

# Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 2, т. 20, 2024

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).



## Electrical and data processing facilities and systems

№ 2, т. 20, 2024

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

№ 2, т. 20, 2024

---

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, [etiicis@yandex.ru](mailto:etiicis@yandex.ru)

Свободная цена. **12+**

Дата выхода в свет: 06.08.2024 г. Формат 60×84/8.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 20.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 94.

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: Б. А. Соловьев  
Технический редактор: С. В. Халитова

# ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

**No. 2, Vol. 20, 2024**

---

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, etiicis@yandex.ru

Price is free. **12+**

Date of publication 06.08.2024. Paper format 60×84/8.  
Offset printing. 20 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 94.

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:** B. A. Solovyev  
**Technical editor:** S. V. Khalitova

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

---

*Андриянов А. И.*

К ИССЛЕДОВАНИЮ ДИНАМИКИ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ  
ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ВХОДНЫМ ФИЛЬТРОМ 9

---

*Сухачев И. С., Шеломенцев В. А., Хмара Г. А., Сидоров С. В., Попов Е. И.,  
Швецова А. А.*

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ  
110(35)/10 кВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ ТЕПЛОВИЗИОННОГО  
ОБСЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА 22

---

*Воротников М. Ю., Лимарев А. С., Николаев А. А.*

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ 37

---

*Хазиева Р. Т.*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ 50

---

*Кантюков Н. Р., Хазиева Р. Т.*

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЗАРЯДНОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ 64

---

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

---

*Китабов А. Н., Иванов А. В., Ткаченко М. Н., Абуталипов У. М.*

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ  
ИДЕНТИФИКАЦИИ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ВОДОГАЗОВОЙ СМЕСИ 76

---

*Китабов А. Н., Абуталипов У. М., Горбунов Д. Д., Хакимьянов М. И.*

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ШТАНГОВЫХ СКВАЖИННЫХ НАСОСНЫХ  
УСТАНОВОК 89

---

*Корнеев П. Е., Игнатьев А. А.*

РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЛАБОРАТОРНОГО  
СТЕНДА ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ 103

---

*Кулакова Е. С., Батыркаева А. М.*

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА  
АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ 115

---

---

*Зайцева А. А., Белявцев М. В., Зайцев Е. А., Кильмаков Д. К., Култаев Д. Р.,  
Сайфутдинова З. Р.*

СИНТЕЗ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯМИ ВЕРТОЛЕТА  
В УСЛОВИЯХ СТРУКТУРНОЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ  
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ 123

---

*Хузин Т. Р., Закирничная М. М.*

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА  
ДЛЯ ВИБРОДИАГНОСТИКИ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ,  
ОСНОВАННАЯ НА ТЕОРИИ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА 129

---

## **МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА**

---

*Храмкин И. А., Савиных М. А., Пономарев С. В.*

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ КВАНТОВАНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ  
СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ СИНУСОИДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ 139

---

*Гашенко Ю. В.*

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ  
ПЛОТНОСТИ ПОЖАРООПАСНЫХ ЖИДКОСТЕЙ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ 152

---

**Об авторах** 162

---

---

# CONTENT

## ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

---

*Andriyanov A. I.*

TO STUDY THE DYNAMICS OF A PULSE-WIDTH CONVERTER  
WITH AN INPUT FILTER 9

---

*Sukhachev I. S., Shelomentsev V. A., Khmara G. A., Sidorov S. V., Popov E. I.,  
Shvetsova A. A.*

IDENTIFICATION OF THE CONDITION OF 110(35)/10 kV POWER  
TRANSFORMERS BASED ON THERMOGRAPHIC SURVEY DATA ANALYSIS  
AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS 22

---

*Vorotnikov M. Yu., Lymarev A. S., Nikolaev A. A.*

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF AN ELECTRIC VEHICLE 37

---

*Khazieva R. T.*

SOLAR PHOTOVOLTAIC POWER PLANT DESIGN 50

---

*Kantyukov N. R., Khazieva R. T.*

DEVELOPMENT OF A CHARGING STATION MODEL  
FOR AN ELECTRIC VEHICLE 64

---

## DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

---

*Kitabov A. N., Ivanov A. V., Tkachenko M. N., Abutalipov U. M.*

DEVELOPMENT OF AN INFORMATION-MEASURING SYSTEM  
FOR IDENTIFYING FLOW MODES OF A WATER-GAS MIXTURE 76

---

*Kitabov A. N., Abutalipov U. M., Gorbunov D. D., Khakimyanov M. I.*

ALGORITHMIC AND MATHEMATICAL SUPPORT OF INFORMATION-  
MEASURING SYSTEM FOR DETERMINING ENERGY CONSUMPTION  
OF ROD WELL PUMPING UNITS 89

---

*Korneev P. E., Ignatyev A. A.*

DEVELOPMENT OF A TRAINING AND RESEARCH LABORATORY STAND  
FOR INDUSTRIAL AUTOMATION 103

---

*Kulakova E. S., Batyrkaeva A. M.*

DEVELOPMENT OF THE SYSTEM OF ECOLOGICAL MONITORING  
OF THE ATMOSPHERE USING NEURAL NETWORK CAPABILITIES 115

---



---

*Zaitseva A. A., Belyavtsev M. V., Zaitsev E. A., Kilmakov D. K., Kultaev D. R.,  
Sayfutdinova Z. R.*

SYNTHESIS OF A HELICOPTER ENGINE CONTROL ALGORITHM  
UNDER CONDITIONS OF STRUCTURAL AND PARAMETRIC UNCERTAINTY 123

---

*Khuzin T. R., Zakirnichnaya M. M.*

INTELLIGENT INFORMATION SYSTEM FOR PUMP UNIT  
VIBRODIAGNOSTICS BASED ON DETERMINED CHAOS THEORY 129

---

## **METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES**

---

*Khramkin I. A., Savinykh M. A., Ponomarev S. V.*

ESTIMATION OF QUANTIZATION ERROR IN MEASUREMENT  
OF ROOT-MEAN-SQUARE VALUES OF SINE SIGNALS 139

---

Gashenko Yu. V.

METROLOGICAL ANALYSIS OF A SYSTEM FOR MEASURING  
THE DENSITY OF FLAMMABLE LIQUIDS USING  
A FIBER-OPTIC TRANSDUCER 152

---

**About the Authors** 162

---

Научная статья

УДК 621.314

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-2-9-21

## К ИССЛЕДОВАНИЮ ДИНАМИКИ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ВХОДНЫМ ФИЛЬТРОМ

*Алексей Иванович Андриянов**Alexey I. Andriyanov**доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы», Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия*

### Актуальность

Импульсные преобразователи напряжения широко применяются в промышленности, что обуславливает актуальность исследования таких устройств. Как правило, данные системы строятся с обратной связью по выходному напряжению с целью его стабилизации, так, на этапе их проектирования требуется расчет системы управления с целью обеспечения их устойчивости и требуемых динамических характеристик. Использование входного фильтра в составе импульсных преобразователей напряжения, с одной стороны, позволяет улучшить качество входного тока преобразователя, а, с другой, — может привести к потере его устойчивости как агрегированной системы «входной фильтр — преобразователь». Также входной фильтр может быть фильтром предыдущего каскада преобразования. Это требует развития методов анализа динамики таких систем. Применяемые математические модели и вычислительные методы должны обеспечивать максимальную скорость расчета, учитывать динамические нелинейности импульсных систем преобразования электроэнергии и периодический характер электромагнитных процессов с частотой, равной или кратной частоте импульсной модуляции. В ряде случаев возможно возникновение хаотических колебаний. Перечисленные особенности делают актуальным применение метода точечных отображений, базирующегося на нелинейных разностных уравнениях, что позволяет строить области устойчивости желаемого динамического режима с минимальными затратами машинного времени.

### Цель исследования

Построение нелинейной динамической модели двухтактного нулевого преобразователя постоянного напряжения в виде нелинейного дискретного отображения Пуанкаре, построение двухпараметрических карт динамических режимов, частотных характеристик системы и на их основе выявление основных закономерностей поведения системы в условиях изменения ее входного напряжения и сопротивления нагрузки в широком диапазоне при различных параметрах входного фильтра.

### Ключевые слова

импульсный преобразователь напряжения, входной фильтр, нелинейная динамическая модель, устойчивость, регулятор, метод точечных отображений, малосигнальная модель

### Методы исследования

Для анализа динамики использовались: малосигнальное моделирование, метод точечных отображений, частотные методы анализа устойчивости, теория линейных систем автоматического управления, теория нелинейных динамических систем, численные методы решения систем нелинейных уравнений.

### Результаты

Построена нелинейная динамическая модель двухтактного преобразователя постоянного напряжения с входным фильтром в форме отображения Пуанкаре, выявлены основные закономерности потери устойчивости желаемого динамического режима при изменении входного напряжения и сопротивления нагрузки в широком диапазоне. Продемонстрирована специфика применения различных методов при анализе устойчивости рассматриваемой системы. Показано, что применение метода точечных отображений и сопутствующих методов анализа устойчивости неподвижных точек динамических режимов позволяет использовать единый критерий потери устойчивости желаемого динамического режима в различных областях параметров системы.

**Для цитирования:** Андриянов А. И. К исследованию динамики импульсного преобразователя постоянного напряжения с входным фильтром // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 2. Т. 20. С. 9-21. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-9-21>.

Original article

## TO STUDY THE DYNAMICS OF A PULSE-WIDTH CONVERTER WITH AN INPUT FILTER

### Relevance

Switching voltage converters are widely used in industry, which makes the study of such devices relevant. As a rule, these systems are built with feedback on the output voltage in order to stabilize it, so at the design stage it is necessary to calculate the control system in order to ensure stability and the required dynamic characteristics. The use of an input filter as part of pulse voltage converters, on the one hand, can improve the quality of the converter input current, and on the other hand, can lead to a loss of its stability as an aggregated «input filter — converter» system. This requires the development of methods for analyzing the dynamics of such systems. The applied mathematical models and computational methods must ensure maximum calculation speed, take into account the dynamic nonlinearities of pulsed power conversion systems and the periodic nature of electromagnetic processes with a frequency equal to or a multiple of the pulse modulation frequency. In some cases, chaotic oscillations may occur. The listed features make it relevant to use the point mapping method, based on nonlinear difference equations, which makes it possible to construct stability regions of the desired dynamic regime with minimal computer time.

### Aim of research

Construction of a nonlinear dynamic model of a push-pull zero-DC voltage converter in the form of a nonlinear discrete Poincaré map, construction of two-parameter maps of dynamic modes, frequency characteristics of the system and, on their basis, identification of the main patterns of system behavior under conditions of changes in its input voltage and load resistance in a wide range for different input parameters filter.

### Keywords

pulse voltage converter, input filter, nonlinear dynamic model, stability, regulator, point mapping method, small-signal model

### Research methods

To analyze the dynamics, the following were used: small-signal modeling, point mapping method, frequency methods of stability analysis, theory of linear automatic control systems, theory of nonlinear dynamic systems, numerical methods for solving systems of nonlinear equations.

### Results

A nonlinear dynamic model of a push-pull DC-DC converter with an input filter in the form of a Poincaré map has been constructed, and the main patterns of loss of stability of the desired dynamic mode have been identified when the input voltage and load resistance change over a wide range. The specificity of using various methods in analyzing the stability of the system under consideration is demonstrated. It is shown that the use of the point mapping method and accompanying methods for analyzing the stability of fixed points of dynamic modes makes it possible to use a single criterion for the loss of stability of the desired dynamic mode in different areas of system parameters.

**For citation:** Andriyanov A. I. K issledovaniyu dinamiki impul'snogo preobrazovatelya postoyannogo napryazheniya s vkhodnym fil'trom [To Study the Dynamics of a Pulse-Width Converter with an Input Filter]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 2, Vol. 20, pp. 9-21 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-9-21>.

### Введение

Импульсные преобразователи напряжения на практике могут работать в составе многокаскадных систем электропитания, что может негативно повлиять на их устойчивость [1]. Как правило, на вход преобразователя постоянного напряжения (ППН) поступает выходное напряжение после выпрямителя с Г-образным LC-фильтром, и при определенных обстоятельствах наличие такого фильтра на входе ППН может повлиять на устойчивость системы «входной фильтр — импульсный преобразователь». Также фильтр на вход ППН устанавливается для фильтрации помех с целью исключения взаимного влияния ППН и сети, но в этом случае резонансная частота фильтра достаточно велика, и он не может оказать негативное влияние на динамику ППН [1–3].

В работах [1–3] рассматриваются вопросы устойчивости системы «входной фильтр — преобразователь» с точки зрения малосигнального моделирования и теории четырехполюсников. Представлен критерий устойчивости. В то же

время требуются дальнейшие исследования таких систем с использованием альтернативных методик.

