., Packianather M. Experimental Investigation on Impacts of Insulation Damage Fault between Laminations of Power Transformers // 2022 2nd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE). 2022. doi: 10.1109/ICACITE53722.2022.9823834
21. Bychkov A., Fedyai O., Pudovinnikov R. Magnetizing Power at One-Sided Saturation of Power Transformers with Armored Magnetic System // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2021. doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559599.
22. Stavinskiy R., Vakhonina L., Avdieieva E., Sadovoy O. Calculation of Losses in Steel and Improvement of a Three-Phase Transformer with a Twisted Spatial Magnetic Circuit // 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). 2021.
23. Albert D., Domenig L., Maletic D., Reinbacher-Kostinger A., Roppert K., Renner H. Comparing Two Topology Transformer Hysteresis Models with Power Transformer Measurements // 2022 23rd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG). 2022. doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598690.
24. Zhihua P., Yuqing S., Mingjian T., Jintian Y., Li L., Guohua H., Jie T.] Magnetic Field Simulation and No-Load Loss Calculation of Large Three-Phase Five-Column Disassembled Transformer // 2021 International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems (ICICAS). 2021. doi: 10.1109/ICICAS53977.2021.00102.
25. Белополюский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. 3-е изд. М.: ИД Альянс, 2008. 400 с.
26. Горский А.Н., Русин Ю.С., Иванов Н.Р., Сергеева Л.А. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания. М.: Радио и связь, 1988. 176 с.
27. Стыскин А.В., Уразбахтина Н.Г. Parametric Transformer Designs with Improved Technical Characteristics // 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). 2020. P. 1–6.
28. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. М.: Изд-во «Советское радио», 1971. 720 с.
29. Маклиман В. Проектирование трансформаторов и дросселей: справочник / пер. с англ. В.В. Попов. 3-е изд., пересм. и доп. М.: ДМК Пресс, 2016. 476 с.
30. Белополюский И.И. Электропитание радиоустройств. 2-е изд., перераб. М.: Изд-во «Энергия», 1965. 319 с.
31. Ермолин Н.П., Ваганов А.П. Расчет маломощных трансформаторов / под ред. Н.П. Ермолина. М.: Гос. энерг. издат., 1957. 144 с.
32. Сериков А.В. Расчет трансформаторов малой мощности: учебн. пособие. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. 72 с.
33. Рогинская Л.Э., Горбунов А.С. Расчет ферромагнитных модулей преобразовательных устройств [Электронный ресурс]: учебное пособие / Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ). Учебное электронное издание. Уфа: РИК УГАТУ, 2016.
34. Вологдин В.В. Трансформаторы для высокочастотного нагрева / под ред. А.А. Фогеля. 3-е изд., испр. и доп. М.: изд-во Машиностроение, 1965. 100 с.

## References

1. Rozenblat M.A. *Magnitnye elementy avtomatiki i vychislitel'noi tekhniki* [Magnetic Elements of Automation and Computer Technology]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 719 p. [in Russian].
2. Zaderei G.P., Zaika P.N. *Mnogofunktsional'nye transformatory v sredstvakh vtorichnogo elektropitaniya* [Multifunctional Transformers in Secondary Power Supplies]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989. 176 p. [in Russian].
3. Paramonov M.I. O protsessakh v nelineinykh reaktivnostyakh, provotsiruyushchikh vozniknovenie i nakoplenie energii pri parametricheskom rezonanse [On Processes in Nonlinear Reactivity that Provoke the Emergence and Accumulation of Energy at Parametric Resonance]. *European Science*, 2014, No. 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-protsessah-v-nelineinykh-reaktivnostyakh-provotsiruyushchih-vozniknovenie-i-nakoplenie-energii-pri-parametricheskom-rezonanse> (accessed 01.05.2023). [in Russian].
4. Lee Y.-K., Chechurin L.S. Conditions of Parametric Resonance in Periodically Time-Variant Systems with Distributed Parameters. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2009, Vol. 131, Issue 3, pp. 68–79.
5. Piacibello A., Ramella Ch., Camarchia V., Quaglia R. A Simple Method to Identify Parametric Oscillations in Power Amplifiers Using Harmonic Balance Solvers. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, March 2021, Vol. 31, Issue 3, pp. 269–271.
6. Mandel'shtam L.I., Papaleksi N.D. O yavleniyakh rezonansa n-go roda [On Resonance Phenomena of the nth Kind]. *L.I. Mandel'shtam. Polnoe sobranie trudov; pod red. prof. S. M. Rytova* [L.I. Mandelstam. Complete Collection of Works; ed. by prof. S.M. Rytov]. Leningrad, Izd-vo akad. nauk SSSR, 1947. Vol. 2, pp. 13–62. [in Russian].
7. Mandel'shtam L.I., Papaleksi N.D. O vzbuzhdenii kolebanii v elektricheskoi kolebatel'noi sisteme pri pomoshchi periodicheskogo izmeneniya emkosti [On the Excitation of Oscillations in an Electric Oscillatory System with the Help of a Periodic Change in Capacitance] *L.I. Mandel'shtam. Polnoe sobranie trudov; pod red. prof. S. M. Rytova* [L.I. Mandelstam. Complete Collection of Works; ed. by prof. S.M. Rytov]. Leningrad, Izd-vo akad. nauk SSSR, 1947. Vol. 2, pp. 63–69. [in Russian].
8. Mandel'shtam L.I., Papaleksi N.D. O parametricheskom vzbuzhdenii elektricheskikh kolebanii [On Parametric Excitation of Electrical Oscillations] *L.I. Mandel'shtam. Polnoe sobranie trudov; pod red. prof. S. M. Rytova* [L.I. Mandelstam. Complete Collection of Works; ed. by prof. S.M. Rytov]. Leningrad, Izd-vo akad. nauk SSSR, 1947. Vol. 2, pp. 85–116. [in Russian].
9. Papaleksi N.D. Parametricheskoe generirovanie peremennykh tokov [Parametric Generation of Alternating Currents]. *Elektrichestvo — Electricity*, 1938, No. 11, pp. 67–76. [in Russian].
10. Bal'yan R.Kh., Obrusnik V.P. *Optimal'noe proektirovanie silovykh vysokochastotnykh ferromagnitnykh ustroystv* [Optimal Design of Power High-Frequency Ferromagnetic Devices]. Tomsk, Izd-vo Tom. un-ta, 1987. 168 p. [in Russian].
11. Obrusnik V.P. *Magnitnye elementy elektronnykh ustroystv: uchebnoe posobie* [Magnetic Elements of Electronic Devices: Study Guide]. Tomsk, TGUSUIR, 2012. 125 p. [in Russian].
12. Rusin Yu.S., Glikman I.Ya., Gorskii A.N. *Elektromagnitnye elementy radioelektronnoi apparatury: spravochnik* [Electromagnetic Elements of Radio-electronic Equipment: a Handbook]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1991. 224 p. [in Russian].
13. Kaluzhnikov N.A. Ob uproshchennykh raschetakh magnitnykh usilitelei s serdechnikami iz zhelezo-nikelevykh splavov [On Simplified Calculations of Magnetic Amplifiers with Iron-Nickel Alloy Cores]. *Avtomatika i telemekhanika — Automation and Telemechanics*, 1957, Vol. 18, Issue 3, pp. 262–266. [in Russian].
14. Roginskaya L., Gorbunov A., Mednov A., Gusakov D. Hybrid Magnetic Systems as a Way to Obtain Required Magnetic Properties. *2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. 2021. doi: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657429.
15. Vakhnina V.V., Chernenko A.N., Pudovinnikov R.N. Computer-Assisted Modeling of Magnetic Fluxes of Power Transformer Affected by Quasi Direct Currents. *2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2021. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446288.
16. Stavinskii A., Koshkin D. Technical Solutions of Laminated Magnetic Cores of Transformers with Combination of Electrical Steel. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2021. doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598810.
17. Reva I., Bialobrzheskyi O., Todorov O., Bezzub M. Three-Phase Core-Type Transformer Model Investigation Taking into Account Hysteresis Phenomena in Asymmetric Load Mode. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570085.
18. Stavinskii A., Avdieieva E., Babenko D., Plakhtyr O., Sadovoy O., Stavinskii R. Comparison

of Thermal Loads a Single-Phase Transformer With a Laminated Magnetic Core. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. 2022.

19. Yablokov A., Filatova G., Gotovkina E., Sharygin D., Evdakov A. Development of Algorithm for Monitoring Saturation and Residual Magnetization of Current Transformer Magnetic Core. *2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. 2022. doi: 10.1109/REEPE53907.2022.9731422.

20. Altayef E., Anayi F., Packianather M. Experimental Investigation on Impacts of Insulation Damage Fault between Laminations of Power Transformers. *2022 2nd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)*. 2022. doi: 10.1109/ICACITE53722.2022.9823834

21. Bychkov A., Fedyai O., Pudovinnikov R. Magnetizing Power at One-Sided Saturation of Power Transformers with Armored Magnetic System. *2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 2021. doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559599.

22. Stavinskiy R., Vakhonina L., Avdieieva E., Sadovoy O. Calculation of Losses in Steel and Improvement of a Three-Phase Transformer with a Twisted Spatial Magnetic Circuit. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2021.

23. Albert D., Domenig L., Maletic D., Reinbacher-Kostinger A., Roppert K., Renner H. Comparing Two Topology Transformer Hysteresis Models with Power Transformer Measurements. *2022 23rd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG)*. 2022. doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598690.

24. Zhihua P., Yuqing S., Mingjian T., Jintian Y., Li L., Guohua H., Jie T. Magnetic Field Simulation and No-Load Loss Calculation of Large Three-Phase Five-Column Disassembled Transformer. *2021 International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems (ICICAS)*. 2021. doi: 10.1109/ICICAS53977.2021.00102.

25. Belopol'skii I.I., Karetnikova E.I., Pikalova L.G. *Raschet transformatorov i drosslei maloi moshchnosti* [Calculation of Transformers and

Chokes of Low Power]. 3-e izd. Moscow, ID Al'yans, 2008. 400 p.

26. Gorskii A.N., Rusin Yu.S., Ivanov N.R., Sergeeva L.A. *Raschet elektromagnitnykh elementov istochnikov vtorichnogo elektropitaniya* [Calculation of Electromagnetic Elements of Secondary Power Sources]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1988. 176 p.

27. Styskin A.V., Urazbakhtina N.G. Parametric Transformer Designs with Improved Technical Characteristics. *2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. 2020, pp. 1–6.

28. Bal'yan R.Kh. *Transformatory dlya radioelektroniki* [Transformers for Radio Electronics]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1971. 720 p. [in Russian].

29. Makliman V. *Proektirovanie transformatorov i drosslei: spravochnik* [Design of Transformers and Chokes. Reference Book]. 3-e izd., peresm. i dop. Moscow, DMK Press, 2016. 476 p. [in Russian].

30. Belopol'skii I.I. *Elektropitanie radioustroystv* [Power Supply of Radio Devices]. 2-e izd., pererab. Moscow, Energiya Publ., 1965. 319 p. [in Russian].

31. Ermolin N.P., Vaganov A.P. *Raschet malomoshchnykh transformatorov* [Calculation of Low-Power Transformers]. Moscow, Gos. energ. izdat., 1957. 144 p. [in Russian].

32. Serikov A.V. *Raschet transformatorov maloi moshchnosti: uchebnoe posobie* [Calculation of Low Power Transformers: a Tutorial]. Komsomol'sk-na-Amure, FGBOU VPO «KnAGTU», 2015. 72 p. [in Russian].

33. Roginskaya L.E., Gorbunov A.S. *Raschet ferromagnitnykh modulei preobrazovatel'nykh ustroystv: uchebnoe posobie* [Calculation of Ferromagnetic Modules of Converting Devices: Textbook] [Electronic Resource]. Ufimskii gosudarstvennyi aviatsionnyi tekhnicheskii universitet (UGATU). Uchebnoe elektronnoe izdanie. Ufa, RIK UGATU, 2016. [in Russian].

34. Vologdin V.V. *Transformatory dlya vysokochastotnogo nagreva* [Transformers for High-Frequency Heating]. 3-e izd., ispr. i dop. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965. 100 p. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 11.04.2023; одобрена после рецензирования 11.05.2023; принята к публикации 24.05.2023.

The article was submitted 11.04.2023; approved after reviewing 11.05.2023; accepted for publication 24.05.2023.

Научная статья

УДК 621.316.925.1

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-123-134

## ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

**Виталий Алексеевич Шабанов****Vitaly A. Shabanov**

кандидат технических наук,  
профессор кафедры электротехники и электрооборудования предприятий,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия

**Валерия Денисовна Степанова****Valeria D. Stepanova**

студент кафедры электротехники и электрооборудования предприятий,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия

### Актуальность

Для определения поврежденной фазы при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ), а также для целей релейной защиты и сигнализации замыканий на землю важно знать фазные напряжения и напряжение нулевой последовательности. Фазные напряжения используются для определения поврежденной фазы и определения места повреждения. Напряжение нулевой последовательности используется для выполнения неселективной сигнализации ОЗЗ и определения коэффициента полноты замыкания в адаптивных защитах от замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю. Однофазные замыкания в сетях 6–35 кВ происходят, как правило, через переходное сопротивление, величина которого может достигать 5–7 кОм и более. Переходное сопротивление в месте замыкания изменяет значения как тока нулевой последовательности, так и всех фазных напряжений и напряжения нулевой последовательности. Поэтому исследование режимов однофазного замыкания на землю и оценка влияния переходного сопротивления на фазные напряжения и напряжение нулевой последовательности при однофазных замыканиях на землю является актуальной задачей.

### Цель исследования

Цель исследования — разработать графоаналитические методы исследования режимов при ОЗЗ через переходное сопротивление в сетях с изолированной нейтралью.

### Ключевые слова

однофазное замыкание на землю, сеть с изолированной нейтралью, параметры режима, переходное сопротивление

### Методы исследования

Для исследования влияния переходного сопротивления на фазные напряжения используются графоаналитические методы. Построение графиков фазных напряжений непосредственно в функции переходного сопротивления производится только для конкретной электрической сети. В статье для выполнения анализа в обобщенном виде используются уравнения фазных напряжений в функции промежуточных переменных, которые зависят от значения переходного сопротивления, но не зависят от параметров электрической сети. В качестве промежуточных переменных используются коэффициент полноты замыкания, относительное переходное сопротивление, а также угол, на который вектор напряжения нулевой последовательности, взятый с обратным знаком, отстает от вектора предаварийного напряжения поврежденной фазы. Основное достоинство уравнений фазных напряжений и напряжения нулевой последовательности в функции промежуточных переменных заключается в том, что такие уравнения имеют одинаковый вид для любой электрической сети. При этом графики напряжений и наложенные на них графики других параметров режима ОЗЗ в относительных единицах могут использоваться в качестве номограмм и позволяют исследовать режимы ОЗЗ в широком диапазоне изменения переходных сопротивлений.

### Результаты

Получены уравнения для относительных значений фазных напряжений и напряжения нулевой последовательности в функции коэффициента полноты замыкания и относительных значений переходного сопротивления. Построены графики фазных напряжений и напряжения нулевой последовательности. С графиками напряжений совмещены графики изменения коэффициента полноты замыкания и относительного переходного сопротивления. Полученные уравнения и построенные графики носят универсальный характер, справедливы для любой электрической сети с изолированной нейтралью и могут использоваться в качестве номограмм для определения и анализа всех параметров режима ОЗЗ в относительных единицах. Приведены формулы и примеры перехода к именованным единицам.

**Для цитирования:** Шабанов В. А., Степанова В. Д. Графоаналитическое исследование режимов однофазного замыкания на землю // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 2. Т. 19. С. 123-134. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-123-134>.

Original article

## GRAPHOANALYTICAL STUDY OF SINGLE-PHASE EARTH FAULT MODES

### Relevance

To determine the damaged phase in single-phase earth faults (SPEF), as well as for the purposes of relay protection and signaling of earth faults, it is important to know the phase voltages and the zero sequence voltage. Phase voltages are used to determine the damaged phase and determine the location of the damage. The zero sequence voltage is used to perform non-selective signaling of the SPEF and to determine the completeness coefficient of the fault in adaptive earth fault protections in networks with low earth fault currents. Single-phase short circuits in 6–35 kV networks occur as a rule through a fault resistance, the value of which can reach 5–7 kOhm or more. The fault resistance at the point of damage changes

### Keywords

single-phase earth faults, network with an isolated neutral, mode parameters, fault resistance

the values of both the zero sequence current and all phase voltages, and the zero sequence voltage. Therefore, the study of single-phase earth fault modes and the assessment of the effect of fault resistance on phase voltages and voltage.

#### **Aim of research**

The main aim of the research is to develop graphoanalytic methods for studying modes for SPEF through fault resistance in networks with an isolated neutral.

#### **Research methods**

Graphoanalytic methods are used to study the effect of fault resistance on phase voltages. The construction of phase voltage graphs directly in the fault resistance function may perform only for a specific electrical network. In the article, to perform the analysis in a generalized form, the equations of phase voltages are used as a function of intermediate variables, which depend on the value of the fault resistance, but do not depend on the parameters of the electrical network. As intermediate variables, the damage completeness coefficient, the relative fault resistance, as well as the angle by which the vector of zero sequence voltage, taken with the reverse sign, lags behind the vector of the pre-emergency voltage of the damaged phase. The main advantage of the phase voltage equations in the function of intermediate variables is that such equations have the same form for any electrical network. At the same time, voltage graphs and superimposed graphs of other parameters of the SPEF mode in relative units can be used as nomograms and allow us to study SPEF modes in a wide range of changes in fault resistances.

#### **Results**

Equations are obtained for the relative values of phase voltages and zero sequence voltages as a function of the damage completeness coefficient and the relative values of the fault resistance. Graphs of phase voltages and zero sequence voltages are constructed. Graphs of changes in the damage completeness coefficient and relative fault resistance are combined with voltage graphs. The obtained equations and constructed graphs are universal in nature, valid for any electrical network with an isolated neutral and can be used as nomograms for determining and analyzing all parameters of the SPEF mode in relative units. Formulas and examples of transition to named units are given.

**For citation:** Shabanov V.A., Stepanova V.D. Grafoanaliticheskoe issledovanie rezhimov odnofaznogo замыкания на землю [Graphoanalytical Study of Single-Phase Earth Fault Modes]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 2, Vol. 19, pp. 123-134. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-123-134>.

#### **Введение**

Для определения поврежденной фазы при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ), для целей релейной защиты и сигнализации замыканий на землю важно знать фазные напряжения, а также напряжение и токи нулевой последовательности (НП). Фазные напряжения используются для определения поврежденной фазы [1–3] и определения места повреждения, как при однофазных коротких

замыканиях [4–7], так и при ОЗЗ в сетях напряжением 6–35 кВ [8–10]. Напряжение НП используется для выполнения неселективной сигнализации ОЗЗ и в защитах от замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю [11–14]. Однофазные замыкания в сетях 6–35 кВ происходят как правило через переходное сопротивление, величина которого может достигать 5–7 кОм и более [15]. Переходное сопротивление в

месте замыкания изменяет значения как тока НП, так и всех фазных напряжений и напряжения НП. Поэтому исследование режимов однофазного замыкания на землю и оценка влияния переходного сопротивления на фазные напряжения и напряжение нулевой последовательности при однофазных замыканиях на землю являются актуальной задачей.

Известны методы исследования влияния переходного сопротивления на фазные напряжения путем построения векторных диаграмм и графиков изменения фазных напряжений [16, 17]. Построение графиков фазных напряжений непосредственно в функции переходного сопротивления требует задания параметров электрической сети. Поэтому такие анализы производятся только для конкретной электрической сети, что не позволяет выполнить анализ в общем виде. Для выполнения анализа в обобщенном виде используются уравнения фазных напряжений в функции промежуточной переменной, которая зависит от значения переходного сопротивления, но не зависит от параметров электрической сети. В [17] в качестве промежуточной переменной предложено использовать угол  $\alpha$ , на который вектор напряжения НП, взятый с обратным знаком, отстает от вектора предаварийного напряжения поврежденной фазы. Однако использование уравнений и графических зависимостей фазных напряжений от угла  $\alpha$  не охватывает все параметры режима ОЗЗ и не позволяет установить численные значения переходного сопротивления и тока НП. Цель статьи — разработать графоаналитические методы исследования режимов при ОЗЗ через переходное сопротивление в сетях с изолированной нейтралью.

### Метод исследований

Для исследования влияния переходных сопротивлений на фазные напряжения в статье используются уравнения

фазных напряжений в функции коэффициента полноты замыкания и переходного сопротивления в месте повреждения. Основой метода исследования являются уравнения для фазных напряжений и напряжений НП в функции угла  $\alpha$  между векторами напряжений НП и фазного напряжения поврежденной фазы.

При однофазном замыкании на землю через переходное сопротивление  $R_{\Pi}$  выражение для эквивалентного сопротивления комплексной схемы замещения электрической сети относительно места замыкания имеет вид [18]:

$$Z_{\text{Э}} = \frac{1}{j \omega C_{\text{ОЗ}}} + 3R_{\Pi} = \frac{1 + j Y_C \cdot 3R_{\Pi}}{j Y_C}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{ОЗ}}$  — суммарная емкость сети относительно земли;

$R_{\Pi}$  — переходное сопротивление в месте повреждения;

$Y_C$  — емкостная проводимость сети:

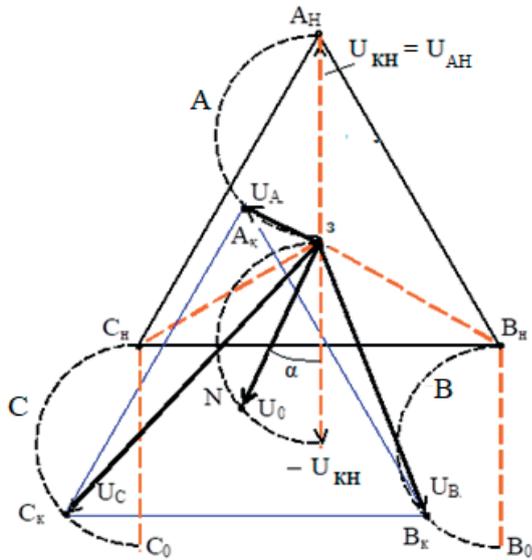
$$Y_C = j \omega C_{\text{ОЗ}}. \quad (2)$$

Обозначим через  $U_{\text{КН}}$  напряжение в месте замыкания в предаварийном режиме. Тогда для напряжения НП  $U_0$  в месте замыкания будет справедливо уравнение:

$$U_0 = \frac{U_{\text{КН}}}{1 + j Y_C \cdot 3R_{\Pi}}. \quad (3)$$

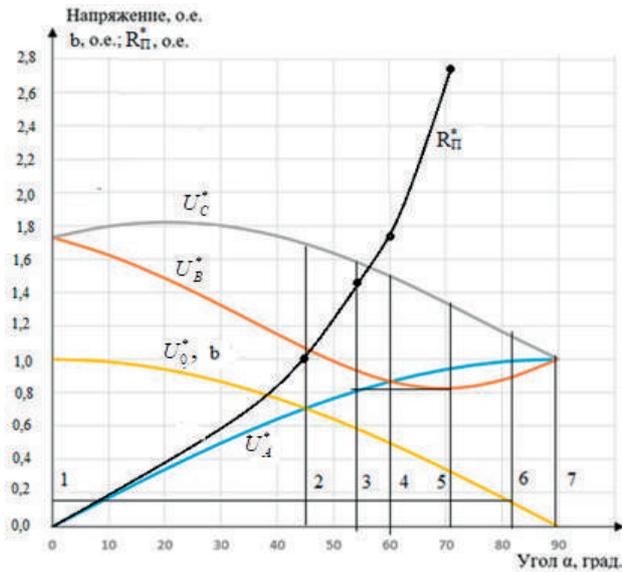
При замыкании на землю фазы А напряжение  $U_{\text{КН}}$  равно напряжению фазы А в предаварийном режиме  $U_{\text{АН}}$  (рисунок 1).

При изменении переходного сопротивления конец вектора напряжения НП  $U_0$  по (3) будет перемещаться по дуге окружности N, а концы векторов фазных напряжений  $U_A$ ,  $U_B$  и  $U_C$  в месте повреждения будут перемещаться по дугам А, В и С. Тогда при замыкании на землю фазы А для фазных напряжений из векторной диаграммы (рисунок 1) могут быть получены следующие уравнения в функции угла  $\alpha$  [19]:



**Рисунок 1.** Векторная диаграмма напряжений

**Figure 1.** Vector voltage diagram



**Рисунок 2.** Графики изменения напряжений в функции угла  $\alpha$

**Figure 2.** Graphs of voltage changes in the angle function  $\alpha$

$$U_A = U_\phi \cdot \sin \alpha;$$

$$U_B = U_\phi \cdot \sqrt{1 + 2 \cos^2 \alpha - \sqrt{3} \sin \alpha \cos \alpha};$$

$$U_C = U_\phi \cdot \sqrt{1 + 2 \cos^2 \alpha + \sqrt{3} \sin \alpha \cos \alpha};$$

$$U_0 = U_\phi \cdot \cos \alpha,$$

где  $U_\phi$  — модуль напряжения фаз А, В и С в предаварийном режиме.

Угол  $\alpha$  зависит от переходного сопротивления. При увеличении переходного сопротивления от нуля до бесконечно большого значения угол  $\alpha$  изменяется от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Графики изменения фазных напряжений  $U_A^*$ ,  $U_B^*$ ,  $U_C^*$  и  $U_0^*$  в относительных единицах в функции угла  $\alpha$ , построенные по выражениям (4), приведены на рисунке 2.

Выделим несколько режимов ОЗЗ, в которых либо пересекаются графики напряжений, либо напряжения принимают экстремальные значения. Режимы обозначены на рисунке 2 вертикальными линиями и пронумерованы от 1 до 7. Режим 1 — режим ОЗЗ при металлическом замыкании ( $R_{\Pi} = 0$ ), когда  $\alpha = 0$  и  $U_A = 0$ . При увеличении переходного

сопротивления растет угол  $\alpha$ . При этом напряжение поврежденной фазы  $U_A$  непрерывно увеличивается и при угле  $\alpha = 45^\circ$  кривая напряжения  $U_A$  пересекается с кривой напряжения НП  $U_0$  (режим 2 на рисунке 2). В режиме 2  $U_A^* = U_0^* = 0,71$ . При  $\alpha = 60^\circ$  кривая напряжения  $U_A$  пересекается с кривой напряжения неповрежденной фазы  $U_B$  (режим 4). Режим ОЗЗ при  $\alpha = 60^\circ$  является граничным режимом, отделяющим режимы, в которых напряжение поврежденной фазы «А» является наименьшим, от режимов, где наименьшим является напряжение неповрежденной фазы «В». В режиме 4  $U_A^* = U_B^* = 0,87$ . В режиме 5 напряжение неповрежденной фазы «В» принимает минимально возможное значение  $U_B^* = 0,82$ . При  $\alpha = 55,5^\circ$  напряжение поврежденной фазы «А»  $U_A^* = 0,82$  и равно минимально возможному значению напряжения  $U_B$  неповрежденной фазы В (режим 3). В режиме 6 напряжение нулевой последовательности  $U_0$  принято равным напряжению срабатывания неселективной сигнализации. Режим 7 — режим без замыкания.