Поскольку нормальным режимом работы импульсных ППН является колебательный режим, то для исследования ППН применяется метод точечных отображений [4–10], который учитывает динамические нелинейности системы. В этом случае анализируется устойчивость неподвижной точки желаемого динамического режима (ЖДР). Под желаемым динамическим режимом ППН понимается режим, при котором период колебаний выходного напряжения ППН равен периоду широтно-импульсной модуляции (ШИМ)  $T$  (однократный режим) [4]. При изменении какого-либо параметра системы или внешнего воздействия возможно возникновение  $m$ -циклов с периодом  $mT$ , где  $m = 1, 2, 3, \dots$  — кратность цикла. Также могут возникать хаотические колебания. Анализ системы «входной фильтр — преобразователь» с использованием метода точечных отображений до сих пор не проводился.

Основной целью данной работы являются анализ динамики системы «входной фильтр — преобразователь» при меняющихся в широком диапазоне параметрах и выявление основных закономерностей трансформации границ устойчивости системы при изменении параметров входного фильтра. В статье с помощью диаграмм размаха колебаний выходного напряжения продемонстрированы негативные последствия неудачного сочетания параметров входного фильтра (ВХФ) и преобразователя.

### 1. Математическая модель импульсного преобразователя напряжения

Схема замещения двухтактного нулевого ППН с входным фильтром представлена на рисунке 1. Силовая часть импульсного ППН [7] построена на основе транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ , трансформатора  $TV$  с коэффициентом трансформации  $K_{тр}$  и диодов  $VD1$  и  $VD2$ , Г-образного фильтра, состоящего из дросселя  $D$  с индуктивностью  $L$  и активным сопротивлением  $R_L$ , конденсатора  $K$

с емкостью  $C$  и активным сопротивлением  $R_c$ .

Система управления (СУ) обеспечивает стабилизацию выходного напряжения за счет отрицательной обратной связи. При этом в контуре стабилизации используется интегральный регулятор  $P$ . Передаточная функция регулятора имеет вид

$$W_p(s) = \frac{1}{T_{ин}s + K},$$

где  $T_{ин}$  — постоянная времени регулятора;

$K$  — коэффициент, учитывающий неидеальность интегрального регулятора.

Сигнал обратной связи  $u_{oc}$  поступает с усилителя обратной связи (УОС) (коэффициент  $K_{oc}$ ) и подается на вход вычитателя  $B$ , на другой вход которого подается сигнал задания  $u_3$ . Также СУ содержит генератор разветвляющего напряжения ГРН, задающий генератор ЗГ, компаратор «==», триггер  $T$ , расщепитель фаз на логических элементах  $И1$  и  $И2$ , реализующих функцию «И», драйверы  $ДР1$  и  $ДР2$ . Входной фильтр состоит из дросселя фильтра ( $ДФ$ ) с индуктивностью  $L_\phi$  и сопротивлением  $R_{L\phi}$ , конденсатор

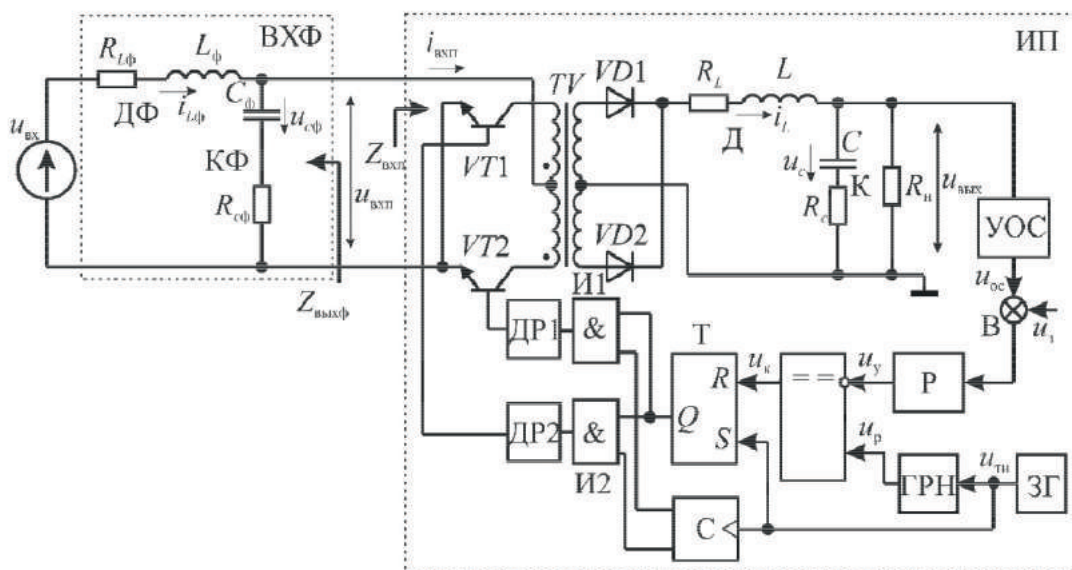


Рисунок 1. Схема замещения импульсного преобразователя напряжения с входным фильтром

Figure 1. Equivalent circuit of the pulse-width converter with input filter

фильтра (КФ) с индуктивностью  $C_\phi$  и сопротивлением  $R_{сф}$ . Также на рисунке 1 обозначены сигналы:  $u_p$  — развертывающее напряжение;  $u_y$  — сигнал управления;  $u_k$  — выходной сигнал компаратора;  $u_{тн}$  — тактовые импульсы ЗГ;  $i_{вхп}$  — входной ток ППН;  $u_{вхп}$  — входное напряжение ППН;  $u_{вх}$  — входное напряжение ВХФ;  $u_{вхп}$  — входное напряжение ППН;  $i_L$  — ток дросселя выходного фильтра;  $u_c$  — напряжение на конденсаторе выходного фильтра;  $i_{L\phi}$  — ток дросселя ВХФ;  $u_{сф}$  — напряжение на конденсаторе ВХФ.

Принцип действия силовой части нулевой схемы двухтактного ППН широко известен [11, 12] и поясняется на рисунке 2 в объеме, необходимом для понимания принципа построения математической модели. Как известно, процессы в выходном фильтре импульсных ППН периодические, и их период, как правило, кратен периоду ШИМ  $T$ . В двухтактных ППН цикл преобразования составляет два периода ШИМ  $2T$ , а период процессов в выходном фильтре равен  $T$ , на что следует обратить внимание при построении математической модели.

Рассмотрим подробнее  $k$ -ый тактовый интервал  $(k-1)T \leq t \leq kT$  (рисунок 1), где  $k = 1, 2, 3, \dots$ . На прямом ходу  $(k-1)T \leq t \leq t_{k1}$  открыт ключ  $VT1$ , диод  $VD1$ , и ток дросселя  $D$  нарастает. На обратном ходу  $(t_{k1}T \leq t \leq t_{k2})$   $VT1$ ,  $VT2$  и  $VD1$ ,  $VD2$  закрыты, и ток дросселя, замыкаясь через обратный диод  $VD3$ , спадает.

При падении тока дросселя  $D$  до нуля в момент  $t_{k2}$  все полупроводниковые приборы закрываются, и конденсатор  $K$  разряжается на нагрузку. На следующем  $(k+1)$ -ом тактовом интервале на прямом ходу открыт ключ  $VT2$  и диод  $VD2$ . Процессы на обратном ходу аналогичны предыдущему  $k$ -му тактовому интервалу. С точки зрения математического моделирования электромагнитные процессы на  $k$ -ом и  $(k+1)$ -ом тактовых интервалах описываются одинаково, и все тактовые интервалы могут содержать три участка постоянства структуры силовой части. На каждом таком участке структура силовой части принимает индивидуальную конфигурацию.

Для анализа нелинейной динамики импульсных ППН, как правило, используют кусочно-линейные модели, когда

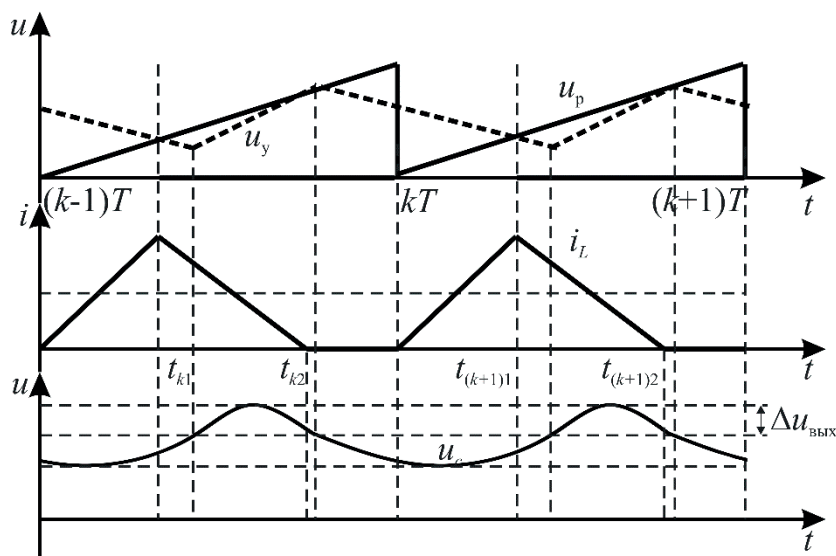


Рисунок 2. Временные диаграммы, характеризующие работу импульсного преобразователя напряжения

Figure 2. Timing diagrams characterizing the operation of the pulse-width converter

на участке постоянства структуры силовой части процессы описываются системой линейных дифференциальных уравнений, где переход от участка к участку осуществляют припасовыванием [4–7, 13].

Была получена система дифференциальных уравнений в пространстве состояний, описывающая электромагнитные процессы в ППН на любом участке  $k$ -го тактового интервала, которая имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= -\frac{1}{L} \left( R_L + R_n + R_{VD} - \frac{R_n^2}{R_n + R_c} - \frac{R_{VD}^2}{R_{c\phi} + R_{VD} + R_{VTD}} \right) i_L - \\ &\quad - \frac{R_n}{(R_n + R_c)L} u_c + \frac{1}{L} \frac{R_{c\phi} R_{VD}}{R_{c\phi} + R_{VD} + R_{VTD}} i_{L\phi} + \\ &\quad + \frac{1}{L} \frac{R_{VD}}{R_{c\phi} + R_{VD} + R_{VTD}} u_{c\phi}; \\ \frac{du_c}{dt} &= \frac{R}{(R_n + R_c)C} i_L - \frac{1}{(R_n + R_c)C} u_c; \\ \frac{du_y}{dt} &= \frac{u_s}{T_n} - \frac{K_{oc}}{T_n} \frac{R_n}{R_n + R_c} u_c - \frac{K_{oc}}{T_n} \frac{R_c R_n}{R_c + R_n} i_L - \frac{K}{T_n} u_y; \\ \frac{di_{L\phi}}{dt} &= \frac{1}{L_\phi} \left( R_{VD} - \frac{R_{VD}^2 + R_{VTD} R_{VD}}{R_{c\phi} + R_{VD} + R_{VTD}} \right) i_L - \\ &\quad - \frac{1}{L_\phi} \left( R_{L\phi} + R_{VD} + R_{VTD} - \frac{(R_{VD} + R_{VTD})^2}{R_{c\phi} + R_{VD} + R_{VTD}} \right) i_{L\phi} - \\ &\quad - \frac{1}{L_\phi} \frac{R_{VD} + R_{VTD}}{R_{c\phi} + R_{VD} + R_{VTD}} u_{c\phi} + \frac{u_{bx}}{LK_{tr}}; \\ \frac{du_{c\phi}}{dt} &= -\frac{1}{C_\phi} \frac{R_{VD}}{R_{c\phi} + R_{VD} + R_{VTD}} i_L + \\ &\quad + \frac{1}{C_\phi} \frac{R_{VD} + R_{VTD}}{R_{c\phi} + R_{VD} + R_{VTD}} i_{L\phi} - \\ &\quad - \frac{1}{C_\phi} \frac{1}{R_{c\phi} + R_{VD} + R_{VTD}} u_{c\phi}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где  $R_{VD}$  — сопротивление обратного диода  $VD3$ ; сопротивление  $R_{VTD} = R'_{VT} + R_{VD}$ , где  $R'_{VT}$  — сопротивление транзистора  $VT1$  или  $VT2$  (в зависимости о номера тактового интервала), приведенное ко вторичной обмотке трансформатора  $R'_{VT} = R_{VT} / K_{tr}^2$ .

При этом на участке  $0 \leq z \leq z_{k1}$   $R_{VD} = R_{VDoff}$  и  $R_{VTD} = R'_{VTon} + R_{VDon}$ ; на участке  $1 z_{k1} \leq z \leq z_{k2}$   $R_{VD} = R_{VDon}$  и  $R_{VTD} = R_{VToff} + R'_{VDoff}$ ; на участке  $2 z_{k2} \leq z \leq 1$   $R_{VD} = R_{VDoff}$  и  $R_{VTD} = R_{VToff} + R'_{VDoff}$ , где  $z_{kl} = (t_{kl} - (k-1)T)/T$  — моменты коммутации в пределах тактового  $k$ -го интервала в относительном времени. Считаем, что сопротивления

всех транзисторов в открытом состоянии одинаковы и равны  $R_{VTon}$ , в закрытом состоянии —  $R_{VToff}$ . Сопротивления всех диодов также одинаковы и в открытом состоянии равны  $R_{VDon}$ , а в закрытом —  $R_{VDoff}$ .

От системы дифференциальных уравнений (1) осуществляется переход к отображению Пуанкаре, которое было получено в [10] в обобщенной форме для ППН широкого класса:

$$\mathbf{X}_k = \Psi(\mathbf{X}_{k-1}) = \prod_{i=1}^k \mathbf{N}_i^{n_k}(\mathbf{z}_i^T) \mathbf{X}_0 + \sum_{j=1}^{k-1} \left[ \prod_{l=j+1}^k \mathbf{N}_l^{n_k}(\mathbf{z}_l^T) \left\{ \mathbf{K}_j^{n_k}(\mathbf{z}_j^T) + \mathbf{L}_j^{n_k}(\mathbf{z}_j^T) \right\} \right] + \quad (2)$$

$$+ \mathbf{K}_k^{n_k}(\mathbf{z}_k^T) + \mathbf{L}_k^{n_k}(\mathbf{z}_k^T),$$

$$\text{где } \mathbf{N}_k^n(\mathbf{z}_k^a) = \prod_{i=1}^n e^{A_i(z_{ki} - z_{ki-1})};$$

$$\mathbf{K}_k^n(\mathbf{z}_k^a) = \sum_{j=1}^{n-1} \left\langle \prod_{i=j+1}^n \left\{ e^{A_i(z_{ki} - z_{ki-1})} \right\} \left[ e^{A_j(z_{kj} - z_{kj-1})} - \mathbf{E} \right] \mathbf{A}_j^{-1} \mathbf{B}_j \right\rangle;$$

$$\mathbf{L}_k^n(\mathbf{z}_k^a) = \left[ e^{A_n(z_{kn} - z_{kn-1})} - \mathbf{E} \right] \mathbf{A}_n^{-1} \mathbf{B}_n,$$

где  $\mathbf{z}_k^T = (z_{k0}, z_{k1}, \dots, z_{knk})^T$  — вектор моментов коммутации в относительном времени на тактовом интервале с номером  $k$ ;

$n_k$  — количество коммутаций на тактовом интервале (в данном случае  $n_k = 3$ ), при этом  $z_{k0} = 0$ ;  $z_{knk} = 1$ ;

$\mathbf{A}_1$  — системная матрица линейной системы дифференциальных уравнений (1), описывающей движения на  $l$ -ом участке постоянства структуры силовой части;

$\mathbf{B}_1$  — матрица управления указанной системы;

$\mathbf{u}_i$  — вектор управления;

$\mathbf{A}_1$ ,  $\mathbf{B}_1$  и  $\mathbf{u}_1$  могут быть легко получены из (1);

$\mathbf{X}_k = [i_{Lk} u_{ck} u_{yk} i_{L\phi k} u_{c\phi k}]^T$  — вектор переменных состояний в дискретный момент времени  $kT$  (рисунок 1);

$\mathbf{E}$  — единичная матрица.

В выражении (2) специфичными для рассматриваемого ППН являются матрица  $\mathbf{A}_1$ ,  $\mathbf{B}_1$  и вектор управляющих

воздействий  $\mathbf{u}_1$ , которые могут быть получены из (1) и здесь не приводятся из-за ограничения объема статьи.

Выражение (2) является рекуррентным, и на каждой  $k$ -ой итерации отображения необходимо искать моменты коммутации в относительном времени ( $z_{k1}$  и  $z_{k2}$ ), которые могут быть найдены путем решения трансцендентных уравнений.

Момент  $z_{k1}$  находится из уравнения

$$u_3 - \mathbf{c}_1 \left( e^{A_1 z_{k1} a} \mathbf{X}_{k-1} + (e^{A_1 z_{k1} a} - \mathbf{E}) \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1 \right) - U_{gm} z_{k1} = 0, \quad (3)$$

где  $\mathbf{c}_1 = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$  — вектор-строка выборки  $u_{i1}$  из вектора переменных состояния  $\mathbf{X}$ ;

$U_{gm}$  — амплитуда развертывающего напряжения.

Момент  $z_{k2}$  при известном  $z_{k1}$  находится из уравнения

$$\mathbf{c}_2 \left( e^{A_2 z_{k2} a} \left( e^{A_1 z_{k1} a} \mathbf{X}_{k-1} + (e^{A_1 z_{k1} a} - \mathbf{E}) \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1 \right) + (e^{A_2 z_{k2} a} - \mathbf{E}) \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2 \right) = 0, \quad (4)$$

где  $\mathbf{c}_2 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$  — вектор-строка выборки  $i_L$  из вектора переменных состояния  $\mathbf{X}$ .

Далее рассмотрим малосигнальную модель импульсных ППН первого рода, к которым относится рассматриваемый преобразователь.

Малосигнальная передаточная функция разомкнутого контура имеет вид

$$W_{разм}(s) = W_p(s) W_{пн}(s) K_{ос}, \quad (5)$$

где  $W_{пн}(s)$  — передаточная функция ППН, которая в режиме непрерывного тока дросселя выходного фильтра имеет вид [11]

$$W_{пн}(p) = \frac{u_{вых}(p)}{u_y(p)} = \frac{K(\tau_c p + 1)}{T_\phi^2 p^2 + 2\xi T_\phi p + 1}, \quad (6)$$

$$\text{где } \xi = \frac{L + C[R_L(R_c + R_H) + R_c R_H]}{2\sqrt{LC}(R_c + R_H)(R_L + R_H)},$$

$$T_\phi = \sqrt{\frac{LC(R_H + R_c)}{R_L + R_H}}, \quad K = \frac{R_H}{R_L + R_H} \frac{u_{вх}}{K_{тр} U_{gm}},$$

$$\tau_c = R_c C.$$

При использовании малосигнальных динамических моделей используют специальный критерий устойчивости системы «входной фильтр — преобразователь». В этом случае на границе устойчивости выполняется равенство [1]

$$R(j\omega_0) = \frac{Z_{выхф}(j\omega_0)}{Z_{вхп}(j\omega_0)} = -1, \quad (7)$$

где  $Z_{выхф}(s)$  — выходное операторное сопротивление фильтра;

$Z_{вхп}(s)$  — входное операторное сопротивление ППН;

$\omega_0$  — частота, при которой выполняется условие (7).

Условие (7) полностью ложится в концепцию частотного критерия Найквиста, когда по амплитудно-фазо-частотной характеристике (АФЧХ) разомкнутого контура оценивается устойчивость системы с обратной связью. В этом же случае требуется строить АФЧХ отношения  $Z_{выхф}(s)/Z_{вхп}(s)$ . Входное операторное сопротивление ППН без ВХФ с замкнутой обратной связью может быть определяется по выражению [14], а выходное операторное сопротивление ВХФ определяется по выражению [1].

При проведении исследований требуется строить границы устойчивости в пространстве двух параметров системы, которые могут меняться в широком диапазоне, а именно, входного напряжения и сопротивления нагрузки. Очевидно, что параметры отношения  $Z_{выхф}(s)/Z_{вхп}(s)$  зависят как от  $U_{вх}$ , так и от  $R_H$  [14]. На основании (7) с помощью численных методов можно построить границы устойчивости рассматриваемой системы, однако анализ показал, что возникает проблема выбора начальных условий и обеспечения сходимости численных методов. В данной статье для построения границ устойчивости был применен иной метод, который основан на теории точечных отображений. В этом случае для определения границ устойчивости



ЖДР с определенным шагом варьируются изменяемые параметры  $U_{вх}$  и  $R_{н}$ , для каждой пары рассчитывается неподвижная точка без расчета переходного процесса (метод неподвижной точки [7]) и оценивается ее устойчивость, что позволяет определить области устойчивости и неустойчивости ЖДР в пространстве указанных параметров.

Для расчета координат неподвижной точки  $\mathbf{X}^*$  решается система нелинейных трансцендентных уравнений, которая составляется на основе (2) с учетом (1):

$$\Psi(\mathbf{X}) - \mathbf{X} = 0.$$

Как показывает практика, при решении подобной системы уравнений проблема сходимости численных методов стоит менее остро, чем при анализе на основе (7).

Для оценки локальной устойчивости неподвижной точки желаемого однократного режима как правило используется первый метод Ляпунова, связанный с линеаризацией (2) в малой окрестности анализируемой неподвижной точки  $\mathbf{X}^*$ . Локальная устойчивость оценивается по собственным числам матрицы монодромии, которая рассчитывается как

$$\mathbf{M}_k = \left. \frac{d\Psi(\mathbf{X})}{d\mathbf{X}} \right|_{\mathbf{X} = \mathbf{X}^*}.$$

В работе [6] приведена обобщенная на широкий класс ППН методика расчета матрицы  $\mathbf{M}_k$ . Как известно, периодический режим теряет устойчивость, если модуль хотя одного собственного числа матрицы монодромии (мультипликатора)

выходит на пределы единичного круга на комплексной плоскости [15].

## 2. Анализ динамики импульсного преобразователя с входным фильтром

В данном разделе приведены результаты моделирования рассматриваемой в работе системы. Моделирование при подготовке данной статьи осуществлялось с помощью программного обеспечения, разработанного автором.

В данной статье рассматривался ППН со следующими параметрами:  $U_{вх\min} = 18$  В,  $U_{вх\max} = 30$  В,  $R_{н\min} = 2,5$  Ом,  $R_{н\max} = 144$  Ом,  $K_{oc} = 1$ ,  $L = 0,0013$  Гн,  $R_L = 0,005$  Ом,  $C = 3,33$  мкФ,  $R_c = 0,005$  Ом,  $T_{и} = 0,002$  с,  $K = 0,03$ , задающее воздействие  $u_3 = 5$  В.

Рассматривались ППН без входного фильтра и ППН с входным фильтром со следующими наборами параметров (таблица 1), каждый из которых соответствует определенной резонансной частоте фильтра  $\omega_p$ .

На рисунке 3, а представлена карта динамических режимов с нанесенными границами областей устойчивости и неустойчивости ЖДР. Области неустойчивости ЖДР располагаются со стороны штриховки, нанесенной возле каждой границы.

При этом на рисунке 3 приняты следующие обозначения:  $L_{Nij}$ , где  $i$  — номер набора параметров ВХФ;  $j$  — номер границы устойчивости ЖДР для  $i$ -го набора на диаграмме;  $L_{N0}$  — граница области устойчивости ЖДР для системы без

**Таблица 1.** Наборы параметров входного фильтра

**Table 1.** Input filter parameter sets

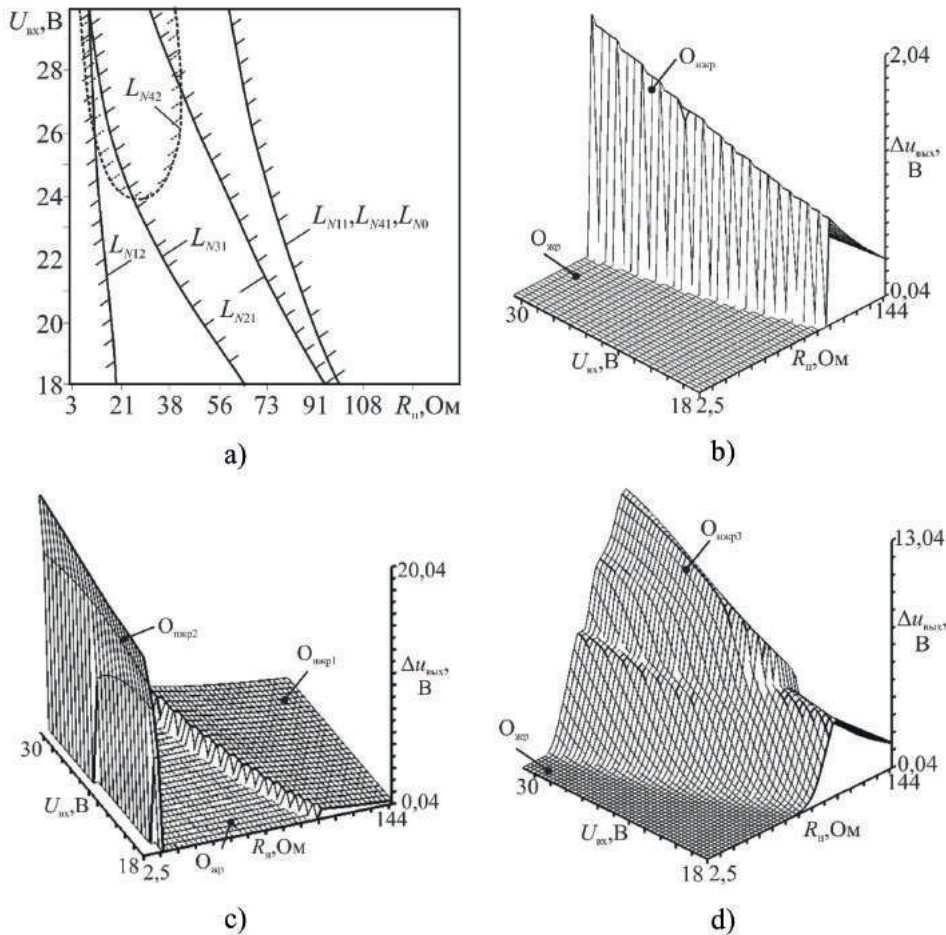
№ п/п	$L_{\phi}$ , Гн	$R_{L\phi}$ , мОм	$C_{\phi}$ , мкФ	$R_{c\phi}$ , Ом	$\omega_p$ , рад/с
1	0,0084	200	56,5	200	1447
2	0,002	10	20	10	5000
3	0,003	10	20	10	4082
4	0,002	10	40	10	3535

входного фильтра. Стоит отметить, что в данном случае специально выбрана такая постоянная времени, регулятора, чтобы при определенных значениях входного напряжения и сопротивления нагрузки ППН без входного фильтра терял устойчивость (правее линии  $L_{N0}$ ). Это позволит получить более полную информацию о закономерностях эволюции областей неустойчивости ЖДР при изменении параметров ВХФ.