Значения напряжений в режимах 1–7 сведены в таблицу 1.

Значения напряжений и углов  $\alpha$  в рассмотренных режимах не зависят от схемы и параметров электрической сети. Это делает результаты анализа напряжений в функции угла  $\alpha$  применимыми к любой сети.

**Анализ влияния коэффициента полноты замыкания и относительного переходного сопротивления на фазные напряжения**

При анализе адаптивных защит от ОЗЗ коэффициентом полноты замыкания называют отношение напряжения НП к номинальному фазному напряжению [10, 11]. Для целей исследования влияния переходного сопротивления на фазные напряжения удобнее определять коэффициент полноты замыкания как отношение напряжения НП при замыкании через переходное сопротивление к напряжению НП при металлическом замыкании  $U_{0.MET}$ . При  $R_{\Pi} = 0$  в соответствии с (3)  $U_{0.MET} = U_{KH}$ . Так как модуль  $U_{KH}$  равен модулю фазного напряжения  $U_{\phi}$  поврежденной фазы в месте повреждения, то для коэффициента полноты замыкания можно записать:

$$b = \frac{U_0}{U_{0.MET}} = \frac{U_0}{U_{KH}} = \frac{U_0}{U_{\phi}}. \quad (5)$$

**Таблица 1.** Параметры режимов ОЗЗ

**Table 1.** Parameters of the SPEF modes

№ и основная характеристика режима	Угол $\alpha$ , °	Значения напряжений, о.е.			
		$U_A$	$U_B$	$U_C$	$U_0$
1 Металлическое замыкание	0	0	1,73	1,73	1,0
2 $U_0 = U_A$	45	0,71	1,06	1,69	0,71
3 $U_A = U_{B.МИН}$	55,5	0,82	0,91	1,57	0,57
4 $U_A = U_B$ (граничный)	60	0,87	0,87	1,5	0,5
5 $U_B = U_{B.МИН}$	69,5	0,94	0,82	1,35	0,35
6 Пуск по $U_0$	81,5	0,99	0,89	1,14	0,15
7 Нормальный	90	1,0	1,0	1,0	0

Из (3) и (5) для коэффициента полноты замыкания получаем:

$$b = \frac{1}{\sqrt{1 + (Y \cdot 3R_{\Pi})^2}}. \quad (6)$$

Коэффициент полноты замыкания можно представить и через отношение токов НП  $I_0$  и  $I_{0.MET}$ :

$$b = I_0^* = \frac{I_0}{I_{0.MET}}, \quad (7)$$

где  $I_{0.MET}$  — ток НП при металлическом замыкании:

$$I_{0.MET} = U_{KH} \cdot Y_C. \quad (8)$$

При этом для тока НП получаем:

$$I_0 = b \cdot I_{0.MET}. \quad (9)$$

Коэффициент полноты замыкания позволяет оценить коэффициент чувствительности защит, реагирующих на действующее значение тока НП при ОЗЗ, а также используется в адаптивных защитах от замыканий на землю для регулирования тока срабатывания [12, 13]. Ток НП, подводимый к защите, линейно зависит от коэффициента полноты замыкания на землю. Это обеспечивает сравнительно простую адаптацию чувствительности защиты к ОЗЗ через переходное сопротивление.

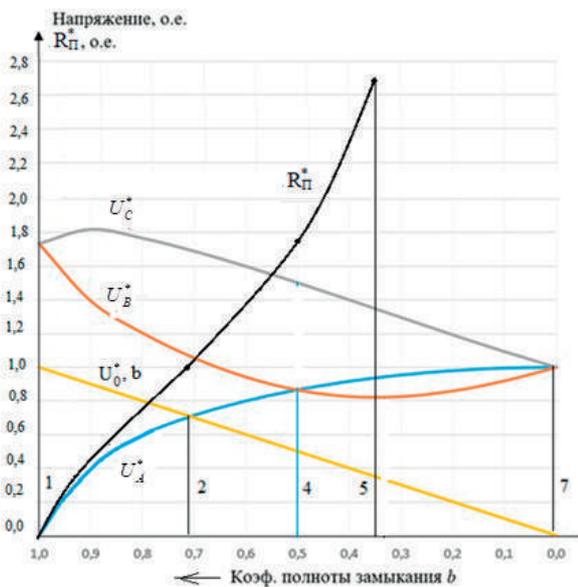
Из уравнения (4) для  $U_0$  и уравнения (5) следует, что

$$\cos \alpha = b. \quad (10)$$

Подставляя  $\cos \alpha$  из (10) в (4), получаем следующие уравнения для напряжений в функции коэффициента полноты замыкания  $b$ :

$$\begin{aligned}
 U_A &= U_\phi \cdot \sqrt{1-b^2}; \\
 U_B &= U_\phi \cdot \sqrt{1+2b^2 - \sqrt{3b}\sqrt{1-b^2}}; \\
 U_C &= U_\phi \cdot \sqrt{1+2b^2 + \sqrt{3b}\sqrt{1-b^2}}; \\
 U_0 &= U_\phi \cdot b.
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Графики изменения напряжений в функции коэффициента полноты замыкания по уравнениям (11) приведены на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Графики изменения напряжений в функции коэффициента полноты замыкания

**Figure 3.** Graphs of voltage changes in the function of the damage completeness coefficient

Так как напряжения на рисунке 3 отложены в относительных единицах, то график для напряжения  $U_0$  совпадает с графиком для тока НП  $I_0$  в относительных единицах и с графиком изменения коэффициента полноты замыкания  $b$ .

Обозначим отношение утроенного переходного сопротивления  $3R_{П}$  к емкостному сопротивлению сети  $X_C$  через  $R_{П}^*$

— переходное сопротивление в относительных единицах:

$$R_{П}^* = \frac{3R_{П}}{X_C} = 3R_{П}Y_C. \tag{12}$$

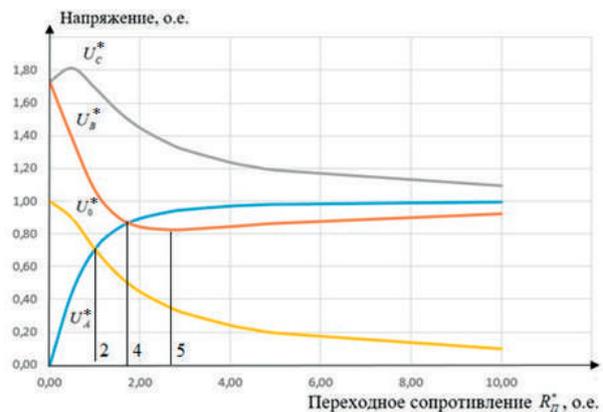
Тогда из выражения (6)

$$b = \frac{1}{\sqrt{1+R_{П}^{*2}}} \tag{13}$$

и выражения (11) для исследуемых напряжений принимают вид:

$$\begin{aligned}
 U_A &= U_\phi \cdot \frac{R_{П}^*}{\sqrt{1+R_{П}^{*2}}}; \\
 U_B &= U_\phi \cdot \sqrt{1 + \frac{2 - \sqrt{3}R_{П}^*}{1+R_{П}^{*2}}}; \\
 U_C &= U_\phi \cdot \sqrt{1 + \frac{2 + \sqrt{3}R_{П}^*}{1+R_{П}^{*2}}}; \\
 U_0 &= U_\phi \cdot \frac{1}{\sqrt{1+R_{П}^{*2}}}.
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Графики изменения напряжений в функции относительного переходного сопротивления по (14) приведены на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Графики напряжений в функции относительного переходного сопротивления

**Figure 4.** Voltage graphs in the function of relative fault resistance

Из выражений (14) для напряжений  $U_A$  и  $U_0$  следует, что относительное переходное сопротивление равно отношению напряжения поврежденной фазы к напряжению НП:

$$R_{\Pi}^* = \frac{U_A}{U_0}. \quad (15)$$

По этому выражению удобно вычислять значения относительного переходного сопротивления. По формулам (5), (8), и (15) при известных значениях напряжений поврежденной фазы и НП могут быть найдены значения  $b$ ,  $\alpha$  и  $R_{\Pi}^*$  для любого режима ОЗЗ. Напряжения неповрежденных фаз определяются по выражениям (4), (11) или (14).

Таким образом, напряжения поврежденной фазы и НП позволяют определить параметры режима:  $\alpha$ ,  $b$  и  $R_{\Pi}^*$  в относительных единицах. Напряжения неповрежденных фаз определяются по выражениям (4), (11) или (14). Для режимов 1–7 результаты расчетных значений параметров режимов в относительных единицах приведены в таблице 2.

По результатам расчетов (таблица 2) построен график  $R_{\Pi}^* = f(\alpha)$  (рисунок 2) и график  $R_{\Pi}^* = f(b)$  (рисунок 3). При этом на рисунках 2, 3 и 4 представлены все параметры режима ОЗЗ: фазные напряжения, напряжение НП, коэффициент полноты замыкания  $b$ , равный относительному значению напряжения НП, относительное значение тока НП  $I_0^*$ , равное значению  $b$ , и относительное переходное сопротивление  $R_{\Pi}^*$ . Фазные напряжения, напряжение НП, относительное значение тока НП и параметры

$\alpha$ ,  $b$ ,  $R_{\Pi}^*$  дают полную характеристику режима ОЗЗ.

Все перечисленные параметры режима ОЗЗ можно определить либо по графикам на рисунке 2 в функции угла  $\alpha$ , либо по графикам на рисунке 3 в функции  $b$ , либо по графикам на рисунке 4 в функции относительного сопротивления  $R_{\Pi}^*$ . Графики на рисунках 2–4, а, следовательно, и все параметры режима ОЗЗ, в относительных единицах найденные по графикам, носят универсальный характер, справедливы для любой электрической сети с изолированной нейтралью и поэтому могут использоваться в качестве номограмм для определения и анализа всех параметров режима ОЗЗ в относительных единицах.

Для оценки токов НП и переходных сопротивлений в именованных единицах необходимо задать параметры электрической сети. Достаточно задать емкостную проводимость электрической сети  $Y_C$  или емкостное сопротивление  $X_C$ . При этом ток НП  $I_0$  в именованных единицах определяется по выражениям (8) и (9), а переходное сопротивление (Ом) определяется по выражению:

$$R_{\Pi} = \frac{R_{\Pi}^* X_C}{3}. \quad (16)$$

Для сети 10 кВ при емкостном сопротивлении  $X_C = 1,74$  кОм и относительных значениях параметров (таблица 2) рас-

**Таблица 2.** Параметры режимов 1–7 в относительных единицах

**Table 2.** Parameters of modes 1–7 in relative units

№ режима и значения напряжений $U_A$ и $U_0$	Параметры режима				
	$\alpha$	$b$	$R_{\Pi}^*$	$U_0^*$	$I_0^*$
1 $U_0 = U_{\Phi}$ Металлическое ОЗЗ	0	1,0	0	1,0	1,0
2 $U_0 = U_A$	45	0,71	1,0	0,71	0,71
3 $U_A = U_{\text{В.МИН}}$	55,5	0,57	1,46	0,57	0,57
4 $U_A = U_B$ (граничный)	60	0,5	1,73	0,5	0,5
5 $U_A = U_{\text{В.МИН}}$	69,5	0,35	2,68	0,35	0,35
6 Пуск по $U_0^* = 0,15$	81,5	0,15	6,69	0,15	0,15
7 Нормальный режим	90	—	—	—	—

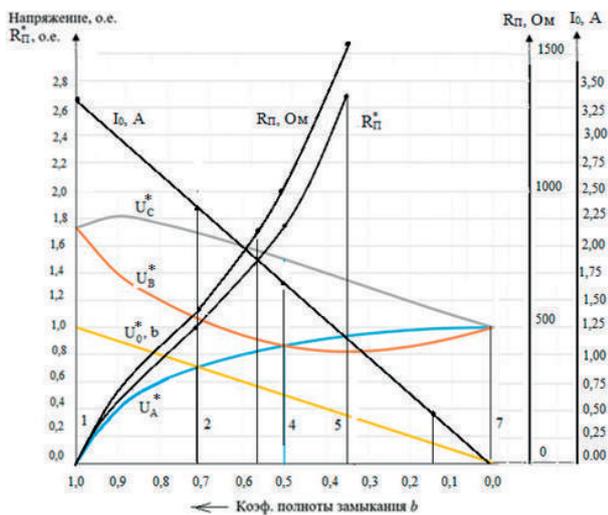
**Таблица 3.** Параметры режимов ОЗЗ при  $U = 10$  кВ и  $X_C = 1,74$  кОм

**Table 3.** Parameters of SFEF modes at  $U = 10$  kV and  $X_C = 1.74$  kOhm

№ режима и значения напряжений $U_A$ и $U_0$	Параметры режима				
	$\alpha, ^\circ$	$b, \text{о.е.}$	$R_{\Pi}^*, \text{о.е.}$	$R_{\Pi}, \text{Ом}$	$I_0, \text{А}$
1 $U_0 = U_{\Phi}$ . Металлическое ОЗЗ	0	1,0	0	0	3,32
2 $U_0 = U_A$	45	0,71	1,0	574	2,36
3 $U_A = U_{\text{В.МИН}}$	55,5	0,57	1,46	853	1,89
4 $U_A = U_B$ (граничный)	60	0,5	1,73	1009	1,66
5 $U_A = U_{\text{В.МИН}}$	69,5	0,35	2,68	1549	1,16
6 Пуск по $U_0^* = 0,15$	81,5	0,15	6,69	3898	0,50
7 Нормальный режим	90	—	—	—	—

четы  $R_{\Pi}$  и  $I_0$  для режимов 1–7 приведены в таблице 3.

По результатам расчетов значений  $R_{\Pi}$  и  $I_0$  на рисунке 2 в функции  $\alpha$  или на рисунке 3 в функции коэффициента  $b$ , или на рисунке 4 в функции  $R_{\Pi}^*$  могут быть построены графики для  $R_{\Pi}$  и  $I_0$ . В функции параметра  $R_{\Pi}^*$ , равного отношению напряжений  $U_A$  и  $U_0$ , такие графики приведены на рисунке 5.



**Рисунок 5.** Графики параметров режима ОЗЗ при  $U = 10$  кВ и  $X_C = 1,74$  кОм

**Figure 5.** Parameters of the SFEF modes at  $U = 10$  kV and  $X_C = 1.74$  kOhm

На рисунке 5 представлены все параметры режима ОЗЗ как в относительных единицах (фазные напряжения, напряже-

ние НП, параметры  $b, R_{\Pi}^*$  и  $I_0^*$ ), справедливые для любой электрической сети, так и в именованных единицах ( $R_{\Pi}$  и  $I_0$ ) для сети с заданным значением емкостной проводимости.

**Выводы**

Получены уравнения для относительных значений фазных напряжений и напряжения нулевой последовательности в функции коэффициента полноты замыкания и относительных значений переходного сопротивления. Построены графики фазных напряжений и напряжения нулевой последовательности, которые могут быть совмещены с графиками относительного переходного сопротивления. Полученные уравнения и построенные графики носят универсальный характер, справедливы для любой электрической сети с изолированной нейтралью и могут использоваться в качестве номограмм для определения и анализа всех параметров режима ОЗЗ в относительных единицах.

Приведены результаты анализа для нескольких режимов ОЗЗ, выполнены расчеты параметров в относительных единицах, а также переходного сопротивления и тока нулевой последовательности в именованных единицах.

### Список источников

1. Щуцкий В.И., Жидков В.О., Ильин Ю.Н. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1988. 152 с.
2. Гуревич В.И. Некоторые технические аспекты проблемы защиты от замыканий на землю распределительных сетей среднего напряжения // Промышленная энергетика. 2001. № 1. С. 34–37.
3. Сорокин А.В., Шабанов В.А. Алгоритм определения поврежденной фазы при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. № 2, Т. 18. С. 52–62.
4. Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E. Fault Location on Power Networks. London: Springer, 2010. ISBN: 978-1-84882-885-8.
5. Brahma S.M. New Fault Location Scheme for a Two-Terminal Transmission Line Using Synchronized Phasor Measurements // Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. May 2006. P. 853–857. doi: 10.1109/TDC.2006.1668609.
6. Majid Dashtdar, Masoud Dashtda. Fault Location in Distribution Network Based on Phasor Measurement Units (PMU) // The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty. 2019, Vol 19(2), pp. 38–43. doi: 10.1515/sbeef-2019-0019.
7. Али Халеги, Махмуд Укати Садег, Махди Газизаде Ахсаи. Real Fault Location in a Distribution Network Using Smart Feeder Meter Data // IJECE . 2018. No. 8(5) . P. 2709–2720. doi: 10.11591/ijece.v8i5.pp2709-2720.
8. Шабанов В.А., Сорокин А.В. Алгоритмы дистанционного определения расстояния до места однофазного замыкания с использованием тока нулевой последовательности в качестве опорного // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. № 1, Т. 17. С. 33–43. EDN: RSKXOJ.
9. Киржацких Е.Р., Козлов В.К., Гиниатуллин Р.А. Моделирование однофазного замыкания в распределительных сетях 10 кВ с изолированной нейтралью в программе MATLAB // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2018. № 4(94). С. 18–23. EDN: YWZBKP.
10. Козлов В.К., Киржацких Е.Р., Гиниатуллин Р.А. Исследование влияния переходного сопротивления на определение места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью // Вестник Чувашского университета. 2019. № 1. С. 39–46. EDN: ZACAVN.
11. Куликов А.Л., Вуколов В.Ю., Шарыгин М.В., Бездушный Д.И., Темирбеков Ж. Алгоритм определения места повреждения линии электропередачи с ответвлениями // Вестник НГИЭИ. 2017. № 9 (76). С. 29–38. EDN: ZJTXDF.
12. Сапунков М.Л., Пеленев Д.Н., Мухаметшин Р.И. Устройство адаптивной токовой защиты электрических сетей от однофазных замыканий на землю // Вестник ПНИПУ. Геология, нефтегазовое и горное дело. 2013. № 6. С. 128–133/ EDN: SGLWPH.
13. Шуин В.А., Воробьева Е.А., Добрягина О.А., Шадрикова Т.Ю. Принципы выполнения адаптивной токовой защиты от замыканий на землю в некомпенсированных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2018. № 3. С. 28–37. EDN: RTDOXJ.
14. Horowitz S.H., Phadke A.G., Thorp J.S. Adaptive Transmission System Relaying // IEEE Trans. on Power Delivery. 1988. Vol. 3, No. 4. P. 1436–1458.
15. Шалин А.И. Замыкания на землю в линиях электропередачи 6–35 кВ. Особенности возникновения и приборы защиты // Новости электротехники. 2005. № 1 (31). С. 73–75.
16. Кучумов Л., Кузнецов А., Червочков Д. Переходное сопротивление в месте ОЗЗ. Влияние на режимные параметры и рабочие сигналы защит от ОЗЗ // Новости ЭлектроТехники. 2017. № 4 (106). С. 24–27.
17. Шабанов В.А., Сорокин А.В. Признаки поврежденной фазы при однофазном замыкании на землю // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. № 3–4, Т. 18. С. 89–100.
18. Шабанов В.А. Симметричные составляющие токов и напряжений при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью. Уфа: Изд-во УНИ, 2002. 60 с.
19. Шабанов В.А., Степанова В.Д. Исследование селективности избирателя поврежденной фазы, основанного на использовании модулей фазных напряжений // Электропривод, электро-технологии и электрооборудование предприятий: сб. научн. тр. VII Междунар. научн.-техн. конф. Уфа: Изд-во ООО «Научно-инженерный центр «Энергодиагностика», 2023.

### References

1. Shutskiy V.I., Zhidkov V.O., Il'in Yu.N. *Zashchitnoe shuntirovanie odnofaznykh povrezhdenii elektroustanovok* [Protective Shunting of Single-Phase Faults in Electrical Installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 152 p. [in Russian].

2. Gurevich V.I. Nekotorye tekhnicheskie aspekty problemy zashchity ot zamykaniy na zemlyu raspredelitel'nykh setei srednego napryazheniya [Some Technical Aspects of the Problem of Protection against Earth Faults in Distribution Networks of Medium Voltage]. *Promyshlennaya energetika — Industrial Power Engineering*, 2001, No. 1, pp. 34–37. [in Russian].
3. Sorokin A.V., Shabanov V.A. Algoritm opredeleniya povrezhdennoi fazy pri odnofaznom zamykaniy na zemlyu v setyakh s izolirovannoi neutral'yu [Algorithm for Determining the Damaged Phase during a Single-Phase Earth Fault in Networks with an Isolated Neutral]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2022, No. 2, Vol. 18, pp. 52–62. [in Russian].
4. Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E. *Fault Location on Power Networks*. London, Springer Publ., 2010. ISBN: 978-1-84882-885-8.
5. Brahma S.M. New Fault Location Scheme for a Two-Terminal Transmission Line Using Synchronized Phasor Measurements. *Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, May 2006, pp. 853–857. doi: 10.1109/TDC.2006.1668609.
6. Majid Dashtdar, Masoud Dashtda. Fault Location in Distribution Network Based on Phasor Measurement Units (PMU). *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*, 2019, Vol 19(2), pp. 38–43. doi: 10.1515/sbeef-2019-0019.
7. Ali Khalegi, Makhmud Ukati Sadeg, Makhdi Gazizade Akhsai. Real Fault Location in a Distribution Network Using Smart Feeder Meter Data. *IJECE*, 2018, No. 8(5), pp. 2709–2720. doi: 10.11591/ijece.v8i5.pp2709-2720.
8. Shabanov V.A., Sorokin A.V. Algoritmy distantsionnogo opredeleniya rasstoyaniya do mesta odnofaznogo zamykaniya s ispol'zovaniem toka nulevoi posledovatel'nosti v kachestve opornogo toka [Algorithms for Remote Determination of the Distance to the Single-Phase Fault Location Using the Zero-Sequence Current as the Reference Current]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2021, No. 1, Vol. 17, pp. 33–43. EDN: RSKXOJ. [in Russian].
9. Kirzhatskikh E.R., Kozlov V.K., Giniatul'lin R.A. Modelirovanie odnofaznogo zamykaniya v raspredelitel'nykh setyakh 10 kV s izolirovannoi neutral'yu v programme MATLAB [Simulation of a Single-Phase Short Circuit in Distribution Networks 10 kV with an Isolated Neutral in the MATLAB Program]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva — Bulletin of the Kazan State Technical University named for A.N. Tupolev*, 2018, No. 4(94), pp. 18–23. EDN: YWZBKP. [in Russian].
10. Kozlov V.K., Kirzhatskikh E.R., Giniatul'lin R.A. Issledovanie vliyaniya perekhodnogo soprotivleniya na opredelenie mesta odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v raspredelitel'nykh setyakh s izolirovannoi neutral'yu [Transient Resistance Influence on One-Phase Ground Fault Location in Distribution Grids with Isolated Neutral Wire]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta — Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2019, No. 1, pp. 39–46. EDN: ZACAVN. [in Russian].
11. Kulikov A.L., Vukolov V.Yu., Sharygin M.V., Bezdushnyi D.I., Temirbekov Zh. Algoritm opredeleniya mesta povrezhdeniya linii elektroperedachi s otvetvleniyami [Fault Location Algorithm for a Power Line with Taps]. *Vestnik NGIEI — Vestnik NGIEI*, 2017, No. 9 (76), pp. 29–38. EDN: ZJTXDF. [in Russian].
12. Sapunkov M.L., Pelenev D.N., Mukhametshin R.I. Ustroystvo adaptivnoi tokovoi zashchity elektricheskikh setei ot odnofaznykh zamykaniy na zemlyu [Device for Adaptive Current Protection of Electrical Networks Against Single-Phase Ground Faults]. *Vestnik PNIPU. Geologiya, neftegazovoe i gornoe delo — Bulletin of PNRPU. Geology, Oil and Gas and Mining*, 2013, No. 6, pp. 128–133. EDN: SGLWPH. [in Russian].
13. Shuin V.A., Vorob'eva E.A., Dobryagina O.A., Shadrikova T.Yu. Printsipy vypolneniya adaptivnoi tokovoi zashchity ot zamykaniy na zemlyu v nekompensirovannykh kabel'nykh setyakh napryazheniem 6–10 kV [Principles of Implementation of Adaptive Current Protection against Earth Faults in Uncompensated Cable Networks with a Voltage of 6–10 kV]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta — Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*, 2018, No. 3, pp. 28–37. EDN: RTDOXJ. [in Russian].
14. Horowitz S.H., Phadke A.G., Thorp J.S. Adaptive Transmission System Relaying. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1988, Vol. 3, No. 4, pp. 1436–1458.
15. Shalin A.I. Zamykaniya na zemlyu v liniyakh elektroperedachi 6–35 kV. Osobennosti vozniknoveniya i pribory zashchity [Earth Faults in Power Lines 6–35 kV. Peculiarities of Occurrence and Protection Devices]. *Novosti elektrotekhniki — News of Electrical Engineering*, 2005, No. 1 (31), pp. 73–75. [in Russian].
16. Kuchumov L., Kuznetsov A., Chervochnikov D. Perekhodnoe soprotivlenie v meste OZZ. Vliyanie na rezhimnye parametry i rabochie signaly zashchit ot OZZ [Transitional Resistance at the Site of SPZ. Influence on Regime Parameters and Operating Signals of Protection Against SPE]. *Novosti Elektro-*

*Tekhniki — News of Electrotechnics*, 2017, No. 4 (106), pp. 24–27. [in Russian].

17. Shabanov V.A., Sorokin A.V. Priznaki povrezhdennoi fazy pri odnofaznom замыkanii na zemlyu [Features of a Faulty Phase at Single Phase-to-Ground Faults]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2022, No. 3–4, Vol. 18, pp. 89–100. [in Russian].

18. Shabanov V.A. *Simmetrichnye sostavlyayushchie tokov i napryazhenii pri odnofaznykh замыkaniyakh na zemlyu v setyakh s izolirovannoi neutral'yu* [Symmetrical Components of Currents and Voltages at Single-Phase Earth Faults in Networks with Isolated Neutral]. Ufa, Izd-vo UNI, 2002. 60 p. [in Russian].