Как видно из рисунка 3, а, введение ВХФ меняет конфигурацию границ

устойчивости и размеры области устойчивости ЖДР. При некоторых наборах параметров на карте динамических режимов наблюдаются две области неустойчивости, расположенные на разных краях диаграммы.

Так, например, при наборе параметров № 1 на диаграмме присутствуют две области нежелательных режимов (слева от  $L_{N12}$  и справа от  $L_{N11}$ ). Некоторые границы при различных наборах параметров ВХФ полностью совпадают (например,  $L_{N11}$ ,  $L_{N41}$ ,  $L_{N0}$ ).



**Рисунок 3.** Двухпараметрические диаграммы: карта динамических режимов (а); диаграмма размаха колебаний выходного напряжения преобразователя без входного фильтра (b); диаграмма размаха колебаний выходного напряжения преобразователя с входным фильтром (набор параметров № 1) (c); диаграмма размаха колебаний выходного напряжения преобразователя с входным фильтром (набор параметров № 2) (d)

**Figure 3.** Two-parameter diagrams: dynamic modes map (a); diagram of the peak-to-peak output voltage fluctuations of the converter without an input filter (b); diagram of the peak-to-peak output voltage fluctuations of the converter with an input filter (parameter set No. 1) (c); diagram of the peak-to-peak output voltage fluctuations converter voltage with input filter (parameter set No. 2) (d)

Также из рисунка 3, *a* видно, что при переходе от набора № 1 к набору № 2 и далее к набору № 3 граница области устойчивости смещается влево, расширяя тем самым область нежелательных динамических режимов.

При наборах параметров ВХФ № 1 и № 4 на диаграмме наблюдаются две области неустойчивости. Одна располагается в области малых значений сопротивления нагрузки, а вторая — в области больших сопротивлений нагрузки. Причем последняя по размеру полностью совпадает с областью неустойчивости ППН без ВХФ. При наборе параметров ВХФ № 4 одна из областей неустойчивости ЖДР располагается слева вверху на карте динамических режимов и ограничивается линией  $L_{N41}$ .

На рисунке 3, *c, d* представлены диаграммы размаха пульсаций выходного напряжения в пространстве двух параметров системы для двух наборов параметров ВХФ, а на рисунке 3, *b* представлена аналогичная диаграмма для ППН без входного фильтра. Как видно из рисунка 3, введение ВХФ приводит к негативным последствиям. Так, использование фильтра с набором параметров № 1 приводит к значительным пульсациям выходного напряжения при малых

сопротивлениях нагрузки (рисунок 3, *c*), но при этом размах колебаний выходного напряжения в области нежелательных режимов при больших сопротивлениях нагрузки остается таким же, как в ППН без ВХФ (рисунок 3, *b*).

Использование ВХФ с набором параметров № 2 не привело к появлению области неустойчивости ЖДР при малых сопротивлениях нагрузки, но привело к расширению области нежелательных режимов при больших сопротивлениях нагрузки. Кроме того, в указанной области значительно увеличился размах колебаний выходного напряжения (примерно в 6 раз (рисунок 3, *d*)).

Рассмотрим АФЧХ отношения (7) в различных точках диаграммы на рисунке 3, *a* при наборе параметров ВХФ № 4. Точки  $P_1, P_2, P_3$  соответствуют  $U_{\text{вх}} = 26$  В, но при этом в точке  $P_1 R_{\text{н}} = 21$  Ом, в точке  $P_2 R_{\text{н}} = 56$  Ом, а в точке  $P_3 R_{\text{н}} = 109$  Ом. Данные АФЧХ приведены на рисунке 4, *a*.

Как следует из рисунка 4, *a*, в точке  $P_1$  АФЧХ огибает точку  $(-1, 0)$ , что говорит о неустойчивости системы «входной фильтр — преобразователь». Область неустойчивости ЖДР, в которой располагается  $P_1$ , ограничена линией  $L_{N42}$  (рисунок 3, *a*). Точка  $P_2$  соответствует области устойчивости, и соответствующую

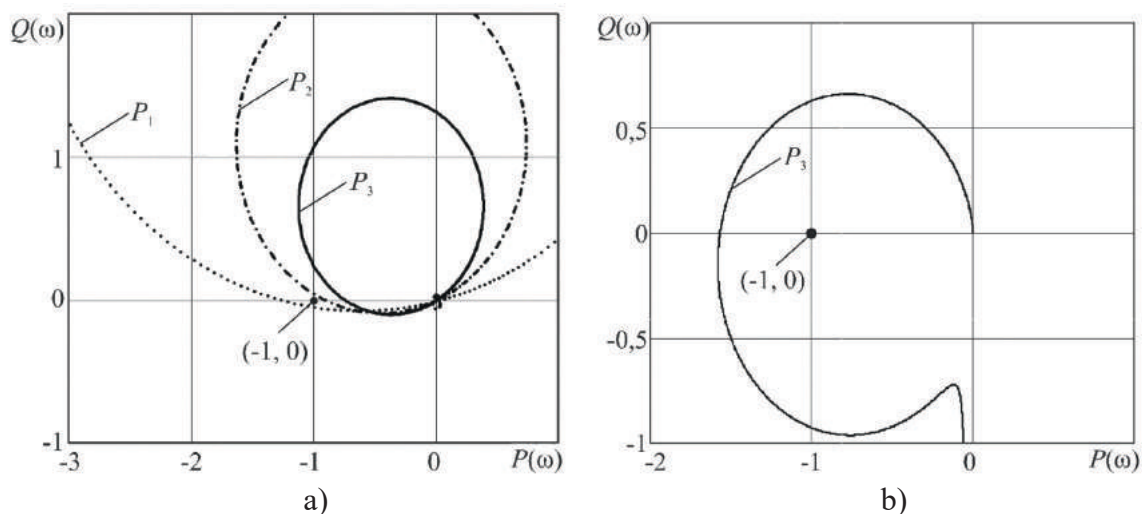


Рисунок 4. АФЧХ: отношения  $Z_{\text{выхф}}(s)/Z_{\text{вхп}}(s)$  (а); разомкнутого контура (б)

Figure 4. Nyquist plot:  $Z_{\text{outf}}(s)/Z_{\text{inc}}(s)$  ratio (a); open loop (b)

щая АФЧХ не огибает точку  $(-1, 0)$ . Точка  $P_3$  соответствует области неустойчивости ЖДР, но АФЧХ при этом также не огибает точку  $(-1, 0)$ . Как было сказано ранее, в точке  $P_3$  является неустойчивым ППН без ВХФ, что может быть определено по АФЧХ разомкнутого контура (7) ППН без ВХФ, которая представлена на рисунке 4, *b*. Из рисунка видно, что АФЧХ разомкнутого контура в точке  $P_3$  огибает точку  $(-1, 0)$ . Отсюда следует, что при определении границ областей неустойчивости ППН с входным фильтром с использованием линеаризованных моделей для каждой границы требуется использовать разные критерии, что затрудняет анализ динамики системы. В то же время при использовании рассмотренного ранее метода, базирующегося на теории точечных отображений, для всех границ используется единый критерий — выход старшего мультипликатора за пределы единичного круга.

Далее рассмотрим семейство АФЧХ в упомянутых ранее трех точках ( $P_1, P_2, P_3$ ) для набора параметров ВХФ № 2. Как следует из рисунка 3, *a*, область неустойчивости ЖДР ограничена линией  $L_{N21}$ , при этом  $L_{N21}$  лежит левее линии  $L_{N0}$ , соответствующей ППН без ВХФ. Это говорит о том, что в данном случае ВХФ оказывает влияние на динамику системы в области высоких сопротивлений нагрузки. Соответствующая АФЧХ, построенная на основании (6), приведена на рисунке 5.

Из рисунка 5 видно, что в точках  $P_2$  и  $P_3$ , которые лежат правее линии  $L_{N21}$ , АФЧХ огибает точку  $(-1, 0)$ , что отличает данную ситуацию от ситуации на рисунке 4. При этом в рассматриваемом случае точка  $P_2$  лежит левее линии  $L_{N0}$ , в точка  $P_3$  — правее. Это говорит о том, что граница  $L_{N21}$  может быть построена на основе анализа отношения (6).

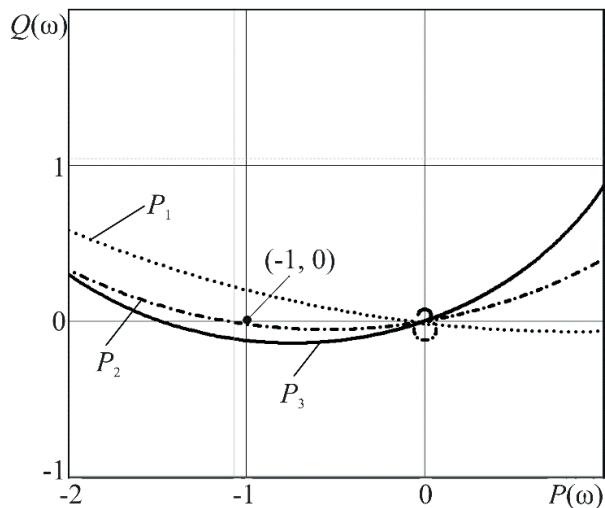


Рисунок 5. АФЧХ отношения  $Z_{\text{выхф}}(s)/Z_{\text{вхп}}(s)$

Figure 5. Nyquist plot of  $Z_{\text{out}}(s)/Z_{\text{inc}}(s)$  ratio

### Выводы

1. Для определения границ областей устойчивости и неустойчивости системы целесообразно использовать метод, базирующийся на теории точечных отображений, который оперирует понятием неподвижной точки отображения и показывает лучшие результаты сходимости численных методов, применяемых в расчетах.

2. Показано, что применение ВХФ приводит к трансформации карты динамических режимов по сравнению с ППН без ВХФ. При этом трансформация может происходить по двум сценариям: при относительно низких резонансных частотах ВХФ в области малых сопротивлений нагрузки появляется область неустойчивости системы, границы которой могут быть определены как с помощью метода точечных отображений, там и с помощью анализа АФЧХ отношения  $Z_{\text{выхф}}(s)/Z_{\text{вхп}}(s)$ . При этом область неустойчивости, существовавшая в системе без ВХФ при больших сопротивлениях нагрузки и обусловленная лишь выбранными параметрами регулятора, остается без изменений. Ее граница также может быть определена с помощью анализа старшего мультипликатора однократного режима или с помощью анализа АФЧХ разомкнутого контура. Анализ отношения  $Z_{\text{выхф}}(s)/Z_{\text{вхп}}(s)$

в данном случае результатов не дает; при более высоких резонансных частотах ВХФ область неустойчивости желаемого динамического режима при малых сопротивлениях нагрузки не появляется, но при этом происходит расширение (или появление) такой области при больших сопротивлениях нагрузки, при этом ее граница может быть определена как с помощью анализа старшего мультипликатора однократного режима, там и с помощью анализа отношения  $Z_{\text{выхф}}(s)/Z_{\text{вхп}}(s)$ . Анализ АФЧХ разомкнутого контура в этом случае лишь даст границу области неустойчивости для системы без ВХФ, что в данном случае недостаточно.

3. При проектировании ППН с входным фильтром на основе малосигналь-

ного моделирования в начале необходимо обеспечить устойчивость ППН без ВХФ в заданных диапазонах вариации параметров или внешних воздействий, а после этого необходимо провести анализ устойчивости ППН с входным фильтром на основе анализа АФЧХ отношения  $Z_{\text{выхф}}(s)/Z_{\text{вхп}}(s)$  и/или метода, базирующегося на теории точечных отображений, в тех же параметрических диапазонах. После этого необходим контроль динамики по результатам расчета во временной области со случайных начальных условий с использованием разработанной нелинейной динамической модели. При этом анализируется не только установившийся режим, но и качество переходных процессов.

#### Список источников

1. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Устойчивость и электромагнитная совместимость устройств и систем электропитания. М.: Научно-техническое издательство «Горячая линия-Телеком», 2019. 540 с. ISBN 978-5-9912-0712-6. EDN: XYPAVF.

2. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Устойчивость систем электропитания // Электропитание. 2012. № 2. С. 5–19. EDN: ZEPHNP.

3. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В., Павлов А.В., Андреев Д.А., Мелихов Ю.М. Исследование условий обеспечения устойчивости ИВЭП при высоком затухании входного фильтра // Практическая силовая электроника. 2012. № 4 (48). С. 10–17. EDN: PEXESZ.

4. Баушев В.С., Жусубалиев Ж.Т., Михальченко С.Г. Стохастичность в динамике стабилизатора напряжения с широтно-импульсным регулированием // Электричество. 1996. № 3. С. 69–75.

5. Баушев В.С., Жусубалиев Ж.Т. О недетерминированных режимах функционирования стабилизатора напряжения с широтно-импульсным регулированием // Электричество. 1992. № 8. С. 47–53. EDN: VULKBL.

6. Жусубалиев Ж.Т. К исследованию хаотических режимов преобразователя напряжения с широтно-импульсной модуляцией // Электричество. 1997. № 6. С. 40–46. EDN: MOYFNV.

7. Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E. Bifurcations and Chaos in Piece-Wise-Smooth Dynamical Systems. Singapore: World Scientific Pub Co Inc., 2003. 376 p. DOI: 10.1142/5313.

8. Белов Г.А., Малинин Г.В. Поиск неподвижных точек отображения и исследование бифуркаций импульсного стабилизатора напряжения // Вестник Чувашского университета. 1999. № 1–2. С. 129–138. EDN: MTFQUE.

9. Белов Г.А. Исследование колебаний в импульсном стабилизаторе напряжения вблизи границы устойчивости // Электричество. 1990. № 9. С. 44–51. EDN: TRHBCN.

10. Андриянов А.И. Развитие теории управления нелинейными динамическими процессами импульсных систем электропитания: дис. ... д-ра тех. наук. Брянск, 2022. 515 с. EDN: WWNSIN.

11. Севернс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания. М.: Энергоатомиздат, 1988. 294 с. ISBN: 5-283-02435-0.

12. Белов Г.А. Теория импульсных преобразователей. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. 330 с. ISBN: 978-5-7677-2224-2. EDN: WLFJLV.

13. Демирчян К.С., Бутырин П.А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей. М.: Высшая школа, 1988. 335 с. ISBN: 5-06-001431-2.

14. Андриянов А.И. Теория систем управления транзисторных преобразователей постоянного напряжения. 2-е изд. перераб. и доп. Курск: Университетская книга, 2023. 145 с. ISBN: 978-5-907818-00-2. DOI: 10.47581/2023.Andrianov-AI-01. EDN: OTAKFX.

15. Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е., Астахов В.В. Нелинейная динамика хаотических и

стохастических систем: Фундам. основы и избр. проблемы. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1999. 367 с. ISBN: 5-292-02285-3.

### References

1. Dmitrikov V.F., Shushpanov D.V. *Ustoichivost' i elektromagnitnaya sovmestimost' ustroystv i sistem elektropitaniya* [Stability and Electromagnetic Compatibility of Devices and Power Supply Systems]. Moscow, Nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo «Goryachaya liniya-Telekom», 2019. 540 p. ISBN 978-5-9912-0712-6. EDN: XYPAVF. [in Russian].
2. Dmitrikov V.F., Shushpanov D.V. *Ustoichivost' sistem elektropitaniya* [Stability of Power Supply Systems]. *Elektropitanie — Power Supply*, 2012, No. 2, pp. 5–19. EDN: ZEPHNP. [in Russian].
3. Dmitrikov V.F., Shushpanov D.V., Pavlov A.V., Andreev D.A., Melikhov Yu.M. *Issledovanie uslovii obespecheniya ustoichivosti IVEP pri vysokom zatukhanii vkhodnogo fil'tra* [Power Supply Stabilization Conditions Investigation by High Attenuation of Input Filter]. *Prakticheskaya silovaya elektronika — Practical Power Electronics*, 2012, No. 4 (48), pp. 10–17. EDN: PEXESZ. [in Russian].
4. Baushev V.S., Zhusubaliev Zh.T., Mikhail'chenko S.G. *Stokhastichnost' v dinamike stabilizatora napryazheniya s shirotno-impul'snym regulirovaniem* [Stochasticity in the Dynamics of a Voltage Stabilizer with Pulse-Width Regulation]. *Elektrichestvo — Elektrichestvo*, 1996, No. 3, pp. 69–75. [in Russian].
5. Baushev V.S., Zhusubaliev Zh.T. *O nedeterminirovannykh rezhimakh funktsionirovaniya stabilizatora napryazheniya s shirotno-impul'snym regulirovaniem* [On Non-Deterministic Operating Modes of a Voltage Stabilizer with Pulse-Width Regulation]. *Elektrichestvo — Elektrichestvo*, 1992, No. 8, pp. 47–53. EDN: VULKBL. [in Russian].
6. Zhusubaliev Zh.T. *K issledovaniyu khaoticheskikh rezhimov preobrazovatelya napryazheniya s shirotno-impul'snoi modulyatsiei* [On Investigation of Chaotic Regimes of a Voltage Converter with Pulse-Width Modulation]. *Elektrichestvo — Elektrichestvo*, 1997, No. 6, pp. 40–46. EDN: MOYFNV. [in Russian].
7. Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E. *Bifurcations and Chaos in Piece-Wise-Smooth Dynamical Systems*. Singapore, World Scientific Pub Co Inc., 2003. 376 p. DOI: 10.1142/5313.
8. Belov G.A., Malinin G.V. *Poisk nepodviznykh tochek otobrazheniya i issledovanie bifurkatsii impul'snogo stabilizatora napryazheniya* [Search for Fixed Mapping Points and Study of Bifurcations of a Pulse Voltage Stabilizer]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta — Bulletin of the Chuvash University*, 1999, No. 1–2, pp. 129–138. EDN: MTFQUE. [in Russian].
9. Belov G.A. *Issledovanie kolebanii v impul'snom stabilizatore napryazheniya vblizi granitsy ustoichivosti* [A Study of Oscillation in an Impulse Voltage Stabilizer near the Stability Limit]. *Elektrichestvo — Elektrichestvo*, 1990, No. 9, pp. 44–51. EDN: TRHBCN. [in Russian].
10. Andriyanov A.I. *Razvitie teorii upravleniya nelineinymi dinamicheskimi protsessami impul'snykh sistem elektropitaniya: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Development of the Theory of Control of Nonlinear Dynamic Processes of Pulsed Power Supply Systems: Dr. Engin. Sci. Diss.]. Bryansk, 2022. 515 p. EDN: WWNSIN. [in Russian].
11. Severns R., Bloom G. *Impul'snye preobrazovateli postoyannogo napryazheniya dlya sistem vtorichnogo elektropitaniya* [Pulse DC-DC Converters for Secondary Power Supply Systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 294 p. ISBN: 5-283-02435-0. [in Russian].
12. Belov G.A. *Teoriya impul'snykh preobrazovatelei* [Theory of Pulse Converters]. Cheboksary, Izd-vo Chuvash. un-ta, 2016. 330 p. ISBN: 978-5-7677-2224-2. EDN: WLFJLV. [in Russian].
13. Demirchyan K.S., Butyrin P.A. *Modelirovanie i mashinnyi raschet elektricheskikh tsepei* [Modeling and Machine Calculation of Electrical Circuits]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 335 p. ISBN: 5-06-001431-2. [in Russian].
14. Andrianov A.I. *Teoriya sistem upravleniya tranzistornykh preobrazovatelei postoyannogo napryazheniya* [Theory of Control Systems for Transistor DC Voltage Converters]. 2-e izd. pererab. i dop. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2023. 145 p. ISBN: 978-5-907818-00-2. DOI: 10.47581/2023.Andrianov-AI-01. EDN: OTAKFX. [in Russian].
15. Anishchenko V.S., Vadivasova T.E., Astakhov V.V. *Nelineinaya dinamika khaoticheskikh i stokhasticheskikh sistem: Fundamental'nye osnovy i izbrannye problem* [Nonlinear Dynamics of Chaotic and Stochastic Systems: Fundamentals and Selected Problems]. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 1999. 367 p. ISBN: 5-292-02285-3. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 11.04.2024; одобрена после рецензирования 16.04.2024; принята к публикации 24.04.2024.

The article was submitted 11.04.2024; approved after reviewing 16.04.2024; accepted for publication 24.04.2024.

Научная статья

УДК 621.31; 004.93; 681.5.015

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-2-22-36

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 110(35)/10 кВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ ТЕПЛОВИЗИОННОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА



**Илья Сергеевич Сухачев**

***Ilya S. Sukhachev***

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электроэнергетики,  
Тюменский индустриальный университет,  
Тюмень, Россия



**Владислав Александрович Шеломенцев**

***Vladislav A. Shelomentsev***

ассистент кафедры электроэнергетики,  
Тюменский государственный университет,  
Тюмень, Россия



**Гузель Азатовна Хмара**

***Guzel A. Khmara***

кандидат технических наук, доцент,  
заведующая кафедрой электроэнергетики,  
Тюменский индустриальный университет,  
Тюмень, Россия



**Сергей Владимирович Сидоров**

***Sergei V. Sidorov***

старший преподаватель кафедры электроэнергетики,  
Тюменский индустриальный университет,  
Тюмень, Россия



**Евгений Игоревич Попов**

***Evgeniy I. Popov***

ассистент кафедры электроэнергетики,  
Тюменский индустриальный университет,  
Тюмень, Россия



*Алена Алексеевна Швецова*

*Alena A. Shvetsova*

*инженер, ООО ВУЭР-КОРПОРАЦИИ АК «ЭСКМ»,  
Курчатов, Россия*

### **Актуальность**

В настоящее время электроэнергетические системы претерпевают интенсивное развитие и усложнение структуры, связанное с внедрением новых технологических объектов — потребителей электрической энергии и сопутствующих функциональных узлов электрической сети, оценка надежности которых производится согласно Приказу Минэнерго № 676 от 26.07.2017 г. по показателям технического состояния и включает 1234 параметра. Основными функциональными узлами, а также наиболее распространенными элементами электроэнергетической системы являются силовые трансформаторы, оцениваемые по 243 параметрам, значительную часть которых получают посредством методов термического и визуального контроля. Внедрение автоматизированных систем мониторинга параметров диагностирования технического состояния силовых трансформаторов, развития интеллектуальных систем обработки результатов измерения физических величин позволят минимизировать ошибки обнаружения дефектов и неисправностей электрооборудования и перейти к его риск-ориентированному управлению. Таким образом, целесообразна разработка системы идентификации технического состояния высоковольтных вводов силовых трансформаторов как узлов, наиболее подверженных повреждениям.

### **Цель исследования**

Обеспечение устойчивости электроэнергетических систем путем разработки системы идентификации состояния силовых трансформаторов на основе анализа тепловизионных данных и алгоритмов искусственного интеллекта и последующего перехода на ее основе к риск-ориентированному управлению в электроэнергетике.

### **Методы исследования**

Термографический и визуальный контроль высоковольтных вводов силового трансформатора; методы искусственного интеллекта: YOLO, ResNet, FEDOT, Random Forest; бинарная классификация; метрики оценки эффективности разработанной системы; стресстестирование модели машинного обучения.

### **Результаты**

Разработана система идентификации состояния высоковольтных вводов силовых трансформаторов на основе анализа методами искусственного интеллекта результатов термографического и визуального контроля. Произведена оценка разработанной системы с помощью расчета метрик ее эффективности: значение метрики ROC AUC свидетельствует о достаточно высокой точности идентификации дефектов, при обработке термограмм с дефектами нормализованные метрики значения ROC AUC указывают на устойчивость разработанной системы к различным типам дефектов термограмм, а также на ее способность сохранять высокую эффективность в реальных условиях. Разработанная система обладает способностью адаптироваться к различным источникам данных (термограммам, показателям электрической нагрузки, климатическим условиям и пр.) и типам их дефек-

### **Ключевые слова**

силовой трансформатор, идентификация технического состояния, искусственная нейронная сеть, машинное обучение, тепловизионное обследование, YOLO, ResNet, FEDOT, Random Forest, бинарная классификация, метрики эффективности



тов. Система демонстрирует удовлетворительные результаты, в том числе при малом количестве обучающих записей, что позволяет использовать ее в условиях ограниченной доступности исходных данных.