19. Shabanov V.A., Stepanova V.D. Issledovanie selektivnosti izbiratelya povrezhdennoi fazy, osnovannogo na ispol'zovanii modulei faznykh napryazhenii [Investigation of the Selectivity of a Damaged Phase Selector Based on the Use of Phase Voltage Modules]. *Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhneskoi konferentsii «Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovanie predpriyatii»* [Collection of Scientific Papers of the VII International Scientific and Technical Conference «Electric Drive, Electrical Technologies and Electrical Equipment of Enterprises»]. Ufa, Izd-vo OOO «Nauchno-inzhenernyi tsentr «Energodiagnostika», 2023. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 28.04.2023; одобрена после рецензирования 11.05.2023; принята к публикации 23.05.2023.*

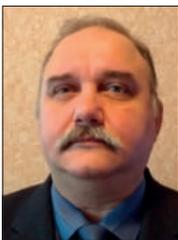
*The article was submitted 28.04.2023; approved after reviewing 11.05.2023; accepted for publication 23.05.2023.*

Научная статья

УДК 62.529, 519.67

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-135-144

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОПОРНОГО ОБЕЗВЕШИВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И НАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Александр Сергеевич Беляев**Aleksandr S. Belyaev**ассистент Отделения автоматизации и робототехники,  
Томский политехнический университет,  
Томск, Россия**Александр Александрович Филипас**Aleksandr A. Filipas**кандидат технических наук, доцент,  
заведующий Отделением автоматизации и робототехники,  
Томский политехнический университет,  
Томск, Россия*

### Актуальность

Устройства и аппараты, функционирующие в условиях космоса, имеют высокую стоимость ввиду экстремальных условий эксплуатации и высоких требований, предъявляемых к надежности, что, как следствие, приводит к необходимости тщательного тестирования работоспособности всех элементов, узлов и подсистем перед отправкой в космос в наземных условиях. Среди множества элементов космических аппаратов сложность представляет процесс тестирования трансформируемых частей, раскрывающихся в космосе из транспортировочного положения в рабочее, однако в земных условиях, ввиду влияния веса элементов на систему раскрытия и шарниры, проведение тестирования без вспомогательных систем не гарантирует достоверности проведенных экспериментов. Соответственно, одним из решений является применение систем обезвешивания, компенсирующих вес трансформируемых частей космических аппаратов.

### Цель исследования

Анализ работы системы опорного обезвешивания на базе мобильной робототехнической платформы на голономных колесах с применением математического и натурального моделирования.

### Методы исследования

Математическое и натурное моделирование. Для сравнения переходных процессов использованы основные показатели качества, применяемые в теории автоматического управления.

### Ключевые слова

система обезвешивания,  
система управления,  
вектор силы, трос,  
моделирование

**Результаты**

Получены переходные характеристики по углам отклонения и углу прогиба работы модели и натурального стенда систем обезвешивания. Качественный и количественный анализ подтверждает работоспособность метода и близость полученных натуральных результатов с модельными. Точность обезвешивания полученная на натурном стенде составляет 97,7 %.

**Для цитирования:** Беляев А. С., Филипас А. А. Исследование работы системы опорного обезвешивания на примере математического и натурального моделирования // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2023. № 2. Т. 19. С. 135-144. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-135-144>.

Original article

## RESEARCH OF THE OPERATION OF THE SUPPORT WEIGHTENING SYSTEM ON THE EXAMPLE OF MATHEMATICAL AND NATURAL MODELING

**Relevance**

Devices and apparatuses operating in outer space have a high cost due to extreme operating conditions and high requirements for reliability, which, as a result, leads to the need for thorough testing of the performance of all elements, assemblies and subsystems before being sent into space underground conditions. Among the many elements of spacecraft, the process of testing transformable parts that deploy in space from the transport position to the working position is difficult, however, under terrestrial conditions, due to the influence of the weight of the elements on the deployment system and hinges, testing without auxiliary systems does not guarantee reliability of the conducted experiments. Accordingly, one of the solutions is the use of weightless systems that compensate for the weight of the transformable parts of spacecraft.

**Aim of research**

Analysis of the operation of a support weightless system based on a mobile robotic platform on holonomic wheels using mathematical and natural modeling.

**Research methods**

Mathematical and natural modeling. To compare transient processes, the main quality indicators used in the theory of automatic control are used.

**Results**

The transient responses are obtained for the angles of deflection and the angle of deflection of the operation of the model and the full-scale stand of weightless systems. Qualitative and quantitative analysis confirms the efficiency of the method and the closeness of the obtained natural results with the model ones. The weighing accuracy obtained on a full-scale stand is 97.7 %.

**Keywords**

weight compensation system, control system, force vector, cable, modeling

**For citation:** Belyaev A.S., Filipas A.A. Issledovaniye raboty sistemy opornogo obezveshivaniya na primere matematicheskogo i natsurnogo modelirovaniya [Research of the Operation of the Support Weightening System on the Example of Mathematical and Natural Modeling]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 2, Vol. 19, pp. 135-144. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-135-144>.

## Введение

Устройства и аппараты, функционирующие в условиях космоса, имеют высокую стоимость ввиду экстремальных условий эксплуатации и высоких требований, предъявляемых к надежности. Факт повышенных требований к устройствам и аппаратам и потенциальных сложностей в процессе эксплуатации, как следствие, приводит к необходимости тщательного тестирования работоспособности всех элементов, узлов и подсистем перед отправкой в космос в наземных условиях. Среди множества элементов космических аппаратов (КА) сложность представляет процесс тестирования трансформируемых частей, раскрывающихся в космосе из транспортировочного положения в рабочее, поскольку в процессе их разработки необходимо определить параметры шарниров и пускового устройства, например, пружины, двигателя или пиропатрона, необходимого для раскрытия. Однако в земных условиях, ввиду влияния веса элементов на систему раскрытия и шарниры, проведение тестирования без вспомогательных систем не гарантирует достоверности проведенных экспериментов. Соответственно, одним из решений является применение систем обезвешивания, компенсирующих вес трансформируемых частей космических аппаратов. Данные системы по принципу исполнения можно разделить на 2 ключевых типа, а именно: тросовые [1–8] и опорные [1, 9–13].

Применение пассивной тросовой системы [4] для обезвешивания манипулятора позволило получить точность обезвешивания в 80 %

В работе [5] авторы реализуют пассивно-активную систему обезвешивания тросового типа с использованием системы управления на основе нечеткой логики, точность такой системы соста-

вила 95,9 %, что выше, чем у пассивных систем.

Активные тросовые системы имеют дополнительные приводы для самостоятельного перемещения по рельсам [3, 6, 7], что позволяет компенсировать эффект присоединенных масс и тем самым повысить точность обезвешивания и достоверность эксперимента. Однако недостатком подобных систем является сложное конструкторское исполнение и большие массогабаритные характеристики, что приводит к трудностям в настройке механической части, корректирующих устройств управления, а также отладке системы управления. В работе [3] авторам на имитационной модели удалось добиться точности позиционирования в 99 % и ошибки компенсации веса в 0,5 %. Кроме того, используют системы на основе нескольких тросов [6, 7], достоинством которых является отсутствие больших перемещаемых масс в системе обезвешивания.

Применение опорных систем обезвешивания является более предпочтительным вариантом по сравнению с тросовыми вывесками элементов космических аппаратов по причине того, что оснащение стенда более компактно и более удобно в эксплуатации, так как все подготовительные операции проводятся в более комфортных условиях для испытателей. В работах [8–12] авторы используют для обезвешивания опоры на воздушной подушке, позволяющие осуществлять перемещение обезвешиваемого элемента по специальной ровной поверхности без трения. Одной из наиболее интересных разработок с применением этого подхода является конструкция, описанная в [11], где система обезвешивания реализована с 6-ю степенями свободы, то есть 3-мя вращательными и 3-мя поступательными. Вращательные степени свободы реализо-

ваны при помощи специального 3-степенного воздушного подшипника, а вертикальная поступательная степень свободы — за счет управляемого подъемного механизма. В [1, 12] представлен широкий обзор работ по применению систем обезвешивания на основе воздушных подшипников, различной конструкции и применительно к разным типам обезвешиваемых объектов. Авторы подчеркивают широкую применимость данного подхода среди различных передовых коллективов и университетов мира, а в качестве преимуществ приводят низкую стоимость и простоту наладки данных систем. Среди недостатков можно выделить «эффект присоединенных масс» и наличие дополнительных пневматических систем, необходимых для функционирования. Снижение «эффекта присоединенных масс» при использовании транспортных тележек с опорами для обезвешивания испытуемых изделий достигается при оборудовании этих тележек следящими системами, которые бы обеспечивали их автоматическое перемещение по опорной поверхности вслед за горизонтальными перемещениями обезвешиваемого изделия и тем самым фактически превращения их в мобильные роботы. Кроме того, такие системы могут решить задачу обезвешивания вертикально раскрываемых элементов космических аппаратов.

### **Структура системы обезвешивания**

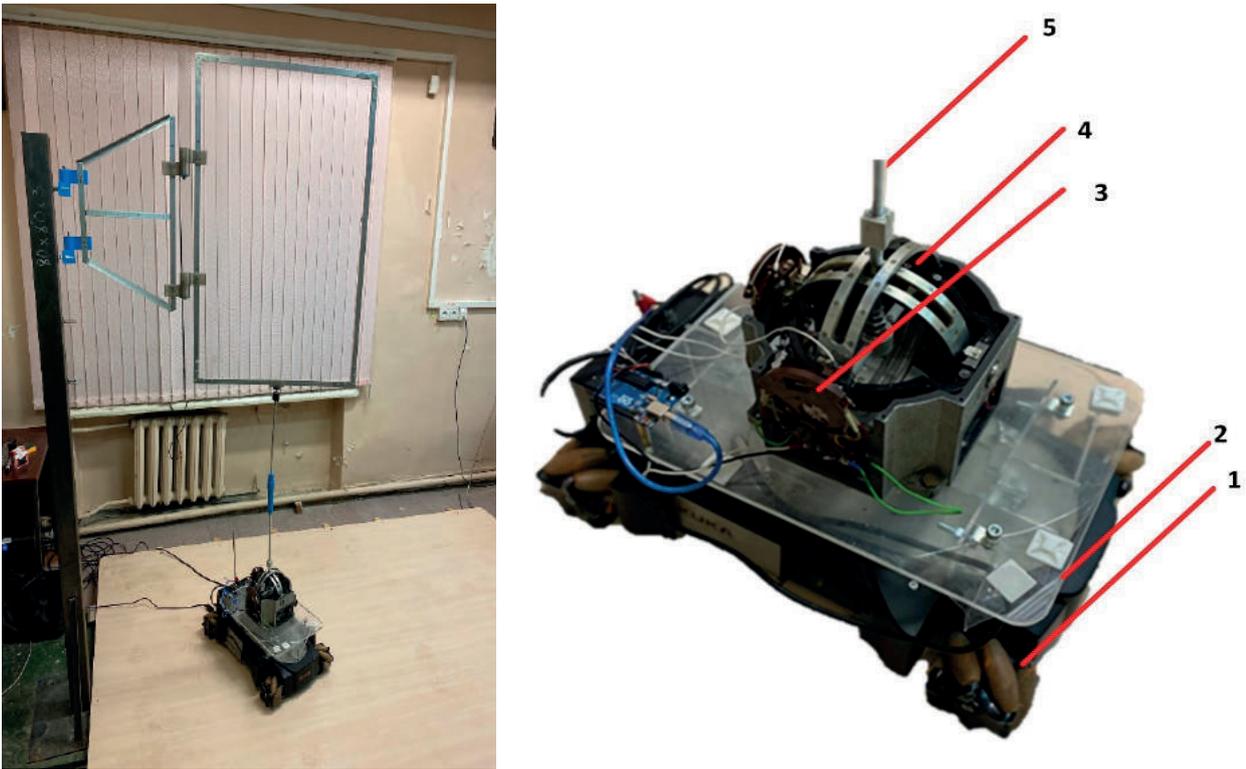
Разрабатываемая опорная система обезвешивания должна быть полностью активной, то есть данная система должна иметь возможность самостоятельно перемещаться в пространстве и компенсировать вес солнечной панели.

Для обеспечения самостоятельного передвижения система опорного обезвешивания (внешний вид приведен на рисунке 1, *a*) будет состоять из мобильной платформы 1 на Mecanum колесах 2

с электродвигателями и устройства обезвешивания, состоящего из опорной стойки 5 со встроенным линейным электродвигателем, закрепленной к мобильной платформе через 2-степенной шарнир 4 с встроенными в него датчиками углов поворота 3. С другой стороны, опорная стойка соединяется с солнечной панелью. Поскольку для системы обезвешивания важна возможность быстрого перемещения в любом направлении, мобильная платформа содержит Mecanum колеса.

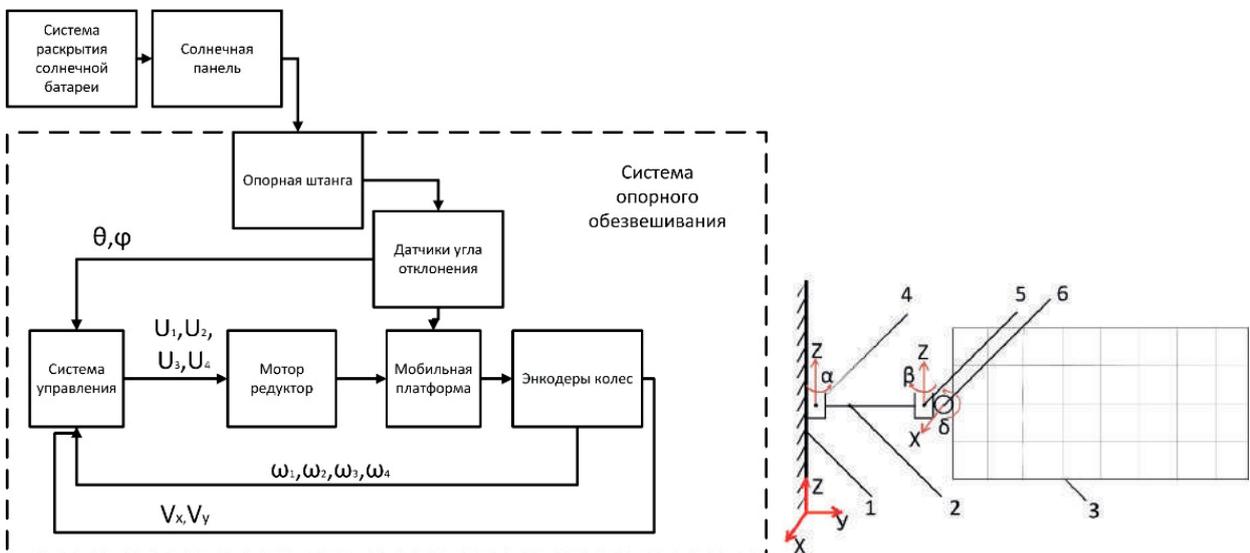
Применение мобильной платформы с 4-мя подобными колесами позволяет осуществлять движение в любом направлении без поворота, за счет осуществления процесса перекачивания робота по данным роликам. Колеса этого типа не являются единственным вариантом реализации платформы с возможностью всенаправленного движения. Подобный функционал можно реализовать и при помощи поворотных колес, колес Omni-типа или платформы в виде шара.

Принцип работы системы состоит из 2-х этапов: подготовки к эксперименту и проведение эксперимента. Во время первого этапа исследователь должен закрепить верхний конец опорной стойки системы обезвешивания к обезвешиваемому элементу. После включения системы обезвешивания она в автоматическом режиме корректирует свое положение под обезвешиваемым элементом и компенсирует его вес. После этого начинается этап проведения эксперимента, в ходе которого происходит процесс раскрытия обезвешиваемого элемента, а система обезвешивания должна определять изменение его положения и перемещаться вслед за ним. Данная функция реализуется по информации с датчиков углов поворота опорной стойки и последующего управления электроприводами мобильной платформы. Структурная схема системы обезвешивания приведена на рисунке 2.



**Рисунок 1.** Внешний вид лабораторно-исследовательского стенда (a); внешний вид системы активного опорного обезвешивания на платформе Kuka Youbot (b)

**Figure 1.** Appearance of the laboratory research stan(a); appearance of the active support weighing system on the Kuka Youbot platform (b)



**Рисунок 2.** Структурная схема системы обезвешивания с обезвешиваемым элементом (a); схематичное изображение кинематики объекта обезвешивания — односекционной панели (b)

**Figure 2.** Structural diagram of a weightless system with a weightless element (a); schematic representation of the kinematics of the weighing object — a single-section panel (b)

Поскольку в большинстве типов космических аппаратов для энергоснабжения используются солнечные батареи, то в качестве обезвешиваемого объекта в

данной работе была выбрана односекционная солнечная батарея, состоящая из балки 2 и солнечной панели 3 (рисунок 2, b).

Вращение солнечной панели и балки в плоскости движения осуществляется при помощи шарниров 4 (со степенью вращения вокруг оси  $Z$ , угол  $\alpha$ ) и 5 (со степенью вращения вокруг оси  $Z$ , угол  $\beta$ ). Для подтверждения эффекта компенсации веса введена дополнительная степень вращения вокруг оси  $X$  (шарнир  $\delta$ ), показывающая прогиб солнечной панели, угол  $\delta$ , под действием ошибки обезвешивания. Угол ее отклонения в дальнейшем будем называть углом прогиба и обозначать  $\delta$ . В процессе работы опорная система обезвешивания должна компенсировать вес солнечной панели, что позволит приблизить значение угла прогиба к 0.

### Математическая модель системы опорного обезвешивания

Для исследования системы обезвешивания как исполнительного устройства и синтеза системы управления предложено математическое описание ее динамики [13], полученное с использованием уравнения Лагранжа 2-го рода, в следующем виде:

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta}\cos\theta - ml\dot{\theta}^2\sin\theta = F_x; \\ (M+m)\ddot{y} - ml\ddot{\theta}\sin\theta\sin\varphi + ml\dot{\theta}\cos\theta\cos\varphi - \\ - ml(\dot{\theta}^2 + \dot{\varphi}^2)\cos\theta\sin\varphi - 2ml\dot{\theta}\dot{\varphi}\sin\theta\cos\varphi = F_y; \\ ml^2\ddot{\theta} + ml\ddot{x}\cos\theta - ml\dot{x}\sin\theta\sin\varphi + \\ + ml^2\dot{\varphi}^2\cos\theta\sin\theta - mgl\sin\theta\cos\varphi = 0; \\ ml^2\ddot{\varphi}\cos^2\theta + ml\dot{y}\cos\theta\cos\varphi - \\ - 2ml^2\dot{\theta}\dot{\varphi}\cos\theta\sin\theta - mgl\cos\theta\sin\varphi = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $\theta$  — угол отклонения опорной стойки относительно плоскости  $ZoY$ , °;

$\varphi$  — угол поворота опорной стойки в плоскости  $ZoY$ , нулевое положение отсчитывается по оси  $X$ , °;

$M$  — масса мобильной платформы, кг;

$m$  — масса обезвешиваемого элемента, кг;

$l$  — длина опорной стойки соответственно, м;

$x$  — координаты центра мобильной платформы по оси  $X$ , м;

$y$  — координаты центра мобильной платформы по  $Y$ , м;

$F_A$  — суммарная сила, действующая на мобильную платформу вдоль оси  $X$ , Н;

$F_y$  — суммарная сила, действующая на мобильную платформу вдоль оси  $Y$ , Н;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Дополнительной особенностью математической модели является учёт влияния всенаправленных колёс в движителях мобильной платформы. Это обстоятельство потребовало пересчета скоростей вращения колёс в скорости движения вдоль осей мобильной платформы, а также перевода моментов вращения колёс в силы движения платформы вдоль осей  $X$  и  $Y$  на основе решения прямой и обратной задач кинематики. С учетом приближенных математических моделей электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением при общеизвестных допущениях описание опорной системы обезвешивания в пространстве состояний в развернутой форме имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}; \\ \mathbf{y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\mathbf{x} = [v_x; \theta; \dot{\theta}; v_y; \varphi; \dot{\varphi}; i_1; i_2; i_3; i_4]^T$ ;

$$\mathbf{u} = [u_1; u_2; u_3; u_4]^T,$$

$u_i$  — напряжение на  $i$ -том электродвигателе, В;

$C_e$  — электрическая постоянная двигателя,  $\frac{\text{В}}{\text{об/мин}}$ ;

$i_j$  — ток  $j$ -того двигателя, А;

$r$  — сопротивление двигателя, Ом;

$L$  — индуктивность обмотки двигателя, Гц;

$R$  — радиус колеса мобильной платформы, м;

$k_{red}$  — передаточное число редуктора;

$k$  — конструктивный коэффициент двигателя,  $\frac{\text{Н}}{\text{м} \cdot \text{А}}$ .

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-mg}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & K1 & K1 & K1 & K1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(m+M)g}{M \cdot l} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-K1}{l} & \frac{-K1}{l} & \frac{-K1}{l} & \frac{-K1}{l} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-mg}{M} & 0 & -K1 & K1 & K1 & -K1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(m+M)g}{M \cdot l} & 0 & \frac{K1}{l} & \frac{-K1}{l} & \frac{-K1}{l} & \frac{K1}{l} \\ -K2 & 0 & 0 & K2 & 0 & 0 & \frac{-r}{L} & 0 & 0 & 0 \\ -K2 & 0 & 0 & -K2 & 0 & 0 & 0 & \frac{-r}{L} & 0 & 0 \\ -K2 & 0 & 0 & -K2 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-r}{L} & 0 \\ -K2 & 0 & 0 & K2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-r}{L} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$K1 = \frac{k_{red} \cdot k}{M \cdot R}, K2 = \frac{-C_e}{L \cdot R \cdot k_{red}}.$$

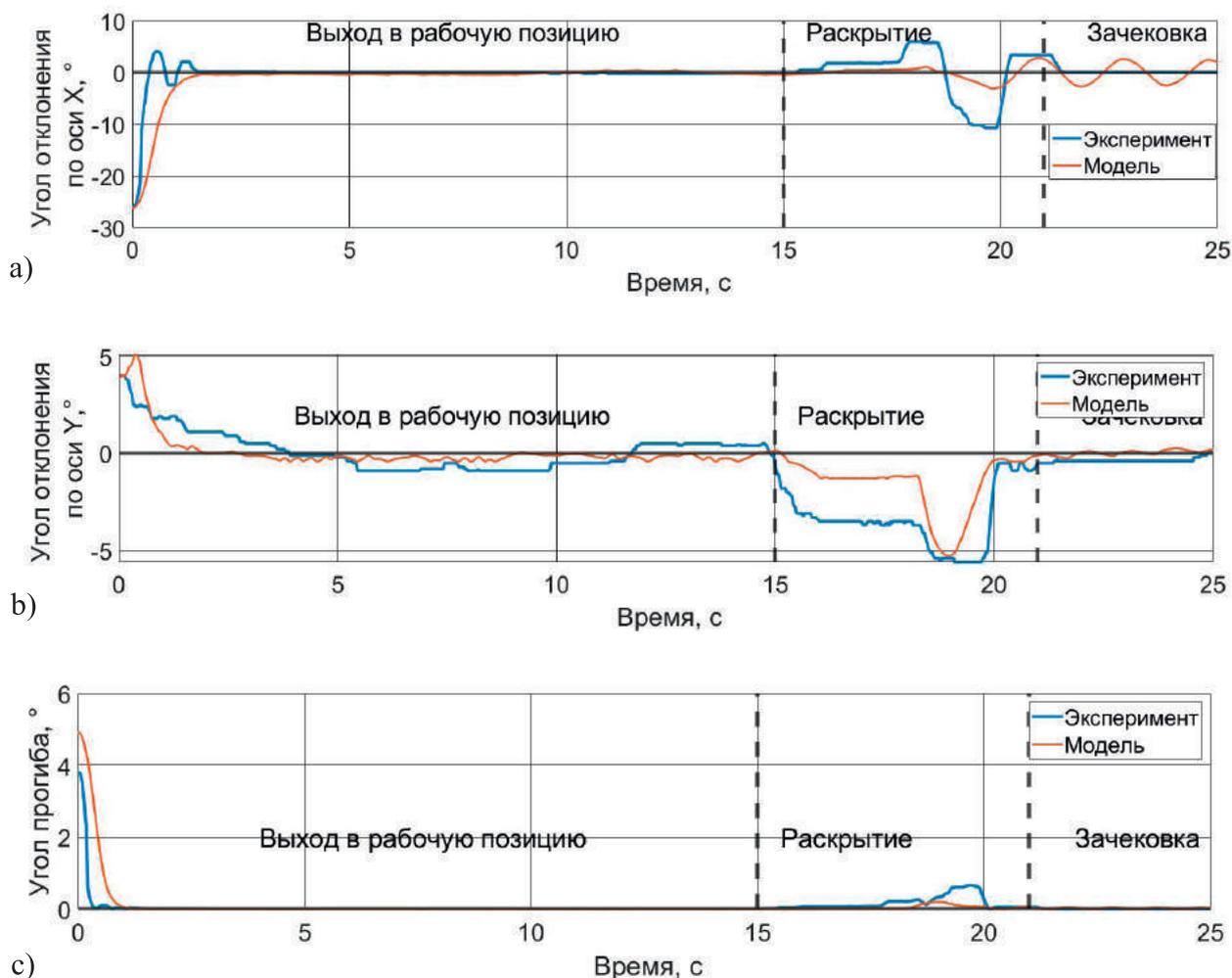
### Сравнение работы математической модели и натурального эксперимента

Представленная в разделе выше математическая модель описывает работу системы опорного обезвешивания в идеализированных условиях, то есть без учета сопротивления воздуха, силы трения колес, трения в шарнирах, люфтов опорной системы, шума датчик и т.п. Для проверки функционирования системы обезвешивания в условиях близких к реальным разработан стенд физического подобия. Стенд, изображенный на рисунке 2, а, как и модель, состоит из 2-х составных частей: объекта обезвешивания — односекционной солнечной панели и опорной системы обезвешивания. Односекционная солнечная панель с балкой была выполнена из алюминиевого профиля, общей массой 5 кг. Шарнирные механизмы с возможностью механической зачеховки при достижении требуемого угла раскрытия выполнены с использованием технологии 3D печати. А система раскрытия солнечной батареи реализована на основе пружинного меха-

низма с ручным запуском. Система опорного обезвешивания выполнена на базе мобильной робототехнической платформы Kuka Youbot с 4-мя Mecanum колесами. Опорная стойка с 2-мя степенями свободы реализована по принципу гироскопического подвеса. Для определения углов отклонения опорной стойки используются аналоговые резистивные датчики углов поворота, установленные на гироскопическом подвесе. Обработка датчиков осуществляется с использованием микроконтроллера Atmega328 на базе платы Arduino Uno. Дискретизация датчиков углов поворота в результате обработки 8-битным АЦП составила порядка 0,1°. Обезвешивание реализуется на основе пассивного демпфирующего элемента, встроенного в опорную стойку. Взаимодействие микроконтроллера, бортового контроллера Kuka Youbot и управляющего компьютера осуществляется при помощи Robot Operation System (ROS) и Matlab Simulink.