**Для цитирования:** Сухачев И. С., Шеломенцев В. А., Хмара Г. А., Сидоров С. В., Попов Е. И., Швецова А. А. Идентификация состояния силовых трансформаторов 110(35)/10 кВ на основе анализа данных тепловизионного обследования и методов искусственного интеллекта // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 2. Т. 20. С. 22-36. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-22-36>.

Original article

## IDENTIFICATION OF THE CONDITION OF 110(35)/10 kV POWER TRANSFORMERS BASED ON THERMOGRAPHIC SURVEY DATA ANALYSIS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

### Relevance

At present, power systems are experiencing rapid development and increasing complexity in their structure due to the integration of new technological entities — consumers of electrical energy and associated functional nodes of the electrical network. The reliability of these components is assessed in accordance with the Ministry of Energy Order No. 676 dated July 26, 2017, based on technical condition indicators, encompassing 1234 parameters. Power transformers, being among the most common and critical functional nodes in the power system, are evaluated based on 243 parameters, a significant portion of which are obtained through thermal and visual inspection methods. The adoption of automated systems for monitoring diagnostic parameters of the technical condition of power transformers and the development of intelligent systems for processing the results of physical measurements can minimize the detection errors of defects and malfunctions in electrical equipment and transition to risk-oriented management. Thus, it is advisable to develop a system for identifying the technical condition of high-voltage leads of power transformers, as these nodes are most susceptible to damage.

### Aim of research

Ensuring the stability of power systems through the development of a power transformer condition identification system based on thermographic data analysis and artificial intelligence algorithms, and subsequent transition to risk-oriented management in power engineering.

### Research methods

Thermographic and visual inspection of high-voltage leads of power transformers; artificial intelligence methods: YOLO, ResNet, FEDOT, Random Forest; binary classification; performance metrics of the developed system; stress testing of the machine learning model.

### Results

System for identifying condition of high-voltage leads of power transformers has been developed based on analysis of thermographic and visual inspection results using artificial intelligence methods. System has been evaluated by calculating its performance metrics: ROC AUC metric value indicates high accuracy in defect identification. When processing thermograms with defects, normalized ROC AUC metrics demonstrate system's resilience to various types of thermogram defects and its ability to maintain high efficiency under real-world conditions. System is capable of adapting to various data sources (thermograms, electrical load indicators, climatic

### Keywords

power transformer, technical condition identification, artificial neural network, machine learning, thermal imaging, YOLO, ResNet, FEDOT, Random Forest, binary classification, performance metrics

conditions, etc.) and types of defects. It shows satisfactory results, even with small number of training records, which allows its use in situations with limited availability of initial data.

**For citation:** Sukhachev I. S., Shelomentsev V. A., Khmara G. A., Sidorov S. V., Popov E. I., Shvetsova A. A. Identifikatsiya sostoyaniya silovyykh transformatorov 110(35)/10 kV na osnove analiza dannykh teplovizionnogo obsledovaniya i metodov iskusstvennogo intellekta [Identification of the Condition of 110(35)/10 kV Power Transformers Based on Thermographic Survey Data Analysis and Artificial Intelligence Methods]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 2, Vol. 20, pp. 22-36 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-22-36>.

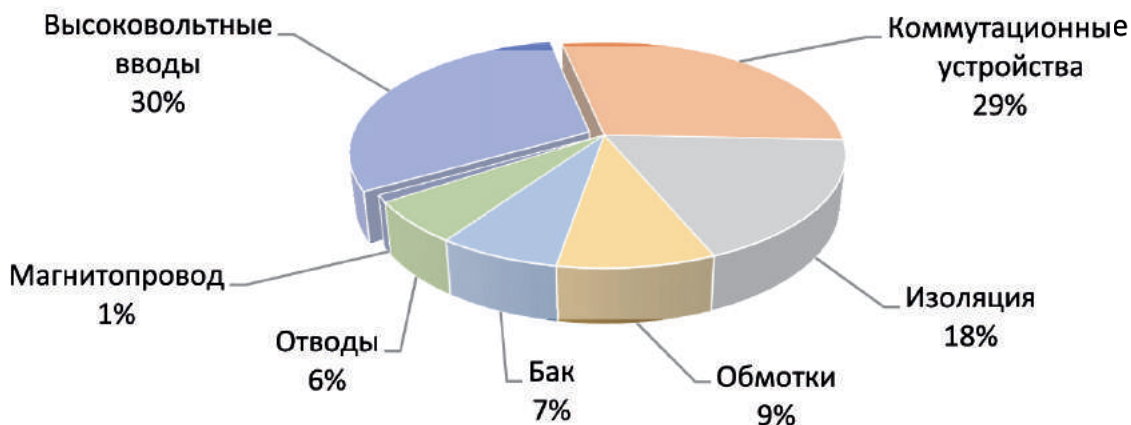
## Введение

В настоящее время в электроэнергетических системах имеет место высокая аварийность силовых трансформаторов, при этом до 30 % повреждений связано с их высоковольтными вводами, согласно статистическим данным [1], приведенным на рисунке 1.

Существующие методы диагностики высоковольтных вводов силовых трансформаторов без снятия напряжения включают визуальный осмотр дежурным персоналом с регламентированного расстояния. Также, начиная с 2023 г., появилось требование осуществлять термографический контроль вводов для определения перегревов отдельных фаз, который также осуществляется дежурным персоналом. Проведенный визуальный и термографический контроль оформляют протоколом, в котором фиксируются изображения в видимом и инфракрасном

диапазонах, а также текущее состояние высоковольтных вводов. Анализируя полученные данные, специалист делает вывод о состоянии силовых вводов трансформатора по полученным фотографиям и термограммам. В результате этого возникает возможность ложного определения технического состояния высоковольтных вводов в связи с человеческим фактором. Также специалисту сложно отследить динамику изменений состояния высоковольтных вводов, так как могут быть недоступны протоколы предыдущего диагностирования, либо быть минимальные различия, недоступные для анализа человеком без специальных технических средств.

На качество снимков в видимом и инфракрасном диапазонах могут влиять внешние факторы, такие как температура окружающей среды, облачность, скорость ветра и влажность.



**Рисунок 1.** Диаграмма аварийности трансформаторов мощностью по узлам на основе статистических данных

**Figure 1.** Breakdown of failure incidences in power transformers with capacities by components

Следовательно, существующие методики позволяют выявить только критическое состояние вводов трансформатора. Однако нет ответа, какова причина отклонений параметров, и с какой скоростью развивается тот или иной дефект. При такой постановке полноценный переход к риск-ориентированному обслуживанию не представляется возможным для текущего уровня развития технологий мониторинга, контроля параметров и анализа их влияния на остаточный ресурс силовых трансформаторов.

Каждый из существующих традиционных методов диагностики ориентирован на определенные маркеры деградации или повреждения силовых трансформаторов. Недостатком некоторых видов диагностики является необходимость полного отключения трансформатора от сети.

Визуальные методы [2–5] диагностики трансформаторов основаны на прямом наблюдении и использовании соответствующих технических средств. Эти методы позволяют проводить внешний осмотр трансформатора, выявляя следы коррозии, механических повреждений, износа или других видимых дефектов. Электрические методы диагностики трансформаторов [6–9] направлены на анализ электрических параметров и сигналов, которые могут указывать на различные неисправности или аномалии в работе оборудования.

Акустические методы диагностики трансформаторов [10–12] основаны на обнаружении и анализе звуковых или вибрационных аномалий, излучаемых оборудованием. Эти методы помогают выявлять внутренние неисправности, частичные разряды и другие аномалии, которые создают характерные акустические отпечатки.

Механические методы диагностики трансформаторов [13, 14] направлены на обнаружение и диагностику структур-

ных или физических аномалий в оборудовании. Данные методы идентифицируют физические изменения или деформации, чтобы предоставить информацию о структурной целостности трансформатора.

Химические методы диагностики трансформаторов [15, 16] направлены на анализ химических свойств или состава, связанных с оборудованием или конструкциями. Химические методы помогают определить деградацию изоляционных материалов, загрязнение или другие аномалии, которые могут указывать на потенциальные проблемы или отказы.

Компьютерное зрение в сочетании с методами глубокого обучения [17–19], такими как нейронные сети, открыло новые возможности для интерпретации и понимания визуальных данных машинами. К преимуществам таких систем можно отнести безопасность, корпоративный сервис, обнаружение малозаметных дефектов, сокращение времени на рутинные задачи и автономность.

Термограммы объектов электротехнического комплекса можно отнести к классу изображений со средним уровнем детализации [20]. Кроме того, специфика технологического процесса электроэнергетической системы такова, что зачастую изображение с оборудованием подстанции содержит в себе множество внешне похожих объектов: вводы силового трансформатора, трансформаторы тока, ограничители перенапряжения и т.д.

Для человека визуальное определение конкретного объекта не представляет труда, однако для системы компьютерного зрения такой процесс может быть затруднительным. В связи с этим процесс анализа термограмм для определения дефекта вводных изоляторов подразделяется на две самостоятельных задачи: распознавание изоляторов на изображении (детекция) и непосредственное

определение дефектов на распознанных изоляторах (бинарная классификация).

### Разработка системы идентификации технического состояния

Функциональная схема системы идентификации технического состояния высоковольтных вводов силовых трансформаторов представлена на рисунке 2.

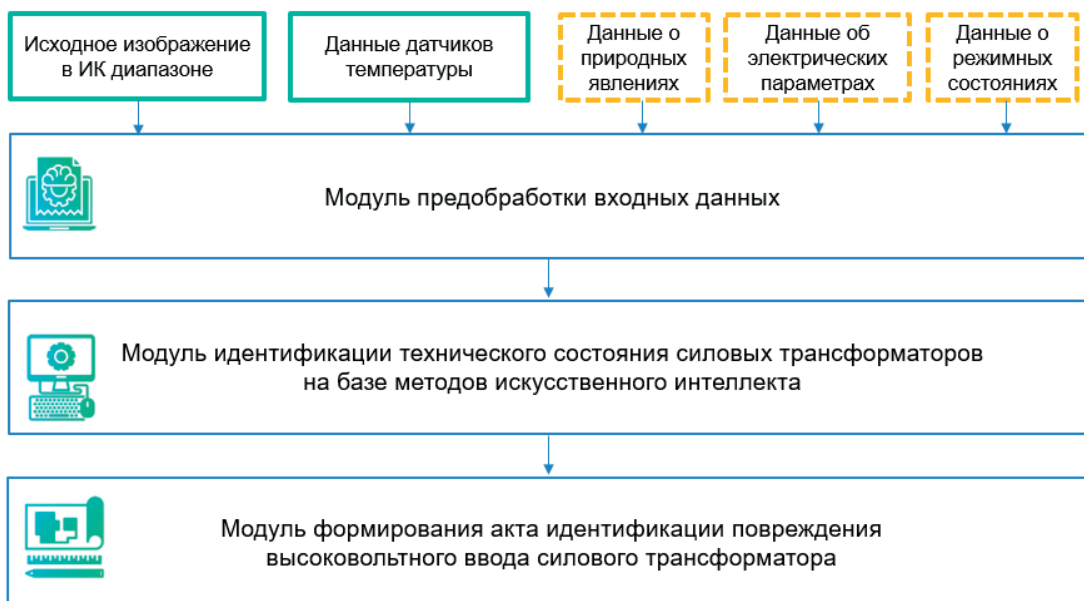
На вход системы поступает массив данных, содержащий результаты термографического (температурные характеристики) и визуального контроля (термограммы), относящихся к высоковольтным вводам силовых трансформаторов. Также целесообразно дополнить массив данных информацией о природно-климатических факторах (температура окружающей среды, влажность воздуха, атмосферное давление, инсоляция и прочие), об электрических параметрах трансформатора (величина и частота напряжения, тока, мощность) и о режимных состояниях трансформатора (нормальное, предаварийное, аварийное), что приведет к повышению точности иден-

тификации технического состояния, возможности оценки остаточного ресурса и переходу к риск-ориентированному обслуживанию трансформатора.

Входной массив данных (датасет) подвергается анализу и структурированию по типу данных в модуле предобработки с целью повышения достоверности их интерпретации. Данные визуального контроля подвергают следующей обработке: подавление шума, масштабирование, коррекция искажений и выделение значимых объектов. В свою очередь, данные термографического контроля подлежат очистке, стандартизации и нормализации.

Анализируя предобработанные данные, модуль идентификации технического состояния силовых трансформаторов генерирует результат идентификации дефекта в соответствии с архитектурой модели машинного обучения, схема которой приведена на рисунке 3.

Модуль идентификации технического состояния силовых трансформаторов включает три компонента: *YOLO* [21], *ResNet* [22] и *FEDOT* [23].