В результате испытаний системы обезвешивания получены следующие переходные процессы, представленные на рисунке 3. Стоит отметить, что старт работы системы обезвешивания происходит на 0 секунде. Процесс раскрытия начинается на 15 секунде. Зачеховка и последующая стабилизация начинается на 20 секунде (интервалы определены исходя из длительностей переходных процессов натурной модели). Параметры обезвешиваемого объекта и траектория его движения скорректированы с учетом специфики натурной модели. Кроме того, в модель для сравнения добавлены зоны нечувствительности датчиков угла отклонения опорной стойки 1,5°.

По данным переходным характеристикам работы математической модели и натурального стенда видно, что, во-первых, в режиме «выход в рабочее положение» время переходного процесса составляет 1,66 и 1,63 с соответственно.



**Рисунок 3.** Переходные процессы работы системы активного опорного обезвешивания по углу отклонения по оси X (a); по углу отклонения по оси Y (b); по углу прогиба (c)

**Figure 3.** Transient processes of the operation of the active support weightless system in terms of the angle of deviation along the X axis (a); by the angle of deviation along the Y axis (b); deflection angle (c)

Во-вторых, в режиме «раскрытие» максимальная динамическая ошибка у модели составила: по оси X =  $-3^\circ$ , по оси Y =  $-5,2^\circ$ , по углу прогиба  $0,19^\circ$ , а у натурального эксперимента: по оси X =  $-10,7^\circ$ , по оси Y =  $-5,6^\circ$ , по углу прогиба  $0,66^\circ$ .

В-третьих, в режиме «зачековка» у модели частота колебаний равна 2,3 с, а максимальная ошибка по углу прогиба  $-0,05^\circ$ , при этом у натурального эксперимента частота колебаний равна 2,4 с, а максимальная ошибка по углу прогиба  $-0,055^\circ$ .

Анализ данных численных показателей позволяет сделать вывод о работоспособности разработанной системы

обезвешивания, верифицирует полученную модель и возможности ее применения для производственных задач испытаний механизмов раскрытия панелей солнечных батарей космических аппаратов.

### Выводы

В работе рассмотрена опорная активная система обезвешивания на базе мобильного робототехнического комплекса Kuka Youbot. Проведено сравнение математического и натурального моделирования работы системы опорного обезвешивания на примере односекционной солнечной батареи. Полученное качество натуральных испытаний работы

системы обезвешивания показало максимальную динамическую ошибку в режиме «раскрытие» по углу прогиба  $0,66^\circ$ , углу отклонения по оси X  $-10,7^\circ$  и

углу отклонения по оси Y  $-5,6^\circ$ , что соответствует точности обезвешивания 97,7 %.

### Список источников

1. Wilde M., Clark C., Romano M. Historical Survey of Kinematic and Dynamic Spacecraft Simulators for Laboratory Experimentation of On-Orbit Proximity Maneuvers // *Progress in Aerospace Sciences*. 2019. Vol. 110. P. 100552. ISSN 0376-0421. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2019.100552>.

2. Пятибратов Г.Я., Кравченко О.А., Богданов Д.Ю. и др. Этапы развития электромеханических систем тренажеров для подготовки космонавтов к работе в условиях невесомости и пониженной гравитации // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2021. Т. 64, № 2. С. 5-13. doi: 10.17213/0136-3360-2021-2-5-13. EDN: NEIYD.

3. Xu Z., Wang Y., He Y., Bai X. The Structure Design of Small Satellite Full-Physical Simulation System // 2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). 2015. P. 642–648. doi: 10.1109/CYBER.2015.7288016.

4. Li L., Deng Z., Gao H., Guo P. Active Gravity Compensation Test Bed for a Six-DOF Free-Flying Robot // 2015 IEEE International Conference on Information and Automation. 2015. P. 3135–3140. doi: 10.1109/ICInfA.2015.7279827.

5. Zhigang C., Jiangang Q. Control of Suspended Low-Gravity Simulation System Based on Self-Adaptive Fuzzy PID. 2017, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 231 012070.

6. Paul J., Dettmann A., Girault B., Hilljerges J., Kirchner F., Ahms I., Sommer J. A Facility for Hardware-in-the-Loop Long Distance Movement Simulation for Rendezvous and Capture of Satellites and Other Autonomous Objects // *Acta Astronautica*. 2015. Vol. 116. P. 1–24. ISSN 0094-5765. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.06.003>.

7. Park K.Y., Sung Y.H., Han J.H. Cable Suspension and Balance System with Low Support Interference and Vibration for Effective Wind Tunnel Tests // *Int. J. Aeronaut. Space Sci.* 2021. No. 22. P. 1048–1061. <https://doi.org/10.1007/s42405-021-00390-y>.

8. Ivanov D.S., Koptev M.D., Mashtakov Y.V. e.a. Laboratory Facility for Microsatellite Mock-up Motion Simulation // *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2018. No. 57. P. 115–130. <https://doi.org/10.1134/S1064230717060077>.

9. Rybus T., Seweryn K., Planar Air-Bearing Microgravity Simulators: Review of Applications, Existing Solutions and Design Parameters // *Acta Astronautica*. 2016. Vol. 120. P. 239–259. ISSN 0094-5765. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.12.018>.

10. Van wal S., Çelik O., Tsuda Y., Yoshikawa K., Kawakatsu Y., Reduced-Gravity Experiments of Nonspherical Rigid-Body Impact on Hard Surfaces // *Advances in Space Research*. 2021. Vol. 67. Issue 1. P. 436–476. ISSN 0273-1177. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.018>.

11. Saulnier K., Pérez D., Huang R.C., Gallardo D., Tilton G., Bevilacqua R. A Six-Degree-of-Freedom Hardware-in-the-Loop Simulator for Small Spacecraft // *Acta Astronautica*. 2014. Vol. 105. Issue 2. P. 444–462. ISSN 0094-5765, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.10.027>.

12. Rybus T., Seweryn K., Oleś J., Basmadji F.L., Tarenko K., Moczydłowski R., Barciński T., Kindracki J., Męzyk Ł., Paszkiewicz P., Wolański P. Application of a Planar Air-Bearing Microgravity Simulator for Demonstration of Operations Required for an Orbital Capture with a Manipulator // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 155. P. 211–229. ISSN 0094-5765. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.12.004>.

13. Belyaev A.S., Sumenkov O.Yu. Hybrid Control Algorithm Based on LQR and Genetic Algorithm for Active Support Weight Compensation System // *IFAC-PapersOnLine*. 2021. Vol. 54, No. 13. P. 431–436. ISSN 2405-8963. doi: 10.1016/j.ifacol.2021.10.486.

### References

1. Wilde M., Clark C., Romano M. Historical Survey of Kinematic and Dynamic Spacecraft Simulators for Laboratory Experimentation of On-Orbit Proximity Maneuvers. *Progress in Aerospace Sciences*, 2019, Vol. 110, pp. 100552. ISSN 0376-0421. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2019.100552>.

2. Pyatibratov G.Ya., Kravchenko O.A., Bogdanov D.Yu. e.a. Etapy razvitiya elektromekhanicheskikh sistem trenazherov dlya podgotovki kosmo-navtov k rabote v usloviyakh nevesomosti i ponizhennoi gravitatsii [Stages of Development of Electromechanical Systems of Simulators for Training Cosmonauts to Work in Conditions of Zero Gravity and Low Gravity]. *Izvestiya vysshikh ucheb-*

- nykh zavedenii. Elektromekhanika — Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics*, 2021, Vol. 64, No. 2, pp. 5-13. doi: 10.17213/0136-3360-2021-2-5-13. EDN: NEIYD. [in Russian].
3. Xu Z., Wang Y., He Y., Bai X. The Structure Design of Small Satellite Full-Physical Simulation System. *2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 2015, pp. 642–648. doi: 10.1109/CYBER.2015.7288016.
  4. Li L., Deng Z., Gao H., Guo P. Active Gravity Compensation Test Bed for a Six-DOF Free-Flying Robot. *2015 IEEE International Conference on Information and Automation*, 2015, pp. 3135–3140. doi: 10.1109/ICInfA.2015.7279827.
  5. Zhigang C., Jiangang Q. Control of Suspended Low-Gravity Simulation System Based on Self-Adaptive Fuzzy PID. *2017, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 231 012070.
  6. Paul J., Dettmann A., Girault B., Hiljegerdes J., Kirchner F., Ahrns I., Sommer J. A Facility for Hardware-in-the-Loop Long Distance Movement Simulation for Rendezvous and Capture of Satellites and Other Autonomous Objects. *Acta Astronautica*, 2015, Vol. 116, pp. 1–24. ISSN 0094-5765, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.06.003>.
  7. Park K.Y., Sung Y.H., Han J.H. Cable Suspension and Balance System with Low Support Interference and Vibration for Effective Wind Tunnel Tests. *Int. J. Aeronaut. Space Sci.*, 2021, No. 22, pp. 1048–1061. <https://doi.org/10.1007/s42405-021-00390-y>.
  8. Ivanov D.S., Koptev M.D., Mashtakov Y.V. e.a. Laboratory Facility for Microsatellite Mock-up Motion Simulation. *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, 2018, No. 57, pp. 115–130. <https://doi.org/10.1134/S1064230717060077>.
  9. Rybus T., Seweryn K., Planar Air-Bearing Microgravity Simulators: Review of Applications, Existing Solutions and Design Parameters. *Acta Astronautica*, 2016, Vol. 120, pp. 239–259. ISSN 0094-5765. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.12.018>.
  10. Van wal S., Çelik O., Tsuda Y., Yoshikawa K., Kawakatsu Y., Reduced-Gravity Experiments of Nonspherical Rigid-Body Impact on Hard Surfaces. *Advances in Space Research*, 2021, Vol. 67, Issue 1, pp. 436-476. ISSN 0273-1177. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.018>.
  11. Saulnier K., Pérez D., Huang R.C., Gallardo D., Tilton G., Bevilacqua R. A Six-Degree-of-Freedom Hardware-in-the-Loop Simulator for Small Spacecraft. *Acta Astronautica*, 2014, Vol. 105, Issue 2, pp. 444-462. ISSN 0094-5765, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.10.027>.
  12. Rybus T., Seweryn K., Oleś J., Basmadjji F.L., Tarenko K., Moczydłowski R., Barciński T., Kindracki J., Mężyk Ł., Paszkiewicz P., Wolański P. Application of a Planar Air-Bearing Microgravity Simulator for Demonstration of Operations Required for an Orbital Capture with a Manipulator. *Acta Astronautica*, 2019, Vol. 155, pp. 211–229. ISSN 0094-5765. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.12.004>.
  13. Belyaev A.S., Sumenkov O.Yu. Hybrid Control Algorithm Based on LQR and Genetic Algorithm for Active Support Weight Compensation System. *IFAC-PapersOnLine*, 2021, Vol. 54, No. 13, pp. 431–436. ISSN 2405-8963. doi: 10.1016/j.ifacol.2021.10.486.

*Статья поступила в редакцию 14.04.2023; одобрена после рецензирования 28.04.2023; принята к публикации 11.05.2023.*

*The article was submitted 14.04.2023; approved after reviewing 28.04.2023; accepted for publication 11.05.2023.*

Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. Т. 19, № 2. С. 145–158. ISSN 1999-5458 (print)  
Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2023. Vol. 19. No. 2. P. 145–158. ISSN 1999-5458 (print)

Научная статья

УДК 658.5, 681.5

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-145-158

## ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ КАК КЛЮЧЕВОЙ КОМПОНЕНТ ПУТИ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИНДУСТРИИ 4.0



*Богдан Алексеевич Соловьев*

*Bogdan A. Solovev*

*магистрант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия*



*Гиорги Кахаберович Гамисония*

*Giorgi K. Gamisonia*

*магистрант Уфимской высшей школы экономики и управления,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия*



*Рахмидин Шомидинович Саьдулов*

*Rahmidin Sh. Sayduloev*

*студент кафедры «Нефтехимия и химическая технология»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия*

### Актуальность

С 2011 г. инициатива «Индустрия 4.0» является ключевым направлением исследований и разработок в области гибких производственных систем. Целью инициативы является решение проблемы повышенной сложности производства, вызванной различными факторами, такими как усиление глобальной конкуренции между компаниями, разнообразие продукции и индивидуализация для удовлетворения потребностей клиентов. Для этого Индустрия 4.0 предусматривает всеобъемлющую связь информационных технологий с производственным процессом, что обеспечивает интеллектуальное производство. Доведение существующих производственных систем до этой цели будет долгим процессом преобразования, который требует согласованного пути миграции.

### Цель исследования

Представить примерный путь развития производства к Индустрии 4.0 с использованием выдающихся подходов к формализации и стандартизированных технологий автоматизации.

### Ключевые слова

Индустрия 4.0, краткосрочное прогнозирование, вертикальная интеграция, оптимизация, эффективность, модель, инструмент, управление, математическая модель, цифровая трансформация

**Методы исследования**

Исследование направлено на предоставление теоретического последовательного руководства по развитию производственных процессов в направлении Индустрии 4.0 с учетом как ИТ-инфраструктуры, так и добавленной стоимости предприятия.

**Результаты**

В ходе исследования подробно изучены характеристики и функциональные возможности каждого этапа концепции, а также обоснованы выбор технологии и назначение соответствующих этапов.

**Для цитирования:** Соловьев Б. А., Гамисония Г. К., Саьдулов Р. Ш. Технологии автоматизации как ключевой компонент пути развития производства индустрии 4.0 // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2023. № 2. Т. 19. С. 145-158. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-145-158>.

Original article

## AUTOMATION TECHNOLOGIES AS A KEY COMPONENT OF THE INDUSTRY 4.0 MANUFACTURING DEVELOPMENT PATH

**Relevance**

Since 2011, the Industry 4.0 initiative has been a key area of research and development in the field of flexible manufacturing systems. The aim of the initiative is to address the increased complexity of manufacturing caused by various factors such as increased global competition between companies, product diversity and customization to meet customer needs. To do this, Industry 4.0 provides for a comprehensive connection of information technology with the production process, which ensures intelligent production. Bringing existing production systems to this goal will be a long process of transformation that requires a consistent migration path.

**Research methods**

The study was aimed at providing a theoretical consistent guide to the development of production processes in the direction of Industry 4.0, taking into account both the IT infrastructure and the added value of the enterprise.

**Results**

In the course of the study, the characteristics and functionality of each stage of the concept were studied in detail, and the choice of technology and the appointment of the corresponding stages were justified.

**Keywords**

Industry 4.0, short-term forecasting, vertical integration, optimization, efficiency, model, tool, management, mathematical model, digital transformation

**For citation:** Solovov B. A., Gamisonia G. K., Saydulov R. Sh. *Tekhnologii avtomatizatsii kak klyuchevoy komponent puti razvitiya proizvodstva Industrii 4.0 [Automation Technologies as a Key Component of the Industry 4.0 Manufacturing Development Path]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 2, Vol. 19, pp. 145-158. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-145-158>.*

**Введение**

В настоящее время промышленное производство сталкивается с проблемой быстрорастущей глобальной конкуренции между компаниями из разных регионов мира с различными экономическими условиями. Учитывая тот факт, что производственные затраты в Европе,

как правило, выше, чем в развивающихся странах, европейские компании вынуждены увеличивать ассортимент продукции и индивидуализацию, чтобы оставаться конкурентоспособными [1]. Кроме того, быстро меняющиеся рыночные условия вызывают более высокий уровень неопределенности и ускоряют жиз-

ненный цикл продукта. Все эти проблемы побуждают современные производственные системы быть высокоэффективными, адаптируемыми и в высшей степени гибкими, что приводит к увеличению сложности производства [2].

Инициатива «Индустрия 4.0» является ключевым направлением исследований и разработок в области гибких производственных систем с 2011 г. Эта инициатива направлена на решение сложных производственных и жизненных циклов продукта путем улучшения вертикальной и горизонтальной интеграции участников производственного процесса [3]. Для достижения этой цели необходимо обеспечить глобальную связь информационных технологий с производственным процессом, обеспечивающую междоменный доступ к данным. Совместное использование предметных знаний во всех соответствующих производственных областях может открыть совершенно новые возможности для всех участников процесса, сократив разрыв между ними. Таким образом, могут быть созданы высокоавтоматизированные, но гибкие производственные системы, предоставляющие всю необходимую информацию в режиме реального времени всем активным участникам процесса [4]. Поэтому требуется согласованная техническая, синтаксическая и семантическая функциональная совместимость взаимодействия, основанного на общении [5].

Для достижения горизонтальной и вертикальной интеграций производственных компонентов решающее значение имеет общее понимание этого процесса. По этой причине была постулирована Модель эталонной архитектуры для Индустрии 4.0, названная RAMI 4.0. Формализованный немецкой организацией по стандартизации DIN RAMI 4.0 интегрирует элементы Индустрии 4.0 в трехмерную модель уровня, давая формальные определения их вертикальной и

горизонтальной интеграций и проектирования жизненного цикла продукта [6, 7].

Кроме того, внедрение Индустрии 4.0 будет длительным процессом трансформации, который затронет многие части производственных систем. В то же время риски смены работающих систем должны быть минимальными, чтобы компании оставались конкурентоспособными. Поэтому цифровая трансформация производственных систем требует согласованного пути миграции.

Уникальной особенностью является то, что исследование объединяет технологический и экономический взгляды на процесс разработки традиционных производственных систем и предоставляет конкретный пример реализации. Прошлые исследования в этой области в основном упускают из виду одну из этих основных точек зрения. Была разработана концепция устройства управления, совместимого с Индустрией 4.0, с упором на его технологическую пригодность, но без учета его экономической выгоды для предприятия. Некоторые исследования имеют аналогичный недостаток, представляя собой убедительную попытку создания компонента Индустрии 4.0 с использованием существующих технологий, но не в контексте развития предприятия. Где-то анализируется будущее направление развития Индустрии 4.0, оставляя позади анализ вспомогательных технологий. Таким образом, концепция данного исследования преследует цель объединения всех актуальных аспектов, включая формальные стандарты с использованием RAMI 4.0, экономическую заинтересованность производственных компаний путем миграции и возможную концепцию внедрения с помощью доступных технологий. Соответственно, рассматривается демонстрационный проект разработанной структуры для оценки осуществимости и применимости предлагаемого подхода [8].

## Модель эталонной архитектуры Индустрия 4.0

В ходе дискуссии о развитии Индустрии 4.0 сошлись самые разные области интересов. Подходы к автоматизации производства и процессов, технологии связи и автоматизации, а также производственные стандарты должны быть надлежащим образом связаны друг с другом, обеспечивая согласованное техническое, синтаксическое и семантическое взаимодействие. Следовательно, нет никаких сомнений в том, что требуется общепринятая эталонная модель.

На Ганноверской ярмарке в 2015 г. была представлена модель, обеспечивающая формальную основу для компонентов Индустрии 4.0, в которой могут быть адаптированы его основные характеристики для производственных систем. Модель содержит три оси, описанные следующим образом [9]:

1. ось архитектуры («Уровни») с шестью уровнями, дающими информацию об ИТ-структуре производственной системы и роли активов в ней;

2. ось «Жизненный цикл и поток создания ценности», представляющая жизненный цикл актива и процесс создания добавленной стоимости, на основе ИЕС 62890;

3. ось «Уровни иерархии», предоставляющая обзор иерархических уровней производственной системы на основе разных стандартов.

С точки зрения технологии автоматизации большая проблема внедрения RAMI 4.0 заключается в разработке реальных решений, поддерживающих функциональные возможности каждого уровня и взаимодействие между ними. Поэтому эта работа фокусируется на вертикальной оси Архитектуры.

На этой оси слой активов представляет физический мир, т.е. реально существующий актив (машины, детали машин, оси и т.д.) и связь актива с его

виртуальным представлением на более высоких уровнях.

На уровне интеграции происходит переход из физического мира в информационный. Следовательно, этот уровень содержит свойства и функции, связанные с процессом, которые делают актив пригодным для использования по назначению, включая человеко-машинные интерфейсы (по-английски human-machine interface (HMI)) и описания технических элементов. Каждое соответствующее событие в реальном мире вызывает событие в виртуальном мире, о чем сообщается на уровне интеграции.

Коммуникационный уровень содержит стандартизированную связь, соответствующую Индустрии 4.0, с использованием единого формата данных. Другими словами, он описывает связь актива с информацией и функциями других активов.

Информационный слой включает описания всех данных, которые используются, генерируются или модифицируются техническими функциями актива. На этом уровне происходит непротиворечивая интеграция различных данных, их сохраняющаяся и непротиворечивая интеграция.

Функциональный уровень содержит формальное цифровое описание технических функций актива с учетом его роли в производственной системе, предоставляя платформу для горизонтальной интеграции различных функций всех активов.

Наконец, что очень важно, бизнес-уровень представляет собой более высокий стратегический взгляд на предприятие. Он включает в себя оркестровку услуг на функциональном уровне, обеспечение целостности функций в цепочке добавленной стоимости, сопоставление бизнес-моделей и результирующих бизнес-процессов и т.д. Однако роль бизнес-уровня не связана с конкретными решениями, такими как Планирование ресур-

сов предприятия (по-английски enterprise resource planning (ERP)), которые вместо этого расположены на функциональном уровне.

### Путь развития Индустрии 4.0

В настоящее время владельцы производственных систем сталкиваются с проблемой перехода на Индустрию 4.0. Нет сомнения, что это будет длительный процесс, связанный с кардинальными изменениями практически во всех частях предприятия. Планирование и реализация этих изменений должны быть разработаны таким образом, чтобы они постоянно оказывали положительное влияние на прибыльность, рост и эффективность производственной системы и всего предприятия. Преимущество цифровой трансформации должно быть прозрачным в любой момент; иначе предприниматели его не поддержат. Следовательно, требуется последовательный путь миграции, предоставляющий владельцам производственных систем руководство по внедрению основ Индустрии 4.0 на своих

предприятиях. Существует один выдающийся исследовательский подход к этой цели. Этот путь состоит из пяти последовательных шагов развития, которые описывают соответствующую зрелость предприятия для Индустрии 4.0 и его предполагаемую ценность для бизнеса (рисунок 1). Крайне важно, чтобы компетенции накапливались постепенно, чтобы каждый следующий шаг основывался на предыдущем.

*Первый шаг «Компьютеризация»* описывает изолированное использование информационных технологий (ИТ) на предприятии, например, использование фрезерного станка с числовым программным управлением (по-английски computer numerical control (CNC)). Это позволяет ускорить и улучшить простые повторяющиеся действия, так что основным преимуществом этого шага является более эффективное и менее подверженное ошибкам производство. В настоящее время этот шаг почти завершен на большинстве немецких предприятий.

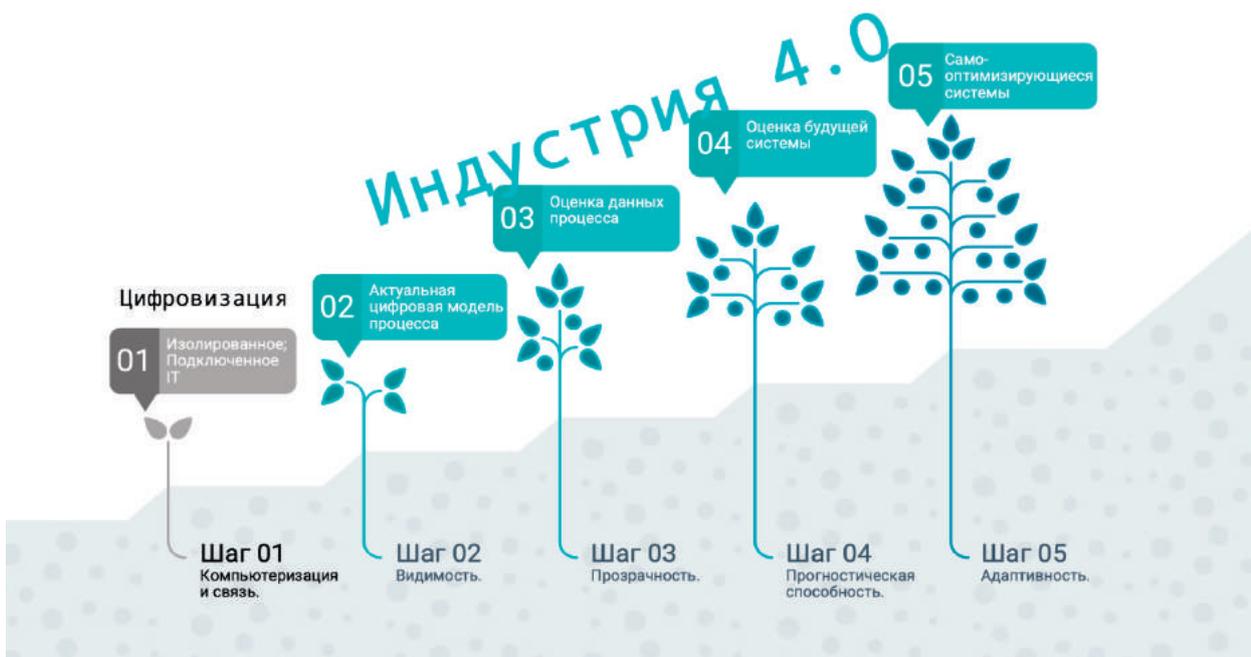


Рисунок 1. Путь развития Индустрии 4.0

Figure 1. The path of development of Industry 4.0

«Связанность» представляет собой связанное использование ИТ на предприятии. Используемые технологии могут взаимодействовать друг с другом, и реализованы первые API-интерфейсы от операционных технологий (ОТ) до бизнес-ИТ, так что происходит приблизительное отражение основных бизнес-процессов. На этом этапе, например, роботы-манипуляторы на производственной линии могут общаться друг с другом, и результаты их работы автоматически передаются в систему управления производством (по-английски manufacturing execution system (MES)). Оба шага, компьютеризация и сетевое взаимодействие, объединены термином цифровизация, обеспечивая основы для Индустрии 4.0, но не являясь ее частью.

*Следующий шаг, «Видимость»,* представляет собой отправную точку для Индустрии 4.0. На этом этапе актуальная цифровая модель предприятия доступна в режиме реального времени, предоставляя соответствующую информацию о текущем состоянии производственной системы. Такой подход можно определить как своеобразную цифровую тень предприятия. С помощью Digital Shadow можно должным образом интегрировать стратегические системы, такие как управление жизненным циклом продукта (по-английски product lifecycle management (PLM)), что делает текущее состояние производства видимым для руководителей предприятия.

*На этапе «Прозрачность»* уже видимые производственные данные обрабатываются, и выполняется их подробный анализ, чтобы можно было идентифицировать отношения элементов системы. Методы анализа данных, такие как искусственный интеллект (по-английски artificial intelligence (AI)), позволяют такую обработку производственных данных. Например, методы распознавания изображений, основанные на искусствен-

ном интеллекте, могут использоваться для обнаружения дефектов поверхности заготовки с точки зрения контроля качества. Используя данные об этих ошибках в сочетании с частотными данными работающей машины, можно найти опасные частоты и избежать их. Следовательно, правильная оценка поведения системы позволяет целенаправленно воздействовать на нее с точки зрения мониторинга состояния.

*На следующем этапе* возможно построение возможных сценариев будущего поведения системы на основе проанализированных прошлых данных. Другими словами, дается возможность прогнозирования, чтобы можно было предвидеть приближающиеся ситуации, а ответственный менеджер мог своевременно принимать соответствующие решения и превентивные меры [10].

*Отличие конечного шага пути развития «Адаптивность»* от предыдущего шага «Прогностическая способность» заключается в возможности реакции автономной системы на изменение текущего состояния производства. Другими словами, производственная система является самооптимизирующейся и может самостоятельно принимать определенные решения. Уровень автоматизации, таким образом, основан на сложности решения и соотношении затрат и выгод.

Таким образом, цель последнего шага пути развития достигается, если данные цифровой тени могут использоваться для автономного управления в режиме реального времени, что приносит предприятию более высокую выгоду.

### **Концепция эволюции производственного процесса**

В соответствии с обоими теоретическими подходами можно определить концепцию эволюции производственного процесса, которая учитывает как ценность для бизнеса, так и ИТ-инфраструк-

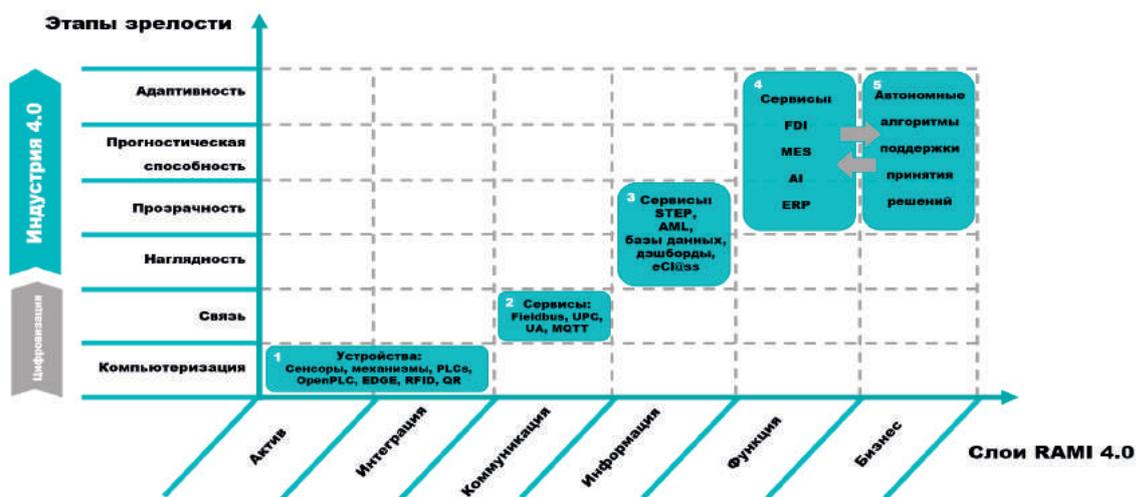
туру предприятия [11]. Эта концепция может быть применена для определения конкретных шагов внедрения Индустрии 4.0 на основе существующих технологий автоматизации.

На рисунке 2 показана матрица эволюции заданного производственного процесса. Его горизонтальная ось представляет шесть слоев RAMI 4.0. Вертикальная ось показывает этапы зрелости Индустрии 4.0 согласно. В ячейках построенной матрицы размещены информационные и коммуникационные технологии, необходимые для обеспечения функциональности соответствующих слоев RAMI 4.0 и достижения добавленной стоимости соответствующих этапов зрелости.

Таким образом, в данной статье эволюция производственного процесса в направлении Индустрии 4.0 рассматривается как последовательный процесс, основанный на одновременном развитии ИТ-инфраструктуры и бизнес-зрелости предприятия путем внедрения «отработанных на этапах» технологий автоматизации. Эти этапы детализированы следующим образом.

### 1. Полевые устройства

В начальной точке эволюции производственного процесса необходимо правильно установить аппаратные компоненты, такие как машины, датчики, приводы и контроллеры (по-английски Power Line Communication (PLC)). На этом этапе контроллеры в основном отвечают за управление работой машины: за обработку данных датчиков, срабатывание исполнительных механизмов и изменение состояния машины. Пограничные устройства также могут быть реализованы для поддержки функций и дальнейшего управления операциями. Более того, соответствующие устройства должны иметь соответствующее уникальное виртуальное представление с точки зрения идентификации. Для этого могут использоваться технологии автоматической идентификации и сбора данных (по-английски automatic identification and data capture (AIDC)). К ним относятся радиочастотная идентификация (по-английски radio frequency identification (RFID)), штрих-коды, магнитные полосы и т.д. Таким образом, этот стар-



**Рисунок 2.** Концепция эволюции производственного процесса на основе стадий зрелости Индустрии 4.0 и RAMI 4.0

**Figure 2.** The concept of the evolution of the production process based on the stages of maturity of Industry 4.0 and RAMI 4.0

товый этап объединяет слои Актив и Интеграция и первый этап зрелости Компьютеризация.

## 2. Услуги связи

В дальнейшем установленные полевые устройства необходимо соединить друг с другом и с пользовательскими приложениями, чтобы обеспечить непрерывный обмен данными. Таким образом, этот этап предоставляет услуги связи (протоколы) для удовлетворения потребностей следующих этапов. Эти протоколы должны быть определены технологически независимым способом для достижения взаимосвязи между различными полевыми сетями и службами. Фактическими механизмами обмена данными в промышленном секторе являются протоколы Fieldbus, такие как CAN, Modbus или Profibus, и механизмы связи между машинами, такие как унифицированная архитектура связи на открытой платформе (по-английски open platform communications united architecture OPC UA) и передача телеметрии с очередью сообщений (по-английски message queuing telemetry transport (MQTT)). В качестве основного руководства для исследований рекомендуют OPC UA в качестве основного подхода к Индустрии 4.0 благодаря его превосходной, стабильной и стандартизированной производительности. Многие авторы одобряют эту рекомендацию своим опытом. Однако OPC UA имеет сложную архитектуру, поэтому в некоторых обычных случаях использования с несколькими участниками производственного процесса может быть более разумным использовать протоколы Fieldbus или MQTT.

## 3. Информационные услуги

На этом этапе необходимо создать глобальную систему управления данными. Эта система должна включать в себя не только фактическое цифровое представление производственной системы, ее визуализацию и хранение данных, но

также непрерывную фильтрацию и непротворечивую интеграцию соответствующих данных, объединяя таким образом этапы «Видимость» и «Прозрачность». Одна из основных проблем заключается в том, что данные поступают из множества инженерных инструментов в разных форматах; поэтому технологии, прошедшие стадию выдержки, должны позволять отображать и интегрировать эти данные. Для этой цели перспективны следующие методы: Стандарт обмена данными модели продукта (STEP), Язык моделирования систем (SysML), Язык моделирования автоматизации (AML), описание электронного устройства (EDD). Для хранения и визуализации данных могут использоваться различные базы данных и информационные панели.

## 4. Функциональные услуги

После создания согласованной системы управления информацией необходимо обеспечить среду выполнения для системных приложений и ее техническую функциональность. Другими словами, отфильтрованные релевантные данные из различных инструментов и источников позволяют оценить и предвидеть будущие состояния системы на этом этапе. Интеграция полевых устройств (по-английски field device tool (FDI)) является рекомендуемой технологией для интеграции информационных и функциональных услуг. Для оценки состояния системы могут быть реализованы методы искусственного интеллекта. Основываясь на их результатах, системы управления операциями, такие как MES или ERP, могут использоваться для принятия стратегических решений как в технических (например, диагностическое обслуживание), так и в коммерческих (объемы продаж и т. д.) взглядах.

## 5. Автономные алгоритмы поддержки принятия решений

Этот последний этап тесно связан с предыдущим. Функциональность биз-

нес-уровня не связана с конкретными решениями: все они закреплены за функциональным слоем. Таким образом, технологии реализации не указаны в явном виде для этого заключительного этапа эволюции производственного процесса. Его внимание сосредоточено на разработке алгоритмов поддержки принятия решений, которые могут оптимизировать поведение системы как с функциональной, так и с коммерческой точек зрения. В целом, этот этап представляет собой оркестровку сервисов на предыдущих этапах, которая в разумной степени автономна и самооптимизируется.

### **Пример реализации**

В станках технические жидкости в виде смазочно-охлаждающих жидкостей (по-английски cutting fluid (CF)) используются для охлаждения и смазки между инструментом и заготовкой и для удаления стружки. Концентрация CF должна регулироваться в зависимости от различных параметров машины и процесса и должна регулярно проверяться. Применение правильно отрегулированного CF способствует повышению точности размеров и качества поверхности обрабатываемых заготовок и снижает износ инструмента. В то же время неправильно леченный муковисцидоз может стать опасным веществом, способным вызывать заболевания и выделять токсические вещества [12]. Тем не менее, обслуживанием и уходом за CF часто пренебрегают из-за непрозрачности или отсутствия технологической документации.

В рамках одного проекта из Германии в сотрудничестве разрабатывают мобильную систему дозирования жидкости с подключением к цифровым системам управления производством для автоматической, ориентированной на спрос и документированной заливки технических жидкостей на станки. Вновь разработанная система дозирования жидкости

распознает станок, измеряет уровень CF в баке, обрабатывает данные датчиков о состоянии жидкости и осуществляет доливку по заданным параметрам АСУ ТП. Параметры испытаний, а также количество и концентрация CF на машину регистрируются, при этом потребление каждого станка доступно в виде исторических данных.

Предполагаемая разработка новой системы дозирования жидкости в проекте MoTeF 4.0 является примером применения концепции, представленной в этой статье. Уже существующее ручное устройство для дозирования смазочно-охлаждающих жидкостей будет доработано с учетом его применения в контексте Индустрии 4.0. Существующее устройство, по сути, представляет собой смешительную станцию, где все параметры, необходимые для дозирования CF, необходимо вводить вручную [13]. Эта смешительная станция размещена на небольшой тележке, которую можно подвезти непосредственно к машине для заполнения. Нет автоматического сбора параметров, хранения данных или внешнего подключения. Все эти функции добавляются на разных этапах эволюции производственного процесса (рисунок 3).

#### *1. Полевые устройства*

В баке машины встроены датчики для автоматического измерения концентрации смазочно-охлаждающей жидкости, значения ее pH, содержания нитритов и нитратов, а также уровня заполнения CF в баке. Все датчики подключены к PLC на машине. Для идентификации машины к машине прикрепляется передатчик RFID, а к каретке — соответствующий считыватель. На каретке установлен еще один PLC с сенсорным дисплеем, который рассчитывает количество и концентрацию доливаемых смазочно-охлаждающих жидкостей. PLC также управляет насосами станции смешивания и проверяет правильность количества заливае-

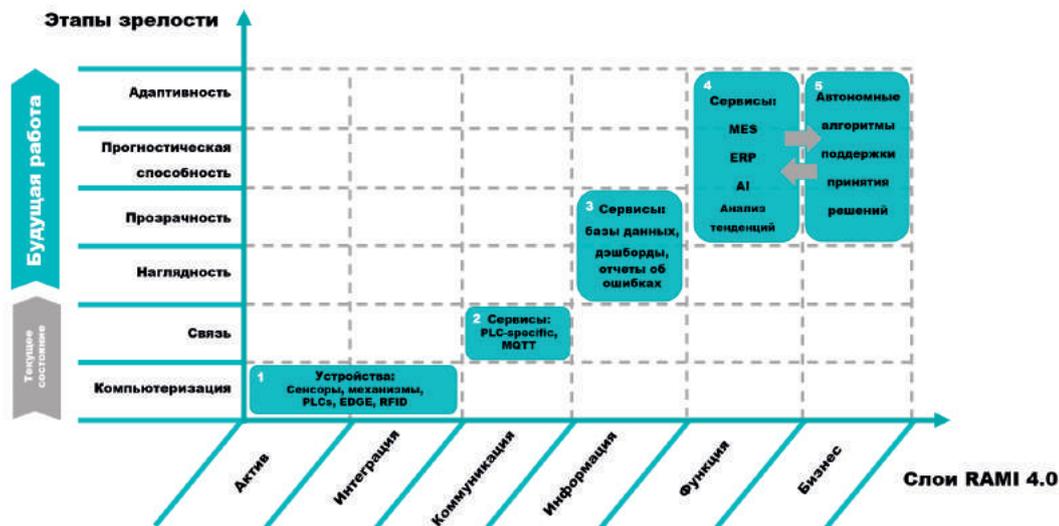


Рисунок 3. Этапы эволюции производственного процесса для проекта МТЭФ 4.0

Figure 3. Stages of evolution of the production process for the MTEF 4.0 project

мой жидкости с помощью датчиков расхода. Оператор машины может идентифицировать себя с помощью дисплея и впоследствии начать заправку. Каждый PLC подключен к устройству Edge (Revolution Pi), которое служит точкой доступа WLAN и обеспечивает дальнейшую обработку полученных данных.

### 2. Услуги связи

Между PLC и связанными с ними пограничными устройствами устанавливается специальное соединение PLC. Пограничные устройства подключены к локальной сети WLAN. Брокер MQTT реализован на каждом устройстве Edge, предоставляя собранные данные всем заинтересованным участникам процесса, например, в базу данных (см. следующий этап). MQTT в качестве коммуникационного протокола выбран из-за его простой реализации и возможности обмена данными с множеством различных участников процесса.

### 3. Информационные услуги

Для обеспечения понятности данных реализована следующая структура. База данных (InfluxDB), расположенная на сервере локального предприятия, подписывается на MQTT-Brokers и хранит все поступающие данные: концентрацию смазочно-охлаждающей жидкости, зна-

чение ее pH, содержание нитритов и нитратов, идентификатор машины и уровень заполнения и т.д. Находится там же, к базе данных подключается подходящая панель управления (сборка с помощью Grafana), которая визуализирует эти данные. Визуализация позволяет оператору в цехе и вышестоящему руководству видеть всю необходимую информацию о фактическом состоянии жидкостной системы на своих экранах. Кроме того, отчет о состоянии регулярно отправляется в выбранный репозиторий и сохраняется как данные истории для дальнейшей обработки данных. Учитывая тот факт, что данные процесса являются однородными и поступают из смежных инженерных инструментов, дополнительные инструменты интеграции не применяются.

В том числе, автоматизация технологических линий и рабочих центров на основе событийной информации применяется на заводе по производству электрических кабелей в Австрии. Для статистической обработки результатов процессов кабельного производства многими поставщиками автоматизированных рабочих центров используются контрольные карты Шухарта. Интерпре-

тацию контрольных карт Шухарта для большей части кабельного производства можно представить в следующем виде:

$$F_1(i) = \begin{cases} 1, \text{if } \exists j < i \mid |y(x_j)| \notin (-3\sigma, 3\sigma), \\ 0, \text{if } \forall j < i \mid |y(x_j)| \in (-3\sigma, 3\sigma); \end{cases} \quad (1)$$

$$F_2(i) = \begin{cases} 1, \text{if } \forall j \in (i, i-2) \mid |y(x_j)| \in (2\sigma, 3\sigma), \\ 0, \text{if } \exists j \in (i, i-2) \mid |y(x_j)| \notin (2\sigma, 3\sigma); \end{cases} \quad (2)$$

$$F_3(i) = \begin{cases} 1, \text{if } \forall j \in (i, i-4) \mid y(x_j) \in (1\sigma, 2\sigma), \\ 1, \text{if } \forall j \in (i, i-4) \mid y(x_j) \in (-1\sigma, -2\sigma), \\ 0, \text{if } \exists j \in (i, i-4) \mid |y(x_j)| \notin (1\sigma, 2\sigma), \\ 0, \text{if } \exists j \in (i, i-4) \mid \text{sgn}(y(x_j)) \neq \text{sgn}(y(x_i)); \end{cases} \quad (3)$$

$$F_4(i) = \begin{cases} 1, \text{if } \forall j \in (i, i-7) \mid \text{sgn}(y(x_j)) = \\ \quad = \text{sgn}(y(x_i)), \\ 0, \text{if } \exists j \in (i, i-7) \mid \text{sgn}(y(x_j)) \neq \\ \quad \neq \text{sgn}(y(x_i)), \end{cases} \quad (4)$$

где  $i$  — номер текущей точки;

$F_1(i)$ ,  $F_2(i)$ ,  $F_3(i)$ ,  $F_4(i)$  — соответственно «выход одной точки за границы  $3\sigma$ », «две из трех последовательных

точек, лежащих по одну сторону от средней линии, находятся в зоне  $3\sigma$ », «четыре из пяти последовательных точек, лежащих по одну сторону от средней линии, находятся в зоне  $2\sigma$ », «семь точек по одну сторону от средней линии»;

$y(x_i)$  — значение  $x_i$  точки контрольной карты;  $\sigma$ ,  $2\sigma$ ,  $3\sigma$  — зоны контрольной карты.

Данная методология организации интегрированной системы управления производством кабельной продукции позволяет реализовать следующую функциональность автоматизированного рабочего места (АРМ) (таблица 1).

Как показано на рисунке 3, этот этап представляет текущее состояние проекта MoTeF 4.0. Описанные полевые устройства, коммуникационные и информационные услуги уже реализованы, обеспечивая связь и видимость процесса дозирования CF.

**Таблица 1.** Описание функциональности АРМ

**Table 1.** Description of workstation functionality

<b>Функциональность АРМ</b>			
<b>Старший мастер</b>	<b>Начальник производства</b>	<b>Технолог</b>	<b>Диспетчер</b>
Мониторинг технических операций	Обеспечение контроля протоколов нарушений	Мониторинг хода технологического процесса	Отображение состояния комплекса аппаратных средств ПТК
Отслеживание выполнения заказов, объемов, партий	Контроль выполнения плановых работ в реальном времени	Оповещение об аварийных, нештатных и штатных событиях, происходящих в системе	Отслеживание наработки оборудования
Управление задачами смены	Контроль состояния технологического оборудования	Коррекция настроечных параметров задач	Контроль в реальном времени выполнения ремонтных работ в соответствии с планом
Контроль работы смены	Формирование отчетной документации	Мониторинг справочников	Отслеживание аварийных ситуаций
Подготовка отчетов	Представление данных измерений о качестве продукции в реальном времени	Отслеживание истории продукта	Отслеживание истории оборудования

#### *4. Функциональные услуги*

Системы MES и ERP могут подписаться на брокеров MQTT пограничных устройств или получить доступ к базе данных для получения всей информации о процессе обработки CF. Эта информация может быть использована руководством для принятия стратегических решений по планированию производства, например, о дальнейших объемах поставок CF. Кроме того, PLC на тележке получает информацию от MES о количестве и концентрации CF, которую необходимо заполнить в соответствующей машине, так что полевой оператор получает правильные рабочие инструкции. Кроме того, считается, что методы с применением искусственного интеллекта предсказывают будущее поведение системы и дают рекомендации по действиям. Основываясь на сохраненных данных истории, можно спрогнозировать дату возможной поломки машины из-за отсутствия CF в баке с помощью анализа тенденций, что позволяет осуществлять профилактическое техническое обслуживание. Например, раннее принятие контрмер позволяет предприятиям избежать затрат, связанных с простоями.

#### *5. Автономные алгоритмы поддержки принятия решений*

Алгоритмы поддержки принятия решений в МЧС и на PLC вагона помогают оценить расход и техническое обслуживание CF, что позволяет осуществлять автоматический, ориентированный на спрос и документированный розлив технических жидкостей. Полевой оператор берет тележку, идет к машине и должен начать заполнение без ввода каких-либо параметров или идентификационных кодов машины. Он получает все инструкции от внедренных систем. Таким образом, возможные ошибки и связанные с ними затраты сводятся к

минимуму. Следовательно, система автономна и в разумных пределах самооптимизируется, и цель проекта достигается.

#### **Выводы**

Возвращаясь к зрелости RAMI 4.0 и Индустрии 4.0 согласно, в этом исследовании представлена концепция эволюции производственного процесса на основе существующих технологий автоматизации. Подробно обсуждаются характеристики и функциональные возможности каждого этапа концепции, а также обосновывается выбор технологии и назначение соответствующих этапов. Для оценки целесообразности и применимости предложенного подхода детализирован примерный проект внедрения из области технического обслуживания технических жидкостей. В целом, это исследование направлено на предоставление теоретического последовательного руководства по развитию производственных процессов в направлении Индустрии 4.0 с учетом как ИТ-инфраструктуры, так и добавленной стоимости предприятия.

В дальнейшей работе описанный прикладной проект будет дорабатываться в целях последующей валидации и уточнения предложенной концепции. Будут реализованы дальнейшие этапы зрелости. Технологии автоматизации, которые лучше всего подходят для этой цели, будут дополнительно изучены и проверены на предмет их пригодности для Индустрии 4.0. Впоследствии будет обсуждаться их общая применимость для других приложений, включая оценку влияния допущений на предлагаемый метод. Еще одной целью будущей работы является оценка преимуществ названных технологий с точки зрения их взаимного использования в рамках глобальной производственной системы.

## Список литературы

1. Фурсенко С.Н., Якубовская Е.С., Волкова Е.С. Автоматизация технологических процессов. Минск: БГАТУ, 2007. 592 с.
2. Аль-Дарабсе А.М.Ф., Маркова Е.В. Реализация концепции программы автоматизации управленческого учета // Актуальные проблемы финансов глазами молодежи: материалы III Всероссийской студенческой научно-практической конференции 2017. С. 31–33. EDN: ZVYWMZ.
3. Сасскинд Д. Будущее без работы. Технология, автоматизация и стоит ли их бояться. Litres, 2022.
4. Бородин И.Ф., Андреев С.А. Автоматизация технологических процессов и систем автоматического управления. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во Юрайт, 2023. 386 с. ISBN 978-5-534-07895-4.
5. Клокотов И.Ю. Автоматизация технологических процессов и производств // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2019. № 3. С. 200–205. EDN: OYCXGL.
6. Николаенко С.А. и др. Автоматизация технологических процессов. Краснодар, 2016. 218 с.
7. Шукалов А.В., Заколдаев Д.А., Жаринов И.О. От Индустрии 3.0 к Индустрии 4.0: обзор инноваций // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 11–12. С. 153–159. EDN: YPXBDV.
8. Тебекин А.В., Тебекин П.А., Егорова А.А. Является ли инициатива «Индустрия 4.0» промышленной революцией? // Теоретическая экономика. 2021. № 7 (79). С. 59–73. EDN: MGBLDX.
9. Шева Г. и др. От индустрии 3.0 к индустрии 4.0: основные понятия, измерения и компоненты индустрии 4.0 // Инвестиции в России. 2019. № 9. С. 32–40. EDN: CGPCIM.
10. Юдина М.А. Индустрия 4.0: конкуренция за актуальность // Государственное управление. Электронный вестник. 2020. № 80. С. 282–299. EDN: OTYNUZ.
11. Гладиллина И.П., Литвенко И.Ю., Кирюхина Е.О. Современные управленческие технологии и индустрия 4.0 Modern management technologies and industry 4.0 // Финансовые рынки и банки. 2021. № 12. С. 21–23.
12. Фролов Е.Б., Паршина И.С., Зайцев А.С., Климов А.С. Индустрия 4.0: «Цифровой двойник» как средство повышения эффективности производственной системы // Научные технологии в машиностроении. 2019. № 2. С. 42–48. doi: [https://doi.org/10.30987/article\\_5c486cc51ea422.53107269](https://doi.org/10.30987/article_5c486cc51ea422.53107269).
13. Хомутичкина М.Е. Цифровые технологии — будущее нефтегазовой отрасли //

Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: прикладная геология, нефтегазовое дело и геодезия: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 18–19 ноября 2020 г.). Пермь-Екатеринбург, 2020. С. 136–143. ISBN 978-5-398-02458-6. EDN: HLVNYS.

## References

1. Fursenko S.N., Yakubovskaya E.S., Volkova E.S. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov* [Automation of Technological Processes]. Minsk, BGATU Publ., 2007. 592 p. [in Russian].
2. Al'-Darabse A.M.F., Markova E.V. *Realizatsiya kontseptsii programmy avtomatizatsii upravlencheskogo ucheta* [Implementation of the Concept of the Management Accounting Automation Program]. *Materials of the III All-Russian Student Scientific-Practical Conference «Actual Problems of Finance through the Eyes of Youth»* [Materialy III Vserossiiskoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy finansov glazami molodezhi»]. 2017, pp. 31–33. EDN: ZVYWMZ. [in Russian].
3. Sasskind D. *Budushchee bez raboty. Tekhnologiya, avtomatizatsiya i stoit li ikh boyat'sya* [The Future without Work. Technology, Automation and Whether to Be Afraid of Them]. Litres, 2022. [in Russian].
4. Borodin I.F., Andreev S.A. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Automation of Technological Processes and Automatic Control Systems]. 2-e izd., ispr. i dop. Moscow, Yurait Publ., 2023. 386 p. ISBN 978-5-534-07895-4. [in Russian].
5. Klokov I.Yu. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv* [Technological Process Automation]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologii «Integral» — International Journal of Applied Sciences and Technology Integral*, 2019, No. 3, pp. 200–205. EDN: OYCXGL. [in Russian].
6. Nikolaenko S.A. e.a. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov* [Automation of Technological Processes]. Krasnodar, 2016. 218 p. [in Russian].
7. Shukalov A.V., Zakoldaev D.A., Zharinov I.O. *Ot Industrii 3.0 k Industrii 4.0: obzor innovatsii* [From the Industry 3.0 Standard to the Industry 4.0 Standard : the Review of Innovations]. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu — Issues of Defense Technology. Series 16: Technical Means of Countering Terrorism*, 2018, No. 11–12, pp. 153–159. EDN: YPXBDV. [in Russian].