**Рисунок 2.** Функциональная схема системы идентификации технического состояния высоковольтных вводов силовых трансформаторов

**Figure 2.** The functional diagram of the high-voltage input power transformer condition identification system

*YOLO (You Only Look Once)* версии 8 — это передовая модель машинного обучения, представляющая собой искусственную нейронную сеть, оптимизированную для высокой скорости и точности обнаружения изоляторов на термограммах, координаты которых передаются искусственной нейронной сети глубокого обучения *ResNet (Residual Network)*. *ResNet* применяется для извлечения признаков из изображений для решения задач классификации и сегментации термограмм с последующим обнаружением наличия поврежденных высоковольтных вводов силового трансформатора (дефектов) и передачей результатов платформе автоматизированной оптимизации выбора методов машинного обучения *FEDOT (Framework for Evolutionary Design of Training Transformations)*. На основе совокупности обработанных данных термографического контроля, данных *YOLO* и *ResNet* платформой *FEDOT* установлен метод *Random Forest* как наиболее подходящий для выполнения задачи бинарной классификации — определения наличия или

отсутствия дефектов высоковольтных вводов силового трансформатора. Результаты бинарной классификации используются модулем формирования акта идентификации повреждения для генерации документа, описывающего текущее состояние высоковольтного ввода силового трансформатора, что служит основой для принятия инженерных и эксплуатационных решений.

### Тестирование работы системы

Оценка работоспособности системы идентификации технического состояния высоковольтных вводов силовых трансформаторов проведена на основе датасета, сформированного по актам тепловизионного обследования, включающих данные визуального контроля (термограммы, изображения в видимом диапазоне) и данные термографического контроля (температуру нагрева, заключение из протокола термографического обследования). Датасет содержит 205 обучающих записей и 141 запись для тестирования.

Схемы процесса формирования акта обследования и обработки записей,

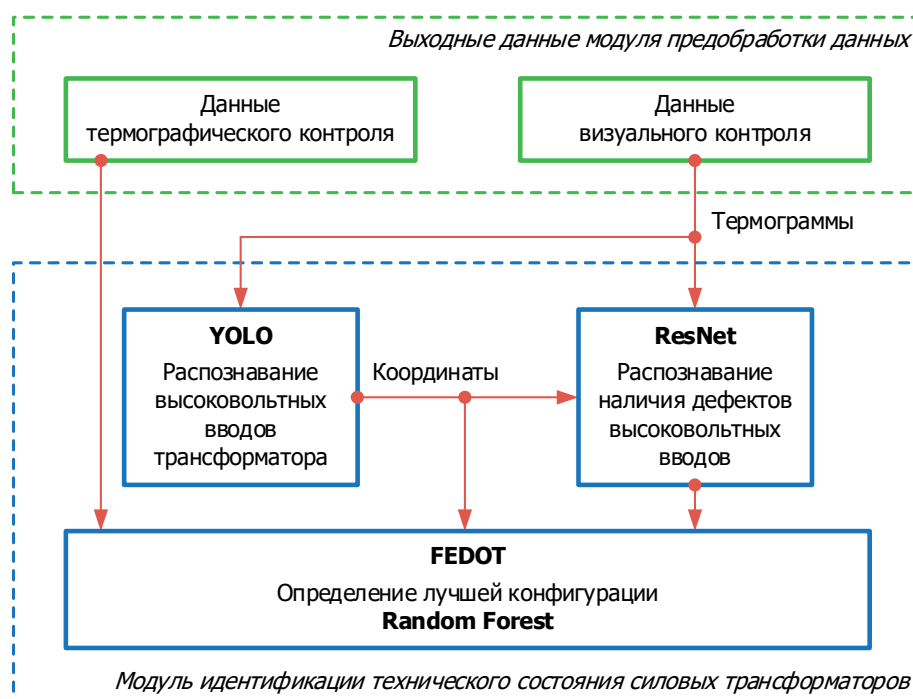
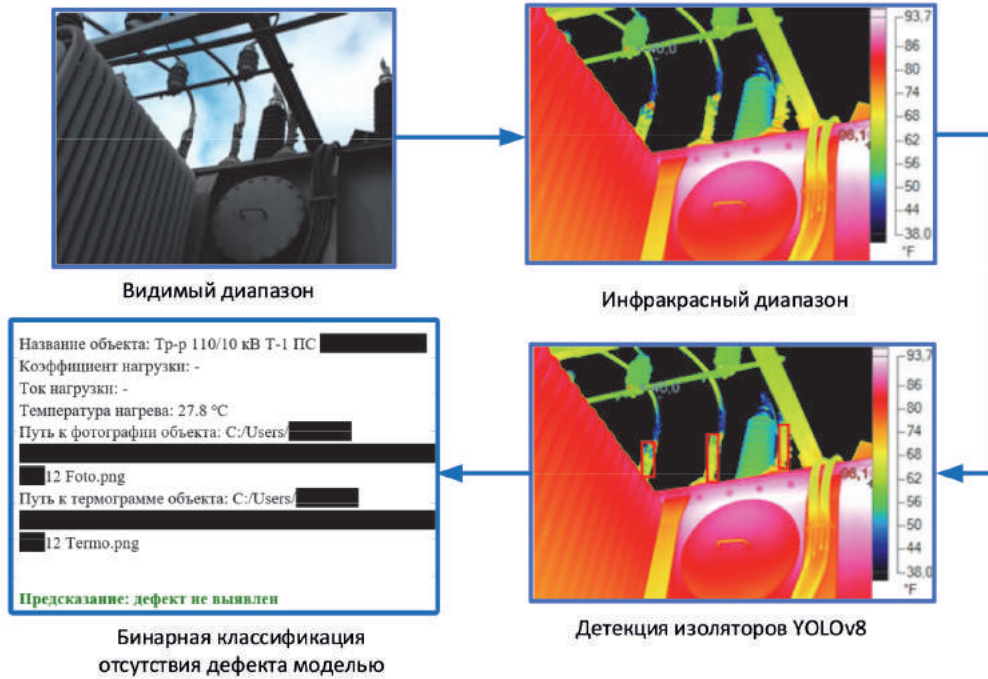


Рисунок 3. Схема архитектуры модели машинного обучения

Figure 3. Machine learning model architecture scheme

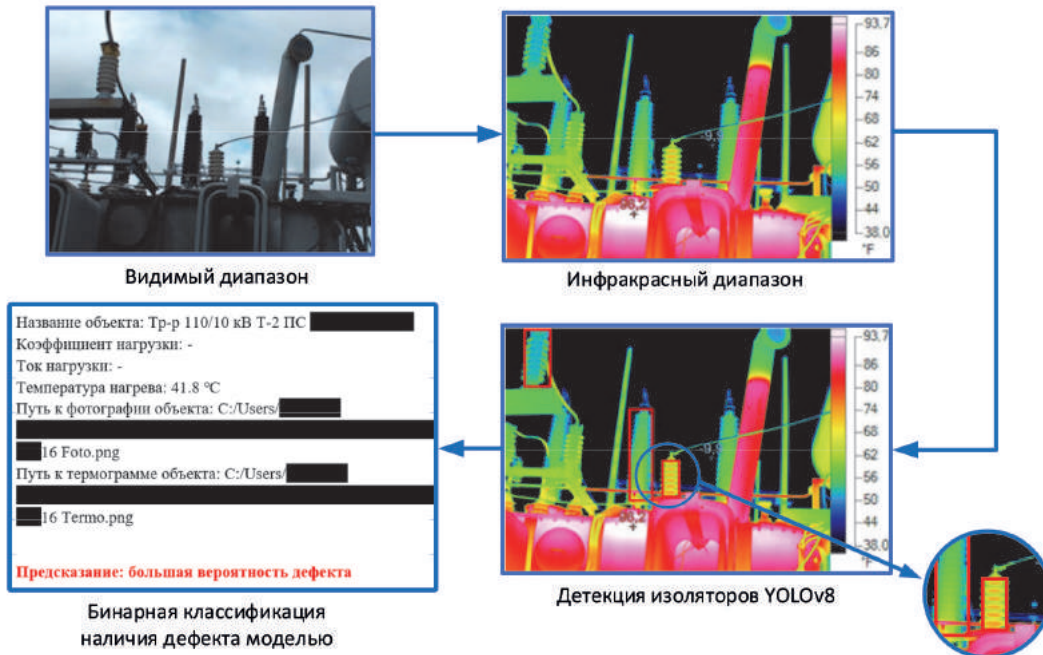
содержащих изображения трансформатора без дефекта высоковольтных вводов

и при его наличии, приведены на рисунках 4 и 5 соответственно.



**Рисунок 4.** Схема процесса обработки датасета и формирования акта обследования трансформатора при отсутствии дефекта высоковольтных вводов

**Figure 4.** Scheme of data array processing and formation of transformer inspection report in case of absence of high voltage bushings defect presence



**Рисунок 5.** Схема процесса обработки датасета и формирования акта обследования трансформатора при наличии дефекта высоковольтных вводов

**Figure 5.** Scheme of data array processing and formation of transformer inspection report in case of high voltage bushings defect presence

Результат обнаружения изоляторов на термограммах моделью машинного обучения *YOLO* изображен на рисунках 4, 5 красными прямоугольниками, координаты которых передаются искусственной нейронной сети глубокого обучения *ResNet* для определения дефектов распознанных изоляторов. Метод *Random Forest*, полученный платформой *FEDOT*, решает задачу бинарной классификации и генерирует итоговое заключение (прогноз) о наличии или отсутствии дефектов высоковольтных вводов силового трансформатора.

Оценка эффективности разработанной системы идентификации состояния силовых трансформаторов проведена путем расчета следующих метрик [24].

*Accuracy/Точность* — метрика, измеряющая общую долю истинных прогнозов от их общего количества:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{Total}, \quad (1)$$

где *TP* и *TN* — количество истинных положительных и отрицательных прогнозов соответственно; *Total* — общее количество прогнозов.

Положительный прогноз идентификации дефекта — высоковольтный ввод силового трансформатора не исправен (имеет дефект), отрицательный прогноз — ввод исправен.

*Precision/Точность классификации* — оценивает долю истинно положительных прогнозов среди всех положительных прогнозов:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (2)$$

где *FP* — количество ложных положительных прогнозов.

*Recall/Полнота* — измеряет способность правильно осуществлять положительные прогнозы:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (3)$$

где *FN* — количество ложных отрицательных прогнозов.

Высокая полнота указывает на то, что система работает с высокой достоверностью.

*F1-score* — среднегармоническое между метриками точности и полноты:

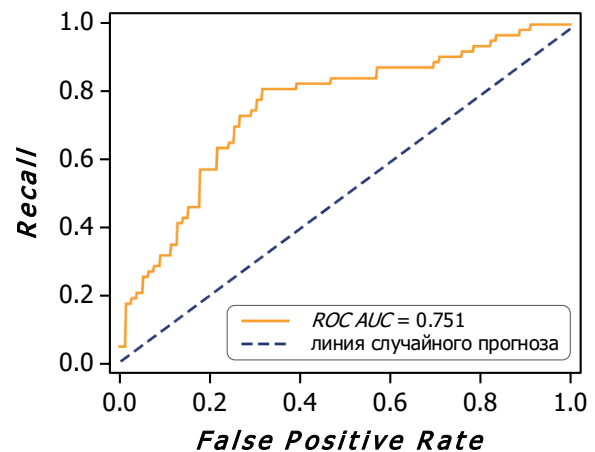
$$F1\text{-score} = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}. \quad (4)$$

*FPR (False Positive Rate)* — метрика, оценивающая долю ложных положительных прогнозов от всех отрицательных случаев:

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN}. \quad (5)$$

*FPR* позволяет определить, как часто система ошибочно идентифицирует исправный высоковольтный ввод силового трансформатора как поврежденный (имеющий дефект).

*ROC AUC (Receiver Operating Characteristic Area Under Curve)* — метрика оценки способности модели машинного обучения к бинарной классификации, вычисляемая как площадь под кривой в координатах *Recall* и *FPR* согласно рисунку 6.



**Рисунок 6.** ROC-кривая системы идентификации технического состояния высоковольтных вводов силовых трансформаторов

**Figure 6.** ROC-curve of the technical condition identification system for high-voltage power transformer inputs

Расчет метрик по формулам (1)–(5) для оценки эффективности разработанной системы идентификации состояния силовых трансформаторов на основе 141 тестовой записи сведен в таблицу 1.

На рисунке 7 приведены матрицы ошибок детекции изоляторов (слева) и бинарной классификации дефектов (справа).