8. Tebekin A.V., Tebekin P.A., Egorova A.A. Yavlyaetsya li initsiativa «Industriya 4.0» promyshlennoi revolyutsiei? [Is Industry 4.0 an Industrial Revolution?]. *Teoreticheskaya ekonomika — Theoretical Economics*, 2021, No. 7 (79), pp. 59–73. EDN: MGBLDX. [in Russian].
9. Sheve G. e.a. Ot industrii 3.0 k industrii 4.0: osnovnye ponyatiya, izmereniya i komponenty industrii 4.0 [From Industry 3.0 to Industry 4.0: Key Concepts, Dimensions, and Components of Industry 4.0]. *Investitsii v Rossii — Investments in Russia*, 2019, No. 9, pp. 32–40. EDN: CGPCIM. [in Russian].
10. Yudina M.A. Industriya 4.0: konkurentsia za aktual'nost' [Industry 4.0: Competition to Stay Relevant]. *Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyi vestnik — Public Administration. Electronic Bulletin*, 2020, No. 80, pp. 282–299. EDN: OTYHUZ. [in Russian].
11. Gladilina I.P., Litvenko I.Yu., Kiryukhina E.O. Sovremennye upravlencheskie tekhnologii i industriya [4.0 Modern Management Technologies and Industry 4.0]. *Finansovye rynki i banki — Financial Markets and Banks*, 2021, No. 12, pp. 21–23. [in Russian].
12. Frolov E.B., Parshina I.S., Zaitsev A.S., Klimov A.S. Industriya 4.0: «Tsifrovoy dvoynik» kak sredstvo povysheniya effektivnosti proizvodstvennoi sistemy [Industry 4.0: «Digital twin» as a Means of Increasing the Efficiency of the Production System]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii — Science-Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2019, No. 2, pp. 42–48. doi: [https://doi.org/10.30987/article\\_5c486cc51ea422.53107269](https://doi.org/10.30987/article_5c486cc51ea422.53107269). [in Russian].
13. Khomutinnikova M.E. Tsifrovye tekhnologii — budushchee neftegazovoi otrasli [Digital Technology is the Future of the Oil and Gas Industry]. *Materialy XIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy razrabotki mestorozhdenii uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh: prikladnaya geologiya, neftegazovoe delo i geodeziya» (g. Perm', 18–19 noyabrya 2020 g.)*. [Materials of the XIII All-Russian Scientific and Technical Conference «Problems of Development of Deposits of Hydrocarbon and Ore Minerals: Applied Geology, Oil and Gas Business and Geodesy» (Perm, November 18–19, 2020)]. Perm-Ekaterinburg, 2020, pp. 136–143. ISBN 978-5-398-02458-6. EDN: HLVNYS. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 30.03.2023; одобрена после рецензирования 12.04.2023; принята к публикации 27.04.2023.

The article was submitted 30.03.2023; approved after reviewing 12.04.2023; accepted for publication 27.04.2023.

Научная статья

УДК 004.383.3

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-159-169

## КЛАССИФИКАЦИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ТРАНСПОРТЕ

*Александр Сергеевич Филипченко**Alexander S. Filipchenko**аспирант отраслевого центра подготовки научно-педагогических кадров высшей квалификации, кафедра «Вычислительные системы, сети и информационная безопасность»,**Российский университет транспорта, Москва, Россия*

### Актуальность

На сегодняшний день достаточно остро стоит проблема увеличения быстродействия вычислительных систем. До недавнего времени рост производительности вычислительных систем достигался за счёт увеличения количества транзисторов на кристалле по закону Мура. Однако в настоящее время уже изобретены логические вентили, размеры которых сопоставимы с отдельными атомами и молекулами. Так уже различные типы фундаментальных логических вентилей были построены с использованием молекул, которые основаны на химических входах и спектроскопических выходах. Это обстоятельство накладывает физическое ограничение на дальнейшее увеличение числа транзисторов на кристалле. Таким образом, увеличение быстродействия вычислительных систем в современных условиях возможно только за счёт распараллеливания. Для эффективной организации параллельного вычислительного процесса необходимо иметь представление о функциональных возможностях конкретных вычислительных систем.

### Цель исследования

В данной статье ставится цель рассмотреть ряд специализированных вычислительных систем на транспорте и попытаться классифицировать их по ряду оснований. Классификация позволит структурировать ряд разработок в области специализированных вычислительных систем на транспорте, объединив их в единую централизованную и связанную систему. Ставится цель выяснить, какими отличительными свойствами обладают существующие специализированные вычислительные системы на транспорте, и определить, какие из этих свойств преобладают, а какие являются более редкими. По результатам классификации ставится цель подготовить обобщённые выводы об особенностях исследуемых вычислительных системах.

### Методы исследования

В статье рассматривается ряд специализированных вычислительных систем на транспорте. В процессе анализа выделяются их отличительные свойства и характеристики. По полученным свойствам разрабатываются основания классификации. Цель данной классификации

### Ключевые слова

классификация,  
специализированные  
вычислительные системы,  
транспорт, анализ  
патентов, отличительные  
свойства,  
распараллеливание

детерминирована практическими и теоретическими потребностями, связанными с моделированием параллельных специализированных вычислительных систем. В качестве базы знаний для анализа примеров специализированных вычислительных систем на транспорте будет использоваться Российский индекс научного цитирования.

### Результаты

В статье представлен обзор специализированных вычислительных систем, используемых в транспортной отрасли, отмечаются характерные свойства, определяющие их специализацию и функциональное назначение, отражаются ключевые характеристики данных специализированных вычислительных систем, отличающие их друг от друга. На основе полученного массива характеристик определяются основания для классификации специализированных вычислительных систем на транспорте. В заключении строится таблица, отражающая зависимости между выделенными основаниями, классами и рассмотренными объектами. В выводах представлены обоснования и интерпретация обнаруженных зависимостей.

**Для цитирования:** Филипченко А. С. Классификация специализированных вычислительных систем на транспорте // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 2. Т. 19. С. 159-169. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-159-169>.

Original article

## CLASSIFICATION OF SPECIALIZED COMPUTING SYSTEMS IN TRANSPORT

### Relevance

Today, the problem of increasing the speed of computing systems is quite acute. Until recently, the increase in the performance of computing systems was achieved by increasing the number of transistors on a chip according to Moore's law. However, at present, logic gates have already been invented, the dimensions of which are comparable to individual atoms and molecules. So already various types of fundamental logic gates have been built using molecules that are based on chemical inputs and spectroscopic outputs. This circumstance imposes a physical limitation on a further increase in the number of transistors on a chip. Thus, an increase in the speed of computing systems in modern conditions is possible only through parallelization. For the effective organization of a parallel computing process, it is necessary to have an idea of the functionality of specific computing systems.

### Aim of research

The main aim of the research is to consider a number of specialized computing systems in transport and try to classify them on a number of grounds. The classification will allow structuring a number of developments in the field of specialized computing systems in transport, combining them into a single centralized and connected system. The goal is to find out what distinctive properties the existing specialized computing systems in transport have and to determine which of these properties prevail and which are rarer. Based on the results of the classification, the goal is to prepare generalized conclusions about the features of the computer systems under study.

### Keywords

classification, specialized computing systems, transport, patent analysis, distinctive properties, parallelization

### Research methods

The article considers a number of specialized computing systems in transport. In the process of consideration, their distinctive properties and characteristics are highlighted. Based on the properties obtained, the basis for the classification is developed. The purpose of this classification is determined by the practical and theoretical needs associated with the simulation of parallel specialized computing systems. The Russian Science Citation Index will be used as a knowledge base for analyzing examples of specialized computing systems in transport.

### Results

The article provides an overview of specialized computing systems used in the transport industry. In the process of review, characteristic properties are noted that determine their specialization and functional purpose. The key characteristics of these specialized computing systems that distinguish them from each other are reflected. On the basis of the obtained array of characteristics, the grounds for the classification of specialized computing systems in transport are determined. In conclusion, a table is constructed that reflects the dependencies between the selected bases, classes and the considered objects. The conclusions present the rationale and interpretation of the discovered dependencies.

**For citation:** Filipchenko A. S. Klassifikatsiya spetsializirovannykh vychislitel'nykh sistem na transporte [Classification of Specialized Computing Systems in Transport]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 2, Vol. 19, pp. 159-169. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-159-169>.

### Введение

Под специализированными вычислительными системами понимаются вычислительные системы, спроектированные и разработанные для решения узкого спектра определённых прикладных задач. Таким образом, специализация вычислительной системы определяется классом решаемых ею задач. Цель разработки и изучения такого рода вычислительных систем заключается в повышении эффективности использования автоматизации путём использования особой аппаратной архитектуры, набора периферийных устройств, программистской модели и других особенностей.

Наряду с углублением специализации вычислительных машин, которое обусловлено рядом специфических для транспорта задач, остро стоит и вопрос увеличения производительности вычислений. При этом увеличение быстродействия в условиях, когда размеры отдельных логических вентилях сопоставимы с размерами отдельных атомов и молекул,

возможно только за счёт распараллеливания вычислительного процесса.

До недавнего времени рост производительности вычислительных систем достигался за счёт увеличения количества транзисторов на кристалле по закону Мура. Однако в настоящее время уже изобретены логические вентиля, размеры которых сопоставимы с отдельными атомами и молекулами. Так уже различные типы фундаментальных логических вентилях были построены с использованием молекул, которые основаны на химических входах и спектроскопических выходах [1]. Это обстоятельство накладывает физическое ограничение на дальнейшее увеличение числа транзисторов на кристалле.

В связи с этим возникает потребность проанализировать характеристики существующих специализированных вычислительных систем на транспорте с целью их классификации по ряду оснований. В частности, это — классификация по степени распараллеливания, по типам сете-

вого взаимодействия для организации распределённых вычислений, по степени модульности и по другим основаниям, которые имеют значение для выбора прототипной вычислительной системы для дальнейших исследований в данной области знания.

### Характеристика существующих специализированных вычислительных систем на транспорте

Рассмотрим электронные вычислительные машины (ЭВМ), использующиеся в диспетчерской централизованной системе оперативного управления объектами инфраструктуры железной дороги [2]. В данной системе присутствуют две специализированные вычислительные системы, расположенные в верхнем иерархическом уровне: ЭВМ «Связь-ФЛ» и ЭВМ «Связь-ОВС». Обе вычислительные машины работают под управлением дисковой операционной системы фирмы Microsoft «MS DOS». Компоненты вычислительных систем конструктивно объединены в один корпус, то есть представляют собой монолит. Обе специализированные вычислительные системы

используют «Ethernet» для передачи данных в локальную вычислительную сеть (ЛВС). ЭВМ связываются на нижнем иерархическом уровне с блоками контролируемого пункта модернизированными (БКПМ).

Специализация данных вычислительных систем выражается в типах связи с БКПМ:

— ЭВМ «Связь-ФЛ» передаёт сигналы по Физической Линии связи через модем ТСМ-У;

— ЭВМ «Связь-ОВС» передаёт сигналы по Оптоволоконной Связи через адаптер G.703.1.

Обе специализированные вычислительные системы работают в автономном режиме, не требуя участия оперативного персонала. В системе эти ЭВМ выполняют функцию передачи команд телеуправления и приёма ответных импульсов телесигнализации. Архитектурные особенности данных специализированных вычислительных систем в патенте не детализируются. На рисунке 1 показаны связи рассматриваемых ЭВМ с ЛВС и БКПМ.

В данных специализированных вычислительных системах параллелизм может применяться для параллельной

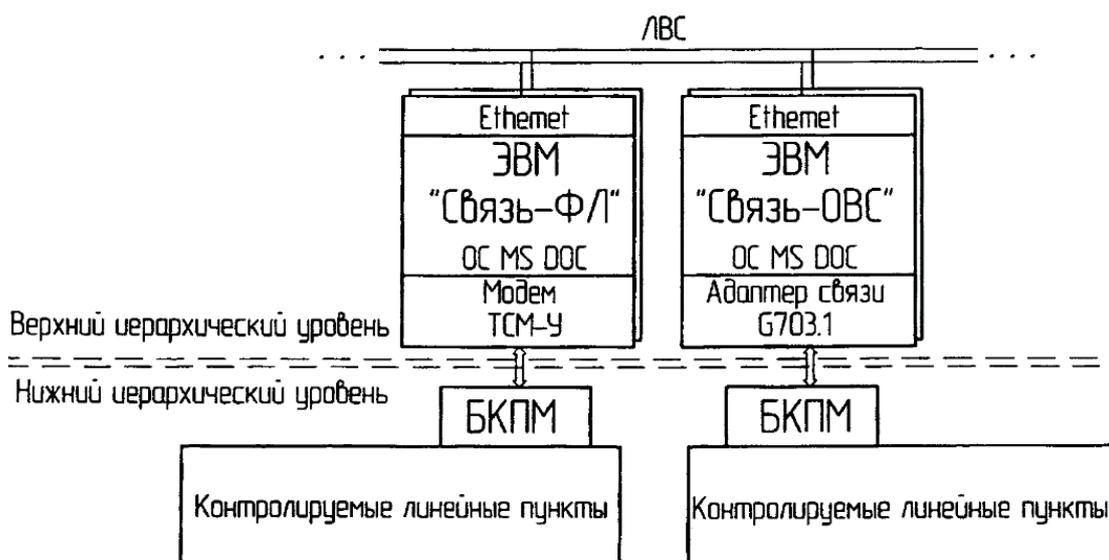


Рисунок 1. Связи ЭВМ «Связь-ФЛ» и ЭВМ «Связь-ОВС» с ЛВС и БКПМ

Figure 1. Communications of the computer «Svyaz-FL» and the computer «Svyaz-OVS» with the LAN and blocks of the controlled point modernized

обработки импульсов телесигнализации, а также для формирования конвейера команд управления для нескольких БКПМ.

Следующей специализированной вычислительной системы, патент на которую удалось найти в свободном доступе, является универсальная информационно-обучающая и контролирующая система «ТОРВЕСТ-ИОКС» [3]. Фотография данной специализированной вычислительной системы приведена на рисунке 2.

Эта специализированная вычислительная система предназначена для обучения оператора управления тяговым подвижным составом железных дорог. Ядро данной специализированной вычислительной системы построено на базе персонального компьютера (ПК) общего назначения. Специализация указанной вычислительной системы заключается в обилие разного рода периферийных устройств (ПУ). В частности, к таким ПУ относятся несколько сенсорных мониторов, устройства визуализации, модуль питания, а также различные джойстики, имитирующие органы управления.

В связи с тем, что в ядре данной специализированной вычислительной системы используется штатный ПК,

задача распараллеливания в данном случае сужается до увеличения быстродействия системы в целом и до уменьшения времени отклика от ПУ в частности. Также легко предположить, что поскольку система основывается на обычном ПК, её можно отнести как к системам высокого уровня, так и к системам, способным на сетевое взаимодействие с другими вычислительными системами.

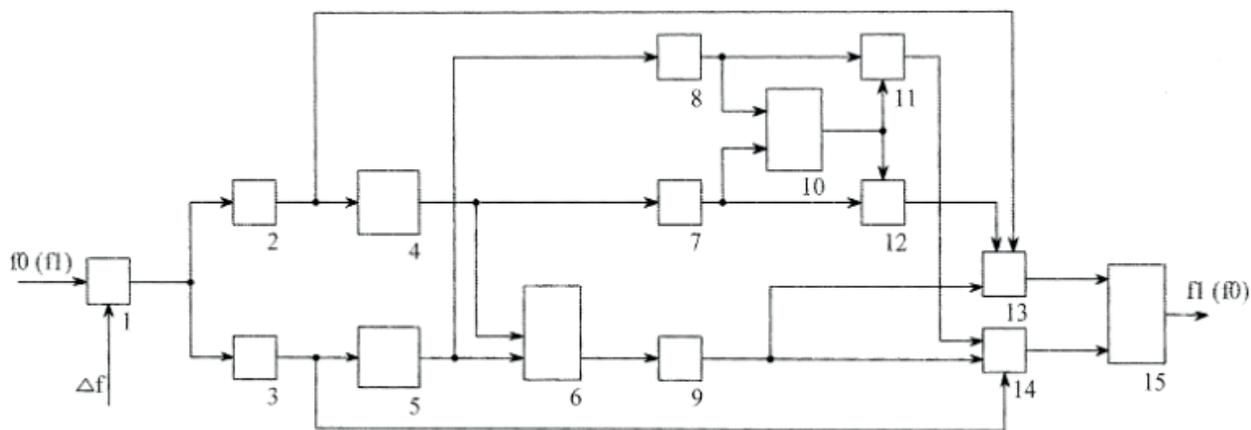
Далее рассмотрим радиочастотный безопасный логический элемент «не», который может быть использован для построения контроллеров с целью создания критичных систем управления железнодорожным транспортом [4]. Данный логический элемент можно рассматривать как примитивную низкоуровневую вычислительную систему, выполняющую «вычисление» инвертированного варианта входного сигнала.

Отличительной чертой данного монолитного логического элемента является обеспечение надёжности выполнения указанной булевой функции путём обработки попадания на вход смеси сигналов при коротком замыкании. В данном случае происходит переход элемента в так называемое «безопасное состояние». Принципиальная схема элемента представлена на рисунке 3.



**Рисунок 2.** Фотография «ТОРВЕСТ-ИОКС»

**Figure 2.** Photo of «TORVEST-IOKS»



**Рисунок 3.** Принципиальная схема радиочастотного безопасного логического элемента «не»

**Figure 3.** Schematic diagram of an RF safe gate «not»

Очевидно, что настолько низкоуровневое и простое вычислительное устройство не обладает возможностью и потребностью выхода в сеть. Оператор данному элементу не требуется, так как весь процесс вычисления протекает автоматически путём заранее определённого преобразования электрических сигналов.

Цифрами на рисунке обозначаются:

1 — смеситель;  
2, 3 — полосовые фильтры;  
4, 5 — вычислители огибающей сигнала;

6, 15 — сумматоры;

7, 8, 9 — пороговые элементы;

10 — сумматор по модулю 2;

11, 12 — конъюнктеры;

13, 14 — аналоговые ключи.

Тот же набор характеристик можно дать радиочастотному безопасному логическому элементу «и» [5]. Выполнять распараллеливание таких элементарных операций не имеет смысла. Более того, оно может нарушить логику принципиальной схемы, значительно усложнить её, а также привести к снижению уровня надёжности.

Теперь рассмотрим патент на систему определения координат вагонов в парке станции [6]. Специализация данной вычислительной системы заключается в наличии ряда нестандартных аппаратных модулей, использующихся для

управления и взаимодействия с лазерным устройством. По наличию в системе программного комплекса можно судить о высокоуровневом характере специализированной вычислительной системы. Связи типа «Ethernet» свидетельствуют о распределённом характере системы и возможности её сетевого взаимодействия. Структурная схема системы показана на рисунке 4.

Цифрами и буквой на рисунке обозначаются:

1, N — сканирующие лазерные модули;

2 — блок управления;

3 — электродвигатель с кодирующим устройством;

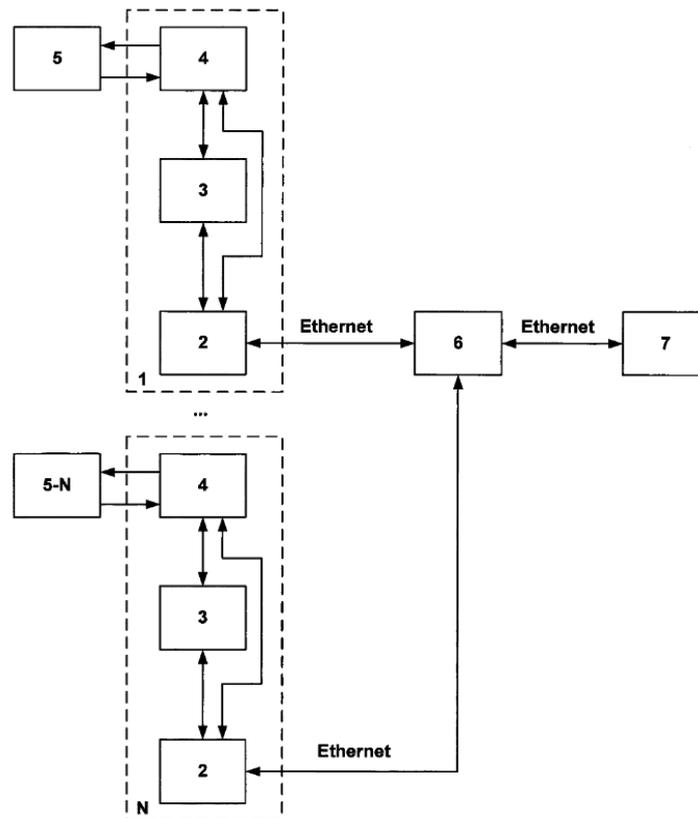
4 — лазерный приёмопередатчик;

5, 5-N — вагоны;

6 — программно-аппаратный вычислительный комплекс;

7 — комплексная система автоматизированного управления сортировочным процессом.

Специализированная вычислительная система применяется в системах автоматики, так что наличие оператора не требуется. В данной системе распараллеливание может быть применено для одновременной обработки ряда информационных потоков от лазеров. Такой подход обеспечит получение данных по нескольким вагонам за один такт синхронизации.



**Рисунок 4.** Структурная схема системы определения координат вагонов в парке станции

**Figure 4.** Structural diagram of the system for determining the coordinates of cars in the station park

Помимо физических специализированных вычислительных систем на железнодорожном транспорте получили распространение логические специализированные вычислительные системы. Одна из таких систем — система программной роботизации RPA Robin, которая вместо классического скриптового подхода к автоматизации использует имитационную автоматизацию RPA [7]. Идея такого рода автоматизации заключается не в программном взаимодействии с API информационных систем, а путём описания и повторения логики работы системного администратора. Такого рода логические специализированные системы имеют определённый потенциал для распараллеливания [8, 9].

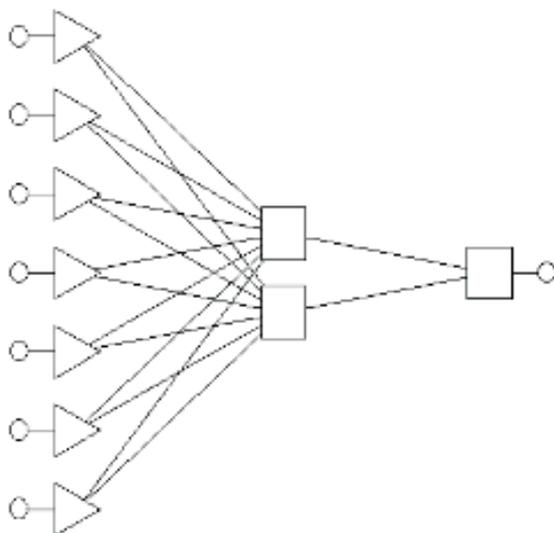
Далее познакомимся с программно-аппаратной системой планирования маневровой работы на промышлен-

ном железнодорожном транспорте [10]. В статье описывается некая абстрактная специализированная вычислительная система, которая позволит в автоматическом режиме решать математическую задачу планирования маневровой работы на железнодорожном транспорте. Аппаратная платформа данной специализированной вычислительной системы, а также её физические компоненты в статье не рассматриваются. Однако по критерию Фишера была доказана адекватность решения данной задачи путём использования нейронных сетей.

На основании этой информации можно сделать вывод, что центральным компонентом указанной специализированной вычислительной системы будет являться многослойный персептрон, в ядре которого используются сумматоры. Графическая модель персептрона, кото-

рый предлагается использовать в данной специализированной вычислительной системе, представлен на рисунке 5.

Информация для работы системы добывается из табличного файла стандартного офисного пакета. Из этого можно сделать вывод, что рассматриваемая специализированная вычислительная система находится на верхнем иерархическом уровне. Возможность связи с другими вычислительными системами в статье не описывается. Нейросетевые алгоритмы поддаются распараллеливанию, так что в данном случае такой подход поможет ускорить решение задачи.



**Рисунок 5.** Многослойный перцептрон для задачи планирования маневровой работы

**Figure 5.** Multilayer perceptron for the task of planning shunting work

В данном случае использование нейронных сетей обусловлено тем, что данный математический аппарат является важнейшим инструментом для формирования прогнозных значений. Такого рода технологический базис позволяет эффективно принимать управленческие решения [11], в том числе в транспортной области.

Рассмотрим последнюю специализированную вычислительную систему в

нашем списке на примере программно-аппаратных средств бортовой системы автоматизированного ведения поезда [12]. В ядре данной специализированной вычислительной системы лежит центральное микропроцессорное вычислительное устройство. Особенность этого микропроцессора заключается в том, что помимо бортовой базы данных он оборудован двумя нестандартными блоками, а именно:

- блоком управления (БУ) движением локомотива, формирующим команды управления тяговой и тормозной системами;
- блоком вычисления (БВ) траектории движения, рассчитывающим оптимальную программу ведения поезда.

Структура связей в микропроцессоре показана на рисунке 6. Данное микропроцессорное ядро работает непосредственно с физическими сигналами, а, следовательно, данную специализированную вычислительную систему можно отнести к вычислительным системам низкого уровня. Центральное микропроцессорное устройство в данной системе является монолитным и не подразделяется на микроядра. В системе присутствуют коммуникационный модуль и терминал управления для оператора, однако они находятся за пределами специализированного ядра и не относятся к нему непосредственно, то есть само специализированное ядро можно считать автономным и несетевыми.

Рассмотренное центральное микропроцессорное вычислительное устройство специализируется на нестандартных БМП. Функционально оно играет роль управления ведением поезда. Задачу распараллеливания на данной специализированной вычислительной системе имеет смысл разбить по блокам:

- для БУ распараллеливание вычислительного процесса нецелесообразно, так как команды к тяговым и тормозным

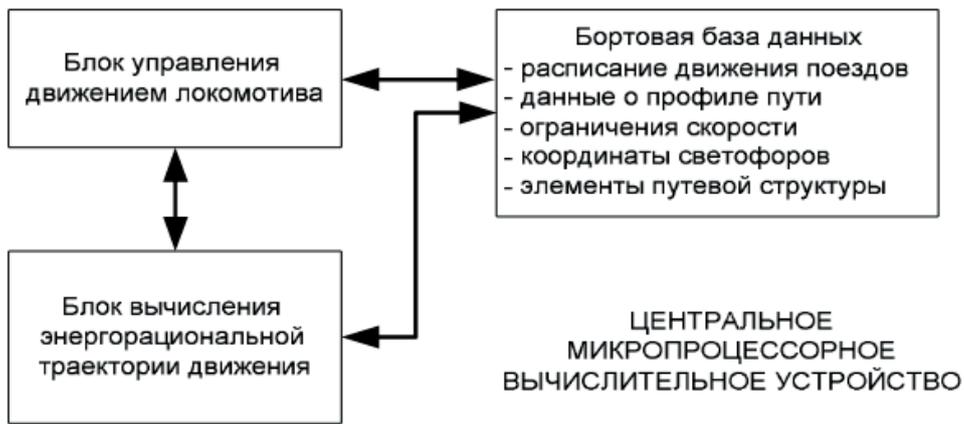


Рисунок 6. Связи между блоками микропроцессора (БМП)

Figure 6. Communications between microprocessor units (MPU)

системам должны поступать строго последовательно, для обеспечения максимальной надёжности и безопасности;  
— для БВ параллельное вычисление имеет смысл и может пригодиться для увеличения производительности и точности получаемой траектории.

**Классификация специализированных вычислительных систем на транспорте**

В заключении, объединив все полученные характеристики конкретных специализированных вычислительных

систем на транспорте, мы получаем набор оснований для классификации:

- по иерархическому уровню;
- по степени централизованности;
- по возможности сетевого взаимодействия;
- по автономности;
- по применимости распараллеливания.

В таблице 1 обозначим определённые классы по указанным основаниям и сопоставим их с примерами конкретных объектов, в роли которых будут выступать рассмотренные специализированные вычислительные системы на транспорте.

Таблица 1. Классификация специализированных вычислительных систем на транспорте

Table 1. Classification of specialized aircraft in transport

Основания классификации	Классы	Объекты
По иерархическому уровню	Высокоуровневые	[2], [3], [6], [10]
	Низкоуровневые	[4], [5], [12]
По степени централизованности	Монолитные	[2], [3], [4], [5], [10], [12]
	Распределённые	[6]
По возможности сетевого взаимодействия	Сетевые	[2], [3], [6]
	Несетевые	[4], [5], [12]
По автономности	Автономные	[2], [4], [5], [6], [12]
	Операторные	[3]
По распараллеливанию	Полностью распараллеливаемые	[2], [3], [6], [12]
	Частично распараллеливаемые	[12]
	Нераспараллеливаемые	[4], [5]

## Выводы

В выводах отметим, что объекты в классе «Высокоуровневые» соответствуют объектам класса «Сетевые», а объекты класса «Низкоуровневые» соответствуют объектам класса «Несетевые». Объяснение этому явлению можно найти в сетевой модели OSI. Согласно этой модели для сетевого взаимодействия двух систем требуются не только низкие уровни, такие как, например, физический или канальный, но и высокие, такие как прикладной, представительский и сеансовый [13].

Также произошло совпадение объектов в классах «Высокоуровневые» и «Полностью распараллеливаемые». Это связано с тем, что в высокоуровневые системы зачастую комплексны, благодаря чему общий функционал системы

легко подвергается декомпозиции на подзадачи, которые могут быть выполнены независимо друг от друга.

По построенной классификации можно сделать вывод, что практически все специализированные вычислительные системы на транспорте являются монолитными и автономными. Данная особенность вытекает из предназначения этих вычислительных систем: разработчикам требуется, чтобы они были достаточно простые, компактные и работали без участия человека. Исключения составляют обучающие вычислительные системы, где без оператора обойтись невозможно, а также вычислительные системы, решающие задачи в пространствах большого масштаба, которые устанавливают требование распределённого сбора информации.

## Список источников

1. Erbas-Cakmak S., Kolemen S., Sedgwick, Adam C., Gunnlaugsson T., James T.D., Yoon J., Akkaya E.U. Molecular Logic Gates: the Past, Present and Future // *Chemical Society Reviews*. 2018. P. 2228–2248.
2. Пат. на полезную модель 103790 U1 РФ, МПК В 61 L 27/00. Диспетчерская централизованная система оперативного управления объектами инфраструктуры железной дороги / А.А. Кочетков, М.В. Романенков, А.И. Каменев [и др.]. 2010132710/11, Заявлено 04.08.2010; Оpubл. 27.04.2011.
3. Пат. на полезную модель 137410 U1 РФ, МПК G 09 В 9/02. Универсальная информационно-обучающая и контролирующая система «ТОРВЕСТ-ИОКС» / В.Е. Попов, А.Ю. Брылин. 2013130054/11, Заявлено 01.07.2013; опубл. 10.02.2014.
4. Пат. 2533447 С1 РФ, МПК Н 03 К 19/20. Радиочастотный безопасный логический элемент «не» / И.Д. Долгий, А.Г. Кулькин, С.А. Кулькин и др. 2013129725/08, Заявлено 28.06.2013; Оpubл. 20.11.2014.
5. Пат. 2533449 С1 РФ, МПК Н 03 К 19/20. Радиочастотный безопасный логический элемент «и» / И.Д. Долгий, А.Г. Кулькин, С.А. Кулькин и др. 2013145417/08, Заявлено 10.10.2013; Оpubл. 20.11.2014.
6. Пат. 2578703 С1 РФ, МПК В 61 L 25/02. Система определения координат вагонов в парке станции / В.Я. Носков, Л.Г. Аверьянов, К.А. Игнатков. 2014151848/11, Заявлено 22.12.2014; Оpubл. 27.03.2016.
7. Hofmann P., Samp C., Urbach N. Robotic Process Automation // *Electron Markets*. 2020. P. 99–106.
8. Larina T.B., Filipchenko A.S. Experiments with Multi-Threaded Processing in RPA Robin // *Information Innovative Technologies: Intern. Scient.-Pract. Conf., Prague, 25–29 April 2022*. Moscow: Association of Graduates and Employees of AFEA Named after prof. Zhukovsky, 2022. P. 245–252.
9. Larina T.B., Filipchenko A.S. Features of Operations Parallelization in RPA Systems // *Information Innovative Technologies: Intern. Scient.-Pract. Conf., Prague, 25–29 April 2022*. Moscow: Association of Graduates and Employees of AFEA Named after prof. Zhukovsky, 2022. P. 239–245.
10. Нечай Т.А., Короп Г.В., Роганова Э.В. и др. Программно-аппаратная система планирования маневровой работы на промышленном железнодорожном транспорте // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. 2019. Т. 8. № 1(45). С. 12–16. EDN: CQXPXV.
11. Pen T.V. Solving Economic Problems of Time Series Forecasting Using Neural Networks // *Актуальные научные исследования: сб. ст. VI Междунар. науч.-практ. конф.: в 4 ч., Пенза, 05 июня 2022 года. Ч. 3*. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. P. 57–58.

12. Юренко К.И., Фандеев Е.И. Компьютерная модель и программно-аппаратные средства бортовой системы автоматизированного ведения поезда // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 5 (130). С. 51–56. EDN: OYDWAV.

13. Litvinyuk S., Petukhov A., Pilyugin P. Managing Security Policies at Various Levels of the ISO\OSI Model in SDN (Methods of Formal Calculation for Network Level Security Policies) // Modern Network Technologies (MoNeTec-2022): тр. 4-й Междунар. конф. (короткие и стендовые доклады), Москва, 27–29 октября 2022 года. М.: Изд-во Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 2022. Р. 38–42.

### References

1. Erbas-Cakmak S., Kolemen S., Sedgwick, Adam C., Gunnlaugsson T., James T.D., Yoon J., Akkaya E.U. Molecular Logic Gates: the Past, Present and Future. *Chemical Society Reviews*, 2018, pp. 2228–2248.

2. Kochetkov A.A., Romanenkov M.V., Kamenev A.I. e.a. *Dispetcherskaya tsentralizovannaya sistema operativnogo upravleniya ob'ektami infrastruktury zheleznoi dorogi* [Molecular Logic Gates: the Past, Present and Future]. Patent na poleznuyu model No. 103790, 2011. [in Russian].

3. Popov V.E., Brylin A.Yu. *Universal'naya informatsionno-obuchayushchaya i kontroliruyushchaya sistema «TORVEST-IOKS»* [Universal Information-Training and Control System «TORVEST-IOKS»]. Patent na poleznuyu model No. 137410, 2014. [in Russian].

4. Dolgii I.D., Kul'kin A.G., Kul'kin S.A. e.a. *Radiochastotnyi bezopasnyi logicheskii element «ne»* [Radio Frequency Safe Logic «Not»]. Patent No. 2533447, 2014. [in Russian].

5. Dolgii I.D., Kul'kin A.G., Kul'kin S.A. e.a. *Radiochastotnyi bezopasnyi logicheskii element «i»* [Safe Logic Element «And»]. Patent No. 2533449, 2014. [in Russian].

6. Noskov V.Ya., Aver'yanov L.G., Ignatkov K.A. *Sistema opredeleniya koordinat vagonov v parke stantsii* [System for Determining the Coordinates of Wagons in the Station Fleet]. Patent No. 2578703, 2016. [in Russian].

7. Hofmann P., Samp C., Urbach N. Robotic Process Automation. *Electron Markets*, 2020, pp. 99–106.

8. Larina T.B., Filipchenko A.S. Experiments with Multi-Threaded Processing in RPA Robin. *International Scientific-Practical Conference*

«*Information Innovative Technologies*», Prague, 25–29 April 2022. Moscow, Association of Graduates and Employees of AFEA Named after prof. Zhukovsky, 2022, pp. 245–252.

9. Larina T.B., Filipchenko A.S. Features of Operations Parallelization in RPA Systems. *International Scientific-Practical Conference «Information Innovative Technologies*», Prague, 25–29 April 2022. Moscow, Association of Graduates and Employees of AFEA Named after prof. Zhukovsky, 2022, pp. 239–245.

10. Nechai T.A., Korop G.V., Roganova E.V. e.a. *Programmno-apparatnaya sistema planirovaniya manevrovoi raboty na promyshlennom zheleznodorozhnom transporte* [Software-Hardware System Planning Maneuver Work of Industrial Railway Transport]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus — XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present Plus*, 2019, Vol. 8, No. 1 (45), pp. 12–16. EDN: CQXPXV. [in Russian].

11. Pen T.V. Solving Economic Problems of Time Series Forecasting Using Neural Networks. *Sbornik statei VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye nauchnye issledovaniya»: v 4 ch., Penza, 05 iyunya 2022 goda* [Collection of Articles of the VI International Scientific and Practical Conference «Actual Scientific Research»: in 4 Ch., Penza, June 05, 2022]. Penza, Nauka i Prosveshchenie (IP Gulyaev G.Yu.), 2022, Ch. 3, pp. 57–58.

12. Yurenko K.I., Fandeev E.I. Komp'yuternaya model' i programmno-apparatnye sredstva bortovoi sistemy avtomatizirovannogo vedeniya poezda [Computer Model and Hardware-Software On-Board Systems of Automated Driving of the Train]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki — Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences*, 2012, No. 5 (130), pp. 51–56. EDN: OYDWAV. [in Russian].

13. Litvinyuk S., Petukhov A., Pilyugin P. Managing Security Policies at Various Levels of the ISO\OSI Model in SDN (Methods of Formal Calculation for Network Level Security Policies). *Trudy 4-i Mezhdunarodnoi konferentsii «Modern Network Technologies (MoNeTec-2022)» (korotkie i stendovye doklady)*, Moskva, 27–29 oktyabrya 2022 goda [Proceedings of the 4th International Conference «Modern Network Technologies (MoNeTec-2022)» (short and poster presentations), Moscow, October 27–29, 2022.]. Moscow, Izd-vo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta im. M.V. Lomonosova, 2022, pp. 38–42. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 12.04.2023; одобрена после рецензирования 11.05.2023; принята к публикации 18.05.2023.

The article was submitted 12.04.2023; approved after reviewing 11.05.2023; accepted for publication 18.05.2023.

Научная статья

УДК 681.5

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-170-180

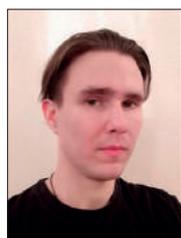
## РАЗРАБОТКА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ, МОДЕЛИРУЮЩЕГО ПРОЦЕССЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА В ИГРОВОМ ДВИГАТЕЛЕ UNITY 3D PERSONAL



*Екатерина Анатольевна Шулаева*

*Ekaterina A. Shulaeva*

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Институт химических технологий и инжиниринга, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Стерлитамаке), Стерлитамак, Россия*



*Владимир Игоревич Данилов*

*Vladimir I. Danilov*

*студент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Институт химических технологий и инжиниринга, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Стерлитамаке), Стерлитамак, Россия*

### Актуальность

С течением времени мышление людей начинает меняться. Они по-другому воспринимают информацию, по-другому её анализируют, вследствие чего у них может сложиться неправильное представление о каком-либо явлении или процессе. На сегодняшний день для обучения применяются письменные источники, различные иллюстрации, иногда видеоматериалы. Однако обучение означает не только накопление знаний, но и их осознание, встраивание их в сумму уже имеющегося опыта учащегося. И чтобы это произошло, не всегда достаточно прочитать нужную книгу. Когда речь идет о том, что человек должен не просто узнать что-то новое, а освоить, осознать и применить полученные знания на практике, то без отработки изученного материала на опыте обойтись невозможно. Обучение на основе компьютерных игр дает прекрасные возможности для обучения. Конечно, в реальной жизни можно смоделировать ту или иную ситуацию в учебных целях, но это далеко не просто и требует достаточно больших временных и материальных затрат. К тому же, смоделировать целую систему ситуаций или даже целый виртуальный мир – это задача как раз для компьютерных игр.

Развитие образовательного процесса в учебных заведениях требует постоянного совершенствования, и в наше время есть возможность использовать компьютерные системы обучения. Для подготовки потенциальных кадров требуется разработка высокотехнологичных компьютерных приложений, использующих современные технологии виртуальной реальности. Данные приложения помогут улучшить понимание

### Ключевые слова

игра, приложение, обучение, 3D-моделирование, программирование, виртуальная реальность, алгоритм, симуляция, игрофикация, компьютерные системы обучения

производственных процессов и позволят развивать навыки работы.

Данные приложения должны поддерживать свободное перемещение по объекту технологического процесса, чтобы пользователь сам выбирал, какой элемент изучить. Приложения должны правильно отображать ход технологического процесса, его параметры, а также содержать информацию в текстовом или звуковом формате о процессе и его элементах.

#### **Цель исследования**

Разработка образовательного приложения в жанре симулятор, моделирующего устройство и работу цеха нейтрализации и очистки сточных вод на производственных предприятиях в среде разработки UNITY 3D PERSONAL.

#### **Методы исследования**

Среда программирования UNITY 3D PERSONAL.

#### **Результаты**

В статье представлена разработка приложения, предназначенного для реализации функций обучения студентов и школьников на базе Института химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета, и отработки техники безопасности сотрудниками производственных предприятий.

**Для цитирования:** Шулаева Е. А., Данилов В. И. Разработка образовательного приложения, моделирующего процессы промышленного производства в игровом двигателе UNITY 3D PERSONAL // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 2. Т. 19. С. 170-180. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-170-180>.

Original article

## **DEVELOPMENT OF AN EDUCATIONAL APPLICATION SIMULATING INDUSTRIAL PRODUCTION PROCESSES IN THE UNITY 3D PERSONAL GAME ENGINE**

### **Relevance**

Over time, people's thinking begins to change. They perceive information differently, analyze it differently. As a result, they may have an incorrect or even rare manifestation of the process of any appearance or appearance. Today, written sources, various illustrations, and sometimes video materials are used for use. However, learning means not only the accumulation of knowledge, but also their awareness, embedding them in the mass of the student's already existing experience. If this happens, the requested book will not always be sufficient. When it comes to the fact that a person should not just learn something new, but master, comprehend and apply knowledge in practice, then it is impossible to use it without working out the study of the material on experience. Education based on computer games provides excellent opportunities for learning. Of course, in real life it is possible to simulate this or that situation in the field of application, but this is far from simple and requires quite a lot of time and material costs. In addition, simulating a whole system of situations or even a whole virtual world is a task just for computer games.

The development of the educational process in educational institutions requires expectations, and at present there is the possibility of using computer-based learning systems. Training requires the development of high-tech computer applications using modern real-life technologies.

### **Keywords**

game, application, learning, 3D modeling, programming, virtual reality, algorithm, simulation, gamification, computer learning systems

As a result, high production processes and an increased understanding of high work skills have been achieved.

For the user chose which control. Applications must correctly display the progress of the technological process, its parameters, as well as information in texts or audio format about the process and its elements.

#### **Aim of research**

Development of an educational application in the genre of a simulator that simulates the structure and operation of a neutralization and wastewater treatment plant at manufacturing enterprises in the UNITY 3D PERSONAL development environment.

#### **Research methods**

UNITY 3D PEROSNAL programming environment.

#### **Results**

This article presents the development of an application designed to implement the functions of teaching students and schoolchildren on the basis of Institute of Chemical Technology and Engineering, Ufa State Petroleum Technological University, working out safety precautions by employees of manufacturing enterprises.

**For citation:** Shulaeva E. A., Danilov V. I. Razrabotka obrazovatel'nogo prilozheniya, modeliruyushchego protsessy promyshlennogo proizvodstva v igrovom dvigatele UNITY 3D PERSONAL [Development of an Educational Application Simulating Industrial Production Processes in the UNITY 3D PERSONAL Game Engine]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 2, Vol. 19, pp. 170-180. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-170-180>.

На сегодняшний день для обучения применяются письменные источники, различные иллюстрации, иногда видеоматериалы [1]. Однако обучение означает не только накопление знаний, но и их осознание, встраивание их в сумму уже имеющегося опыта учащегося. И чтобы это произошло, не всегда достаточно прочитать нужную книгу. Когда речь идет о том, что человек должен не просто узнать что-то новое, а освоить, осознать и применить полученные знания на практике, то без отработки изученного материала на опыте обойтись невозможно. Обучение на основе компьютерных игр дает прекрасные возможности для обучения.

Компьютерные игры для обучения являются результатом игрофикации, которая применяется во многих областях жизнедеятельности человека. Игрофикация (геймификация от англ. gamification) — применение подходов, характерных для компьютерных игр, в программных инструментах для неигровых процессов с целью привлечения пользо-

вателей и потребителей, повышения их вовлеченности в решение прикладных задач, использование продуктов, услуг [2–4].

Разработка 3D приложений (видеоигр) обычно делится на 3 этапа: прототипирование, производство и дальнейшая поддержка.

С этапа прототипирования начинается любой проект, в нем определяется, о чем игра, зачем ее делать и что нужно для ее создания.

Производство — самый длинный этап, именно тогда игра начинает обретать форму. Ресурсы (персонажи, существа, объекты и окружение), уровни, миры создаются, устанавливаются правила игры, пишется код и многое другое [5].

Дальнейшая поддержка (пост-продакшн) — после завершения разработки и выпуска игры проект продолжает поддерживаться, и некоторые члены команды переводятся на обслуживание (исправление ошибок, создание патчей).

Производство программного продукта можно также разделить на три этапа.

1) *Создание 3D моделей используемого технологического оборудования и аппаратов, трубопроводов, клапанов и вентилей.* На данном этапе разрабатывается низко-полигональный образец из примитивов, и при помощи модификаторов ему задаётся нужная форма. Затем низко-полигональная модель путём повышения детализации становится высоко-полигональной. Из полученной модели делают развёртку, на которую наносятся текстуры [6].

2) *Работа со средой разработки программного продукта.* На этом этапе модели импортируются в среду разработки. Затем их сортируют по уровням, где они должны быть и располагают по координатам, образуя единую сцену [7].

Далее разрабатывается программный код, который реализует все задуманные механики, возможности взаимодействия.

После всех подготовок, итоговый проект компилируется, и на выходе получается рабочий программный продукт.

3) *Эксплуатация программного продукта.* Пользователь садится за ПК, запускает готовый продукт и взаимодействует с ним при помощи контроллеров: клавиатуры и мыши.

Среди многочисленного списка программ для 3D моделирования был выбран программный комплекс Blender 3D, среди его преимуществ можно выделить его бесплатное распространение, он обладает обширным методом рендера, кроссплатформенностью, многофункциональным инструментарием, бесплатной лицензией [8–10].

Зачастую упускаются или не принимаются во внимание многие детали, которые впоследствии могут дорого стоить. Для того, чтобы избежать или минимизировать эти ошибки, производится прототипирование. Прототипирование программного обеспечения (от англ. prototyping) — этап разработки про-

граммного обеспечения, процесс создания прототипа программы — макета (черновой, пробной версии) программы, обычно с целью проверки пригодности предлагаемых для применения концепций, архитектурных и/или технологических решений, а также для представления программы заказчику на ранних стадиях процесса разработки.

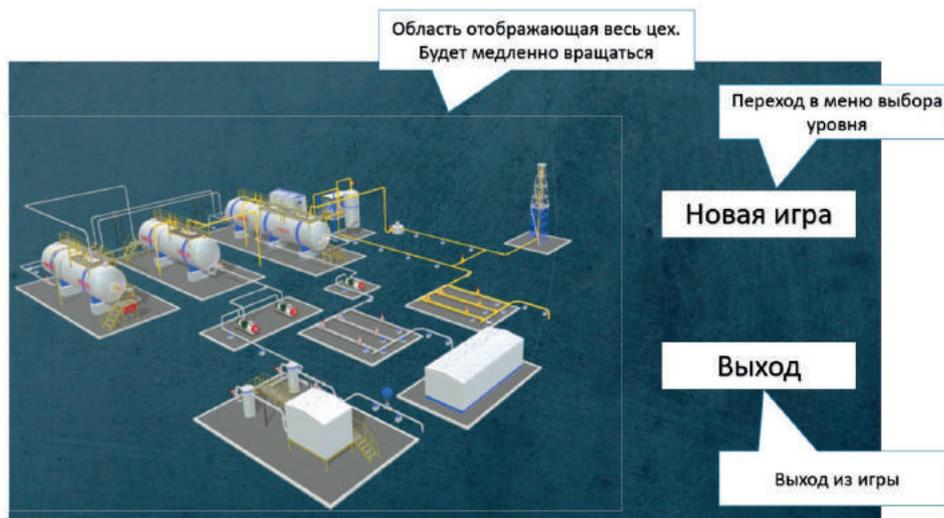
Разработка прототипа меню позволит составить список необходимых элементов, продумать их расположение на экране, сделать примерный дизайн этих элементов. Основными окнами, для которых следует сделать прототип, являются:

- главное меню — начальный экран;
- главное меню — выбор уровня;
- UI пользователя при прохождении уровня;
- меню паузы;
- окно настройки оборудования.

Также на прототипах необходимо указывать, за что отвечает каждый из элементов, показать какие из них кликабельны.

В окне начального экрана в Главном меню основными кнопками являются «Новая игра» и «Выход». Первая будет переводить пользователя в окно выбора уровня, вторая, согласно тексту, завершать работу приложения. Прототип начального экрана представлен на рисунке 1.

При открытии окна выбора уровня пользователю необходимо выбрать, какую из возможных сцен запустить. Чтобы он смог ориентироваться, необходимо предоставить информацию о тех объектах или процессах, которые присутствуют на уровне. Наиболее эффективным способом это сделать является помещение скриншота всей сцены. Также не будет лишним дать название каждой сцене, чтобы дополнить информацию об уровне. Прототип окна выбора уровня изображен на рисунке 2.



**Рисунок 1.** Прототип начального экрана Главного меню

**Figure 1.** Prototype of the initial screen of the Main menu



**Рисунок 2.** Прототип выбора уровня в Главном меню

**Figure 2.** Prototype of level selection in the Main menu

При прохождении уровня пользователь должен знать, что ему необходимо сделать, чтобы пройти данную локацию. Чтобы приложение могло обучать, на экране должны отображаться сведения об объектах или процессах, присутствующих на карте.

В случае, когда пользователю будет необходимо отлучиться, отвлечься или как-то иначе прервать прохождение, у него должна быть возможность остано-

вить все расчеты, анимации и т.д. С этой целью создается меню паузы. В нашем прототипе сбоку будут 2 кнопки: «Продолжить», «Выход». По центру будет список всех задач. Кнопка «Продолжить» восстанавливает работу всех расчетов и анимации до момента установки паузы. Кнопка «Выход» завершит прохождение уровня, что, в свою очередь, сбросит все вычисления, а также переведет пользователя на начальный экран Главного меню [11].

При настройке различного оборудования, например клапанов, должно открываться отдельное окно. В нем будут отображены действительное и требуемое значения различных параметров (расхода, уровня или водородного показателя), и с помощью управляющего элемента нужно будет привести действительное к требуемому. Однако в отличие от меню паузы открытие данного окна не будет замораживать остальные процессы, происходящие на уровне.

Примерный внешний вид окна настройки оборудования показан на рисун-

ке 3. В прототипе в Главном меню находились две кнопки и сцена уровня. Скопировав объекты из готового уровня, расположим камеру как в прототипе. Сделаем камеру дочерней по отношению к другой, которая будет выступать в роли оси вращения. Для родительского объекта пропишем скрипт, чтобы он всегда вращался [12] (рисунок 4).

Аналогично создаем на каждой из сцен Canvas объект. На уровнях будет минимум три окна, запускаемые при определенных условиях.

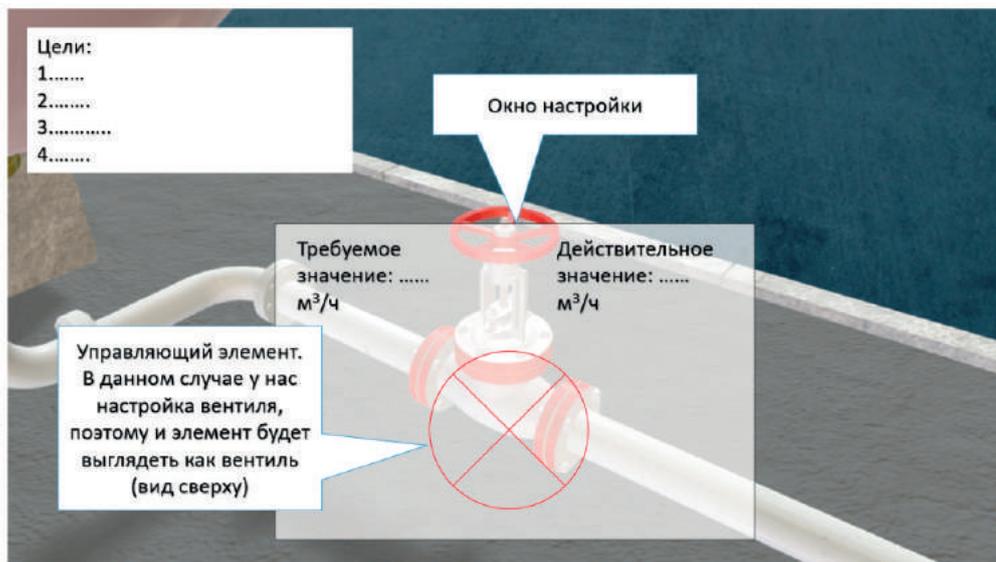


Рисунок 3. Прототип окна настройки оборудования

Figure 3. Hardware setup window prototype

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
public class AxisRotation : MonoBehaviour
{
    public Transform AxisRot;
    public float SpeedRot = 10.0f;
    void Update()
    {
        AxisRot.transform.Rotate(Vector3.up * SpeedRot * Time.deltaTime);
    }
}
```

Листинг 1.1 — Скрипт возвращения камеры

Рисунок 4. Скрипт возвращения камеры

Figure 4. Camera return script

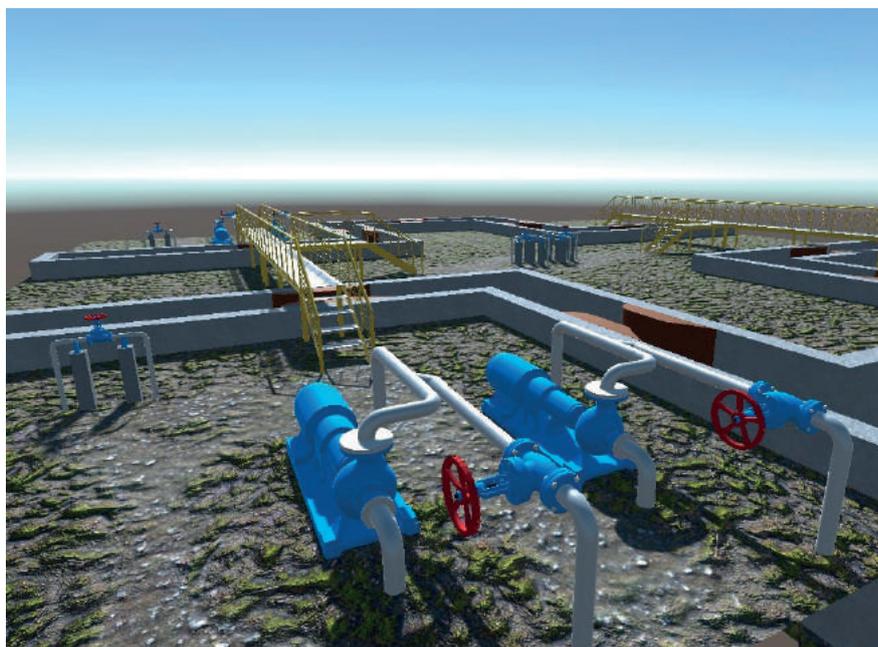
Первое окно нужно для настройки клапанов, степени их открытия. В нем будет два текстовых поля, которые будут отображать требуемое и реальное значение параметра. Текст, выводимый в поле реального значения, необходимо изменять все время при активации окна. При нажатии кнопки «Escape», окно должно закрываться.

Вторым окном будет меню «Пауза». Оно появляется при нажатии «Escape», но только при условии, что не открыто

окно настройки клапанов. Ориентируясь на прототип, добавим третью кнопку «Перезапуск». Данная кнопка, как следует из названия, будет перезапускать уровень.

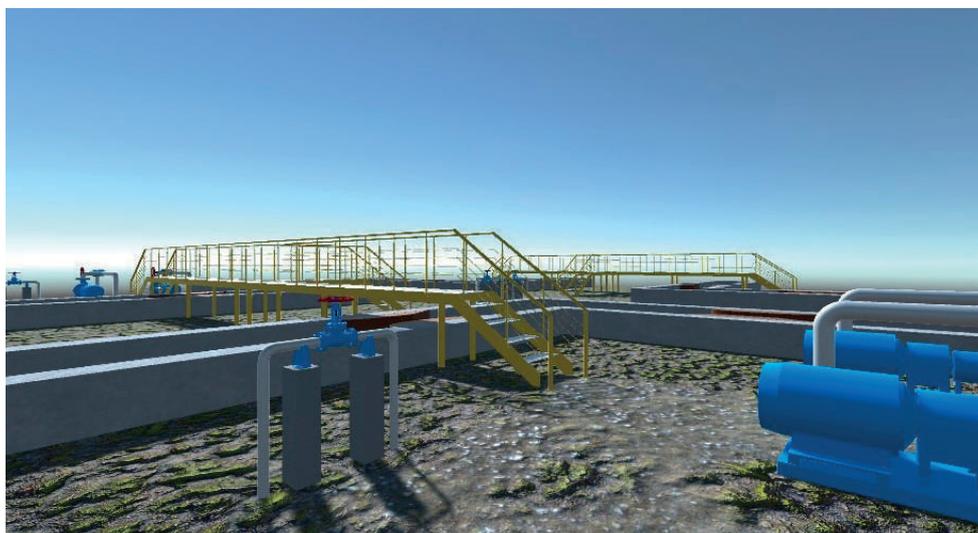
Третье окно будет появляться, если пользователь выполнил все задания. В его состав будут входить кнопки перезапуска, загрузки следующего уровня и выхода в главное меню.

На рисунках 5, 6 изображены результаты работы по моделированию модели.



**Рисунок 5.** Пример завершённого проектирования модели производства

**Figure 5.** An example of a completed production model design



**Рисунок 6.** Пример завершённого проектирования модели производства

**Figure 6.** An example of a completed production model design

Параметры положения и вращения отображаются в компоненте Transform, присущей всем объектам на сцене. Таким образом, если нужно изменить, например положение, в коде необходимо прописать transform и обратиться к соответствующему определению localPosition. Если нужно изменить поворот объекта, можно вызвать функцию Rotate().

Чтобы задать гравитацию игроку, необходимо добавить компонент Rigidbody, который тянет модель вниз с силой 9.81 Н/кг. Однако, чтобы падение у объекта было не вечным, ему необходимо добавить коллайдер, как и объекту,

который выступает в роли пола. Создадим объект, который будет иметь в компонентах Transform, Rigidbody и Collider, к нему же добавим скрипт перемещения. Назовем данный объект «Player». Все компоненты объекта отображаются в поле Inspector, представленном на рисунке 7.

Добавим в Player два дочерних объекта: Camera и Head. Head будет располагаться в области «головы» и задавать направление движения [13].

Подводя итог, код для передвижения пользователя будет выглядеть следующим образом (рисунок 8).

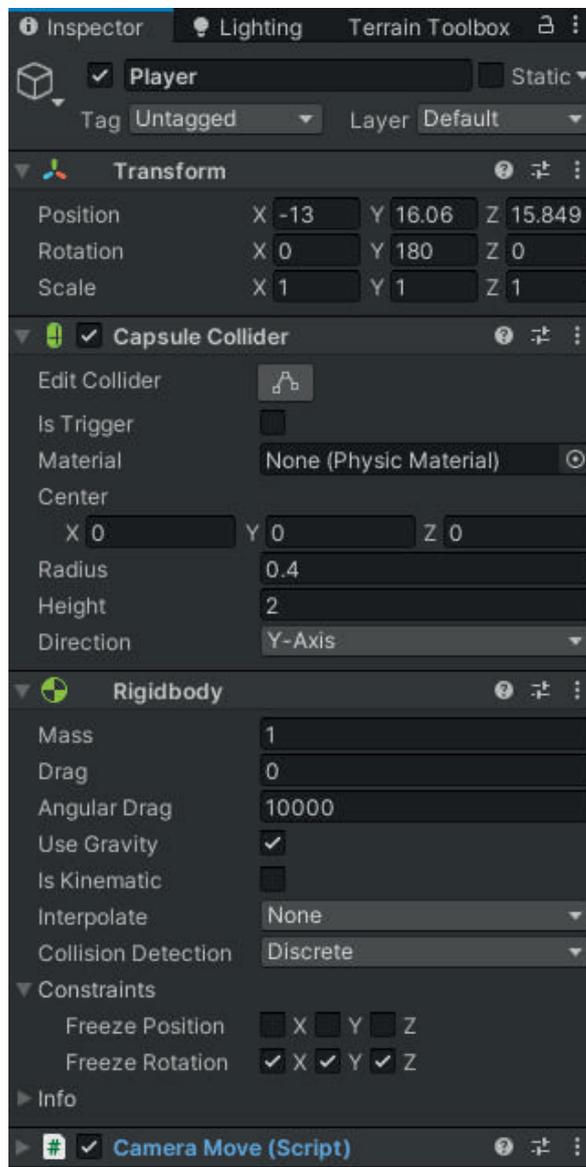


Рисунок 7. Компоненты объекта «Player»

Figure 7. Components of the Player Object

```

using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
public class CameraMove : MonoBehaviour
{
    public float speedMovement = 5.0f; //speedMovement
    public float speedRotation = 10.0f; //speedRotation
    float xRotation, yRotation;
    public Transform Camera, Head;
    float x;
    float z;
    void FixedUpdate()
    {
        xRotation += Input.GetAxis("Mouse X") * 0.2f * speedRotation;
        yRotation -= Input.GetAxis("Mouse Y") * 0.2f * speedRotation;
        yRotation = Mathf.Clamp(yRotation, -90f, 90f);
        Camera.transform.localRotation = Quaternion.Euler(yRotation, xRotation, 0f);
        Head.transform.localRotation = Quaternion.Euler(0f, xRotation, 0f);
        Movement();
        //transform.Rotate(Vector3.up * xRotation);
    }
    private void Movement()
    {
        {
        x = Input.GetAxis("Horizontal");
        z = Input.GetAxis("Vertical");
        Vector3 move = Head.transform.right * x + Head.transform.forward * z;
        transform.position += speedMovement * Time.deltaTime * move;
        }
    }
}

```

Листинг 1.2 — Код передвижения камеры

**Рисунок 8.** Код передвижения камеры

**Figure 8.** Camera movement code

### Выводы

1. Важность внедрения и применения обучающего приложения «Enterprises: inside view» в Институте химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета определена такими достоинствами, как повышение итоговой компетенции студентов, привлечение учащихся профильных классов школ к поступлению в технические вузы. Данное приложение также можно

использовать для обучения персонала на производственных предприятиях.

2. В результате проделанной работы создан программный продукт цеха нейтрализации и очистки сточных вод в среде виртуальной реальности с целью обучения студентов Института химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета и его управления посредством объектов данного производства.

## Список источников

1. Shulaeva E.A. Application of Electrodynamic Catalytic Reactors for Intensification of Heat and Mass Exchange Processes of Heterophase Catalysis // *WSEAS Transactions on Power Systems*, 2022, 17, pp. 37–44. doi: 10.37394/232016.2022.17.4.
2. Kovalenko Y.F., Shulaeva E.A. Mathematical Methods of Modeling of Polymerizer Reactor for the Process of Polymerization of Vinyl Chloride // *AIP Conference Proceedings*, 2022, 2467, 060023. <https://doi.org/10.1063/5.0092460>.
3. Shulaeva E.A., Kovalenko Y.F., Serebryakov E.A. Mathematical Methods for Modeling of the Process of Diaphragm Electrolysis // *AIP Conference Proceedings*, 2022, 2467, 060012. <https://doi.org/10.1063/5.0092801>.
4. Шулаева Е.А., Пенкин И.А. Разработка цифрового двойника узла сероочистки углеводородного сырья // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2022, № 3-4, Т. 18. С. 132–141. doi: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-132-140. EDN: ROULLF.
5. Shulaeva E.A., Khakimova Y.D. Optimization of the Technological Process of Oil Gas Desulfurization // *AIP Conference Proceedings*. 2022. 2647, 050028. <https://doi.org/10.1063/5.0104145>.
6. Shulaeva E.A., Satchikhina L.A. Optimization of a Cascade Control Loop for Circulating Irrigation of a Distillation Column of the Atmospheric Block of an Electic Desalting Plant // *AIP Conference Proceedings*. Krasnoyarsk Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Melville, New York, United States of America, 2021. P. 50057. <https://doi.org/10.1063/5.0071753>.
7. Шулаева Е.А., Коваленко Ю.Ф. Математическое моделирование и анализ параметров технологического процесса диафрагменного электролиза // *Естественные и технические науки*. 2022. № 7 (170). С. 214–215. EDN: LRPEBF.
8. Шулаева Е.А., Коваленко Ю.Ф., Серебряков Е.А. Моделирование процесса диафрагменного электролиза // *Естественные и технические науки*. 2021. № 8 (159). С. 190–192. EDN: YFXSFT.
9. Shulaeva E.A., Pavlov V.B. Training Software Development of the Gas Fractionation Unit of Debutanization Process in Unisim // *AIP Conference Proceedings*. Krasnoyarsk Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Melville, New York, United States of America, 2021. P. 50056. <https://doi.org/10.1063/5.0071749>.
10. Шулаева Е.А., Павлов В.Б. Разработка виртуального производства на примере узла разделения пентан-гексановой фракции // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2022. № 1, Т. 18. С. 168–175. EDN: TFNWOX.

технические и информационные комплексы и системы. 2022. № 1, Т. 18. С. 168–175. EDN: TFNWOX.

11. Пенкин И.А., Шулаева Е.А. Перспективы и проблемы внедрения цифровых двойников в современную промышленность // *Автоматизация технологических объектов и процессов: сб. науч. тр. XXII Междунар. науч.-техн. конф. аспирантов и студентов «Поиск молодых»*, Донецк, 24–26 мая 2022 г. Донецк: ДОННТУ, 2022. С. 47–50.

12. Пенкин И.А., Шулаева Е.А. Преимущества применения цифровых двойников и их дальнейшая перспектива развития // *Инновационные перспективы Донбасса: сб. науч. тр. 8-й Междунар. науч.-практ. конф.*, Донецк, 24–26 мая 2022 г. Донецк: ДОННТУ, 2022. С. 17–21.

13. Пат. на полезную модель 2676021 РФ, МПК G 06 F 21/55. Система и метод обнаружения DDoS-атак / А.А. Халимоненко, А.В. Тихомиров, С.В. Коноплев. 2017125333, Заявлено 17.07.2017; опубл. 25.12.2018.

## References

1. Shulaeva E.A. Application of Electrodynamic Catalytic Reactors for Intensification of Heat and Mass Exchange Processes of Heterophase Catalysis. *WSEAS Transactions on Power Systems*, 2022, 17, pp. 37–44. doi: 10.37394/232016.2022.17.4.
2. Kovalenko Y.F., Shulaeva E.A. Mathematical Methods of Modeling of Polymerizer Reactor for the Process of Polymerization of Vinyl Chloride. *AIP Conference Proceedings*, 2022, 2467, 060023. <https://doi.org/10.1063/5.0092460>.
3. Shulaeva E.A., Kovalenko Y.F., Serebryakov E.A. Mathematical Methods for Modeling of the Process of Diaphragm Electrolysis. *AIP Conference Proceedings*, 2022, 2467, 060012. <https://doi.org/10.1063/5.0092801>.
4. Shulaeva E.A., Penkin I.A. Razrabotka tsifrovogo dvoynika uzla seroochistki uglevodородного syr'ya [Development of a Digital Twin of the Unit for Sulfur Removal of Hydrocarbons]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2022, No. 3-4, Vol. 18, pp. 132–141. doi: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-132-140. EDN: ROULLF. [in Russian].
5. Shulaeva E.A., Khakimova Y.D. Optimization of the Technological Process of Oil Gas Desulfurization. *AIP Conference Proceedings*, 2022, 2647, 050028. <https://doi.org/10.1063/5.0104145>.
6. Shulaeva E.A., Satchikhina L.A. Optimization of a Cascade Control Loop for Circulating Irrigation of a Distillation Column of the Atmospheric Block of an Electic Desalting Plant.

*AIP Conference Proceedings. Krasnoyarsk Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*, Melville, New York, United States of America, 2021, pp. 50057. <https://doi.org/10.1063/5.0071753>.

7. Shulaeva E.A., Kovalenko Yu.F. *Matematicheskoe modelirovanie i analiz parametrov tekhnologicheskogo protsessa diafragmennogo elektroliza* [Mathematical Modeling and Analysis of the Parameters of the Technological Process of Diaphragm Electrolysis]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki — Natural and Technical Sciences*, 2022, No. 7 (170), pp. 214–215. EDN: LRPEBF. [in Russian].

8. Shulaeva E.A., Kovalenko Yu.F., Serebryakov E.A. *Modelirovanie protsessa diafragmennogo elektroliza* [Simulation of the Diaphragm Electrolysis Process]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki — Natural and Technical Sciences*, 2021, No. 8 (159), pp. 190–192. EDN: YFXSFT. [in Russian].

9. Shulaeva E.A., Pavlov V.B. *Training Software Development of the Gas Fractionation Unit of Debutanization Process in Unisim*. *AIP Conference Proceedings. Krasnoyarsk Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*, Melville, New York, United States of America, 2021, pp. 50056. <https://doi.org/10.1063/5.0071749>.

10. Shulaeva E.A., Pavlov V.B. *Razrabotka virtual'nogo proizvodstva na primere uzla razdeleniya pentan-geksanovoi fraktsii* [Development of Virtual Production on the Example of a Pentane-Hexane Fraction Separation Unit]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and*

*Systems*, 2022, No. 1, Vol. 18, pp. 168–175. EDN: TFNWOX. [in Russian].

11. Penkin I.A., Shulaeva E.A. *Perspektivy i problemy vnedreniya tsifrovyykh dvoynikov v sovremennuyu promyshlennost'* [Prospects and Problems of Introducing Digital Twins into Modern Industry]. *Sbornik nauchnykh trudov «Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh ob'ektov i protsessov» XXII mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii aspirantov i studentov «Poisk molodykh»*, Donetsk, 24-26 maya 2022 g. [Collection of Scientific Papers «Automation of Technological Objects and Processes» of the XXII International Scientific and Technical Conference of Graduate Students and Students «Search of Young People», Donetsk, May 24-26, 2022. Donetsk, DONNTU, 2022, pp. 47–50. [in Russian].

12. Penkin I.A., Shulaeva E.A. *Preimushchestva primeneniya tsifrovyykh dvoynikov i ikh dal'neishaya perspektiva razvitiya* [Benefits of Using Digital Twins, and Their Further Development Prospects]. *Sbornik nauchnykh trudov 8-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsionnye perspektivy Donbassa»*, Donetsk, 24-26 maya 2022 g. [Collection of scientific papers of the 8th International Scientific and Practical Conference «Innovative Prospects of Donbass», Donetsk, May 24-26, 2022]. Donetsk, DONNTU, 2022, pp. 17–21. [in Russian].

13. Khalimonenko A.A., Tikhomirov A.V., Konoplev S.V. *Sistema i metod obnaruzheniya DDoS-atak* [System and Method for Detecting DDoS Attacks]. Patent for Invention No. 2676021, 2018. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 01.03.2023; одобрена после рецензирования 07.03.2023; принята к публикации 03.04.2023.*

*The article was submitted 01.03.2023; approved after reviewing 07.03.2023; accepted for publication 03.04.2023.*

---

## ОБ АВТОРАХ

### **Беляев Александр Сергеевич**

ассистент Отделения автоматизации и робототехники, Томский политехнический университет, Томск, Россия

### **Боловин Евгений Владимирович**

кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники, Томский политехнический университет, Томск, Россия

### **Вавилов Вячеслав Евгеньевич**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

### **Габидуллина Зульфия Газинуровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, Передовая инженерная школа «Моторы будущего», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

### **Гамисония Гиорги Кахаберович**

магистрант Уфимской высшей школы экономики и управления, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

### **Ганджа Тарас Викторович**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры компьютерных систем в управлении, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

### **Гарипов Искандер Радикович**

инженер кафедры электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

### **Гизатуллин Фарит Абдулганеевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электротехники и электрооборудования предприятий, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

### **Глазырин Александр Савельевич**

доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники, Томский политехнический университет, Томск, Россия

### **Горбунов Антон Сергеевич**

кандидат технических наук, младший научный сотрудник кафедры «Авиационная теплотехника и теплоэнергетика», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

### **Данилов Владимир Игоревич**

студент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Институт химических технологий и инжиниринга, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Стерлитамаке), Стерлитамак, Россия

### **Демин Алексей Юрьевич**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электронной инженерии, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

---

**Дмитриев Вячеслав Михайлович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

**Исмагилов Флюр Рашитович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Каримов Руслан Динарович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиационная теплотехника и теплоэнергетика», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Кладиев Сергей Николаевич**

кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники, Томский политехнический университет, Томск, Россия

**Козлова Людмила Евгеньевна**

кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники, Томский политехнический университет, Томск, Россия

**Королев Вячеслав Игоревич**

аспирант кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, НИУ «Московский энергетический институт», Москва, Россия

**Купцов Даниил Викторович**

аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Лобанов Андрей Владимирович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханики, Передовая инженерная школа «Моторы будущего», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Максудов Денис Вилевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электромеханика», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Месропян Арсен Владимирович**

доктор технических наук, профессор, кафедра механики и цифрового проектирования, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Набунский Иван Альбертович**

аспирант отделения электроэнергетики и электротехники, Томский политехнический университет, Томск, Россия

**Новикова Ксения Олеговна**

ассистент кафедры электронной инженерии, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Овчинников Алексей Владимирович**

преподаватель Военного учебного центра, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Пашали Диана Юрьевна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

---

**Попов Семен Семенович**

техник-конструктор 1 категории, АО «НПЦ «Полус», Томск, Россия

**Пронин Егор Андреевич**

инженер кафедры электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Раков Иван Витальевич**

инженер 1 категории группы внедрения инноваций и изобретательской деятельности, ООО «Газпром трансгаз Томск», Томск, Россия

**Рогинская Любовь Эммануиловна**

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры «Электромеханика», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Саьдулов Рахмидин Шомидинович**

студент кафедры «Нефтехимия и химическая технология», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Сираев Фанис Фанилович**

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Соловьев Богдан Алексеевич**

магистрант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Сорокин Александр Владимирович**

аспирант кафедры электротехники и электрооборудования предприятий, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Степанова Валерия Денисовна**

студент кафедры электротехники и электрооборудования предприятий, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Стыскин Андрей Владиславович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электромеханика», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Тимошкин Вадим Владимирович**

кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники, Томский политехнический университет, Томск, Россия

**Фетисов Владимир Станиславович**

доктор технических наук, профессор кафедры электронной инженерии, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Филипас Александр Александрович**

кандидат технических наук, доцент, заведующий Отделением автоматизации и робототехники, Томский политехнический университет, Томск, Россия

**Филипченко Александр Сергеевич**

аспирант отраслевого центра подготовки научно-педагогических кадров высшей квалификации, кафедра «Вычислительные системы, сети и информационная безопасность», Российский университет транспорта, Москва, Россия

---

**Хазиева Регина Тагировна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Шабанов Виталий Алексеевич**

кандидат технических наук, профессор кафедры электротехники и электрооборудования предприятий, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Шулаева Екатерина Анатольевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Институт химических технологий и инжиниринга, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Стерлитамаке), Стерлитамак, Россия

**Шурыгин Юрий Алексеевич**

доктор технических наук, профессор, первый проректор, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

**Юдинцев Антон Геннадьевич**

кандидат технических наук, директор Научно-исследовательского института автоматики и электромеханики, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

**Юшкова Оксана Алексеевна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Янгиров Ильгиз Флюсович**

доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Электромеханика», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

---

## ABOUT THE AUTHORS

### **Belyaev Aleksandr S.**

Assistant of Automation and Robotics Department, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

### **Bolovin Evgeniy V.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electricity and Electrical Engineering Department, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

### **Danilov Vladimir I.**

Student of Automatic Technology and Information Systems Department, Institute of Chemical Technology and Engineering, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Sterlitamak), Sterlitamak, Russia

### **Demin Aleksei Yu.**

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Electronic Engineering Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

### **Dmitriev Vjacheslav M.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Control and Design Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

### **Fetisov Vladimir S.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Electronic Engineering Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

### **Filipas Aleksandr A.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Automation and Robotics Department, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

### **Filipchenko Alexander S.**

Postgraduate Student of the Branch Center for Training Highly Qualified Scientific and Pedagogical Personnel, Department «Computer systems, networks and information security», Russian University of Transport, Moscow, Russia

### **Gabidullina Zulfiya G.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electromechanics Department, Advanced Engineering School «Motors of the Future», Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

### **Gamisonia Giorgi K.**

Undergraduate Student of the Ufa Higher School of Economics and Management, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Gandzha Taras V.**

Doctor of Engineering Sciences, Associated Professor, Professor of the Department of Computer Control and Design Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

### **Garipov Iskander R.**

Engineer of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

---

**Gizatullin Farit A.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Glazyrin Alexander S.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Electricity and Electrical Engineering Department, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

**Gorbunov Anton S.**

Candidate of Engineering Sciences, Junior Researcher of Aviation Heat Engineering and Thermal Power Engineering Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Ismagilov Flyur R.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Karimov Ruslan D.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Aviation Heat Engineering and Thermal Power Engineering Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Khazieva Regina T.**

Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor, Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Kladiev Sergey N.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Electricity and Electrical Engineering Department, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

**Korolev Vyacheslav I.**

Postgraduate Student of Department of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

**Kozlova Lyudmila E.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electricity and Electrical Engineering Department, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

**Kuptsov Daniil V.**

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Lobanov Andrey V.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Advanced Engineering School «Motors of the Future», Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Maksudov Denis V.**

Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Mesropyan Arsen V.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Mechanics and Digital Design, Head of the Department of Mechanics and Digital Design, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

---

**Nabunskiy Ivan A.**

Postgraduate Student of Electricity and Electrical Engineering Department, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

**Novikova Kseniya O.**

Assistant of the Electronics Engineering Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Ovchinnikov Alexey V.**

Lecturer of the Military Education Center, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Pashali Diana Yu.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of the Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Popov Semen S.**

1 Category Design Technician, JSC «Scientific & Industrial Centre «Polyus»», Tomsk, Russia

**Pronin Egor A.**

Engineer of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Rakov Ivan V.**

1 Category Innovations and Inventive Activity Engineer, Gazprom transgaz Tomsk LLC, Tomsk, Russia

**Roginskaya Lyubov E.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Researcher of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Sayduloev Rahmidin Sh.**

Student of Petrochemistry and Chemical Technology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Shabanov Vitaly A.**

Candidate of Engineering Sciences, Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Shulaeva Ekaterina A.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automatic Technology and Information Systems Department, Institute of Chemical Technology and Engineering, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Sterlitamak), Sterlitamak, Russia

**Shurygin Yury A.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, First Pro-Rector, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

**Siraev Fanis F.**

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Solovev Bogdan A.**

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

---

**Sorokin Alexander V.**

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Stepanova Valeria D.**

Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Styskin Andrey V.**

Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Timoshkin Vadim V.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electricity and Electrical Engineering Department, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

**Vavilov Vyacheslav E.**

Doctor of Engineering Sciences, Associated Professor, Head of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Yangirov Ilgiz F.**

Doctor of Engineering Sciences, Associated Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Yudintsev Anton G.**

Candidate of Engineering Sciences, Director of the Research Institute of Automation and Electromechanics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

**Yushkova Oxana A.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

## Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале

1. Статьи, предоставляемые авторами в журнал, должны соответствовать профилю журнала, обладать новизной, интересовать широкий круг научной общественности.
2. Редакция принимает к публикации только открытые материалы на русском и английском языках (для иностранных авторов).
3. Поля — 2,5 см с каждой стороны; шрифт — Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал — полуторный; ссылки на литературу — в квадратных скобках. При наличии ссылок список литературы обязателен (в порядке цитирования, в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008).
4. В правом верхнем углу жирным курсивом: фамилия, имя, отчество авторов (обязательно полностью), ученая степень, ученое звание, должность, структурное подразделение (обязательно полностью), наименование организации (полностью), город, страна.
5. По центру, жирным шрифтом, заглавными буквами: название статьи, УДК в правом верхнем углу.
6. В конце статьи укажите почтовый адрес с указанием индекса, фамилию и инициалы получателя (по этому адресу будет выслан журнал), телефон (сотовый), e-mail контактного лица. Файл со статьей оформить: Фамилия И.О.doc. (или docx). Отправлять по адресу: uor-ugaes@mail.ru.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельными файлами.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (240 слов, определяющих теоретическую ценность и практическую новизну статьи), ключевые слова (не менее 10), список литературы обязателен (не менее 10 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.**