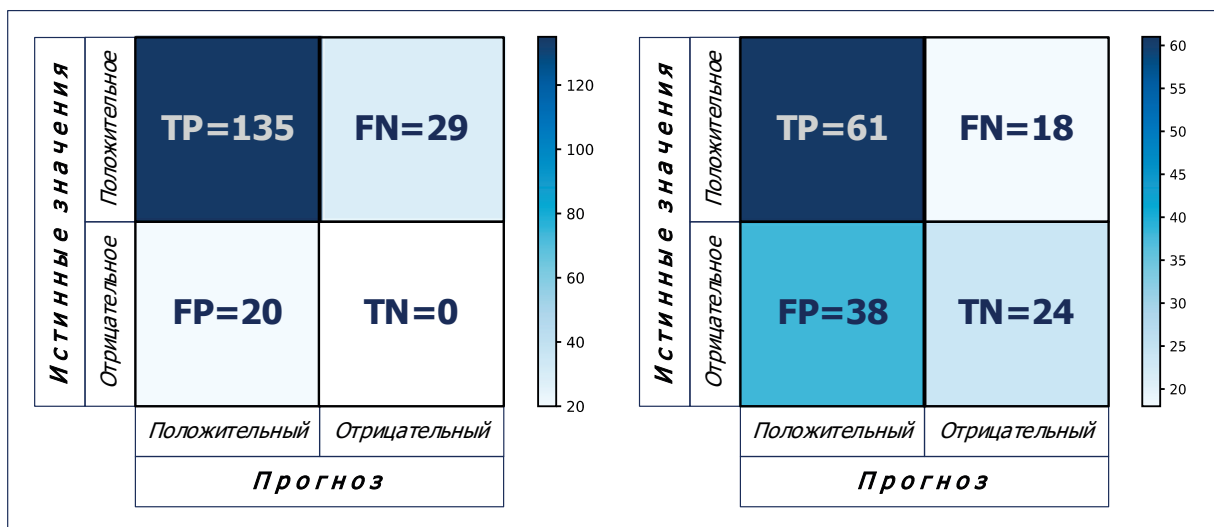
Анализ таблицы 1 и рисунков 6, 7 показал, что даже в условиях применения малой обучающей выборки модель

демонстрирует удовлетворительные результаты в задачах детекции изоляторов и идентификации состояния высоковольтных вводов силовых трансформаторов путем бинарной классификации дефектов изоляторов. Наилучший результат модели был получен в конфигурации *FEDOT Random Forest* с величиной метрики *ROC AUC = 0.751*, что в условиях ограниченного объема записей указывает на удовлетворительную работоспособность разработанной системы

**Таблица 1.** Метрики для оценки эффективности разработанной системы идентификации состояния силовых трансформаторов

**Table 1.** Metrics for evaluating the effectiveness of the developed power transformer condition identification system

	Precision Точность	Recall Полнота	F1-scope F1-мера	Количество записей	
Отрицательный прогноз: отсутствие дефекта	0.63	0.81	0.71	79	141
Положительный прогноз: наличие дефекта	0.62	0.39	0.48	62	
Ассигасу: доля правильных прогнозов	–	–	0.62	141	
Среднее арифметическое по прогнозам	0.62	0.60	0.59	141	
Средневзвешенное по прогнозам	0.62	0.62	0.61	141	



**Рисунок 7.** Матрицы ошибок детекции изоляторов (слева) и бинарной классификации дефектов (справа)

**Figure 7.** Confusion matrices for isolator detection (left) and binary classification of defects (right)



идентификации технического состояния высоковольтных вводов силовых трансформаторов, но требуется её дальнейшее улучшение для достижения величины метрики  $ROC AUC \geq 0.8$ .

### Стресс-тестирование модели

Известен ряд внешних факторов, оказывающих значительное влияние на качество тепловизионной съемки в процессе проведения термографического контроля и способных привести к дефектам термограмм: переэкспонированию, размытию, термическому шуму и прочим, как показано на рисунке 8, поэтому для оценки работоспособности системы идентификации состояния силовых трансформаторов необходимо выполнять стресс-тестирование на тестовых записях с соответствующими дефектами датасета.

Синтетический датасет с дефектами термограмм получен путём применения к графическим данным тестовых записей эффектов «засвета» (переэкспонирования) с коэффициентами  $\alpha$  и  $\beta$ , размытия по Гауссу с размером матрицы  $(w, h)$  и термического шума с коэффициентом  $\sigma$ .

Коэффициенты яркости  $\alpha$  и контрастности  $\beta$  в нормальном режиме равны 1 и 0 соответственно. Значения  $\alpha > 1$  и  $\beta > 0$  означают превышение яркости и контрастности (переэкспонирование). Эффект размытия зависит от размера

ядра матрицы *Gauss kernel*  $(w, h)$ , где  $w$  и  $h$  — ширина и высота ядра соответственно. Термический шум зависит от коэффициента  $\sigma$ , увеличение которого приводит к увеличению разброса значений пикселей вокруг их среднего значения и, следовательно, большему термическому шуму на термограмме.

Нормализованные значения метрик, рассчитанные согласно выражению (6) по результатам обработки предложенной системой идентификации состояния силовых трансформаторов тестовых записей с указанными выше дефектами термограмм при стресс-тестировании, приведены в таблице 2:

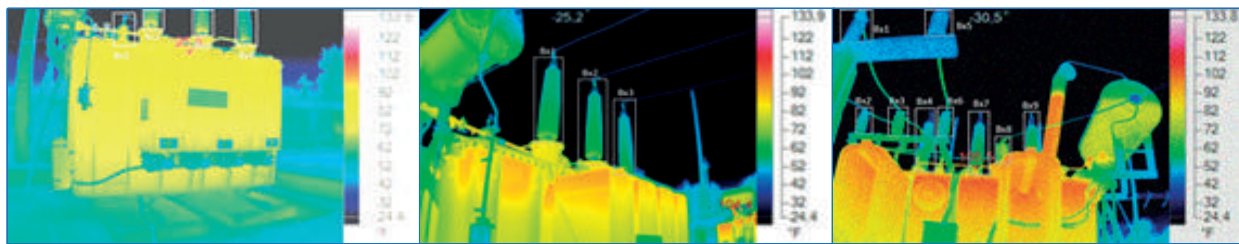
$$\text{Метрика}_{\text{норм}} = \frac{\text{Метрика}_{\text{стресс-тест}}}{\text{Метрика}_{\text{тест-датасет}}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где  $\text{Метрика}_{\text{норм}}$  — нормализованная метрика;

$\text{Метрика}_{\text{стресс-тест}}$  — нормализуемая метрика, полученная в результате стресс-тестирования;

$\text{Метрика}_{\text{тест-датасет}}$  — метрика, полученная в результате тестирования системы на тестовых записях.

Более высокие значения нормализованных метрик указывают на более эффективную работу системы при обработке соответствующего вида дефектов на термограммах. Таким образом, согласно таблице 2, разработанная система идентификации технического состояния наиболее эффективно справляется с термическим шумом на термо-



**Рисунок 8.** Примеры дефектов термограмм трансформаторов (слева направо): переэкспонирование, размытие, термический шум

**Figure 8.** Examples of transformer thermogram defects (from left to right): overexposure, blurring, thermal noise

**Таблица 2.** Метрики системы идентификации состояния силовых трансформаторов при стресс-тестировании**Table 2.** Metrics of the system for power transformers state identification during stress testing

Нормализованные метрики	Типы дефектов термограмм		
	Переэкспонирование: $\alpha = 1, \beta = 30$	Размытие: Gauss kernel = (9, 9)	Термический шум: $\sigma = 20$
<i>ROC AUC</i> , %	86.48	85.36	86.73
<i>Accuracy</i> , %	88.29	87.32	89.76
<i>Precision</i> , %	81.54	80.00	87.93
<i>Recall</i> , %	81.54	80.00	78.46
<i>F1-score</i> , %	81.54	80.00	82.93

граммах, в то время как наименее эффективно при обработке размытия изображений.

### Выводы

Таким образом, результаты тестирования разработанной системы идентификации технического состояния высоковольтных вводов силовых трансформаторов выявили следующее.

1. Базовое значение *ROC AUC* = 0.751, что свидетельствует о достаточно высокой точности идентификации дефектов в нормальных условиях. При обработке термограмм с дефектами нормализованные метрики *ROC AUC* находятся в диапазоне от 85.36 % при размытии до 86.73 % при термическом шуме. Это указывает на устойчивость разработанной системы к различным типам дефектов термограмм, а также на ее способность сохранять высокую эффективность в реальных условиях.

2. Процесс оценки технического состояния по данным термограммы на основе расчета метрик занимает от 16 до 18 с в зависимости от типа дефекта и объема обрабатываемых данных.

3. Разработанная система обладает способностью адаптироваться к различным источникам данных (термограммам,

показателям электрической нагрузки, климатическим условиям и пр.) и типам их дефектов.

4. Система обладает гибкой архитектурой, основана на современных компонентах *YOLO*, *ResNet*, *FEDOT* и алгоритмах, что позволяет интегрировать ее с существующими системами мониторинга и диагностирования силовых трансформаторов.

5. Система демонстрирует удовлетворительные результаты, в том числе при малом количестве обучающих записей, что позволяет использовать ее в условиях ограниченной доступности исходных данных.

6. Отчеты и результаты вычислений разработанной системы могут использоваться для визуализации данных, принятия решений и дальнейшего анализа при риск-ориентированном обслуживании силовых трансформаторов. Преимуществом внедрения такой системы является отсутствие необходимости установки дополнительного дорогостоящего измерительного оборудования, а также наличие возможности использования для идентификации состояния трансформаторов с имеющимся значительным сроком эксплуатации.

## Список источников

1. Анализ повреждаемости трансформаторов мощностью 16 и 25 МВА класса напряжения 110 кВ [Электронный ресурс]. URL: <https://pue8.ru/elektricheskie-seti/623-analiz-povrezhdaemosti-transformatorov-moshchnostyu-16-i-25-mva-klassa-napryazheniya-110-kv.html> (дата обращения: 19.03.2024).
2. Ivanov G., Spasova A., Matveev V., Marina I. Applied Complex Diagnostics and Monitoring of Special Power Transformers // *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 2142. DOI: 10.3390/en16052142.
3. Gutten M., Kucera M., Korenciak D., Karman M. Diagnostics of Construction Parts of the Dry Transformers // *International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering*. 2022. P. 1-4. DOI: 10.1109/Diagnostika55131.2022.9905159.
4. Melnikova O., Nazarychev A., Suslov K. Enhancement of the Technique for Calculation and Assessment of the Condition of Major Insulation of Power Transformers // *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 4 (1572). DOI: 10.3390/en15041572.
5. Gairola A., Rawat S. Modern Diagnostic Tests for Condition Monitoring of Power Transformers of Koteshwar HEP // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016. Vol. 7, No. 12. P. 390-396. URL: <https://www.ijser.org/researchpaper/Modern-Diagnostic-Tests-for-Condition-Monitoring-of-Power-Transformers-of-Koteshwar-HEP.pdf>.
6. Hoek S. et al. Localizing Partial Discharge in Power Transformers by Combining Acoustic and Different Electrical Methods // *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. 2012. P. 237-241. DOI: 10.1109/CMD.2012.6416433.
7. Hoek S., Kraetge A., Kessler O., Broniecki U. Time-Based Partial Discharge Localization in Power Transformers by Combining Acoustic and Different Electrical Methods // *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. 2012. P. 289-292. DOI: 10.1109/CMD.2012.6416433.
8. Tatizawa H., Burani G. Analysis and Location of Partial Discharges in Power Transformers by Means of Electrical Methods // *16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*. 2001. Vol. 1. P. 4. DOI: 10.1049/cp:20010719.
9. Faiz J., Soleimani M. Dissolved Gas Analysis Evaluation in Electric Power Transformers Using Conventional Methods a Review // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. April, 2017. Vol. 24, No. 2. P. 1239-1248. DOI: 10.1109/TDEI.2017.005959.
10. Secic A., Krpan M., Kuzle I. Vibro-Acoustic Methods in the Condition Assessment of Power Transformers: A Survey // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 83915-83931. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2923809.
11. Rathod V., Kumbhar G., Bhalja B. Partial Discharge Detection and Localization in Power Transformers Based on Acoustic Emission: Theory, Methods, and Recent Trends // *IETE Technical Review*. 2022. Vol. 39, No. 3. P. 540-552. DOI: 10.1080/02564602.2021.1871672.
12. Kunicki M., Wotzka D. A Classification Method for Select Defects in Power Transformers Based on the Acoustic Signals // *Sensors*. 2019. Vol. 19, No. 23. P. 5212. DOI: 10.3390/s19235212.
13. Fazliddinov S., Kuchkarov B., Sharibaev N., Abdulkhaev A., Tulkinov M. Analysis of Modern Methods of Determination of Mechanical Status and Diagnostic Models of Power Transformers // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2388. P. 1-5. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012173.
14. Barros R. et al. The Contribution of Inrush Current to Mechanical Failure of Power Transformers Windings // *High Volt*. 2019. Vol. 4, No. 4. P. 300-307. DOI: 10.1049/hve.2018.5019.
15. Khair M., Ghani S., Bakar N., Chairul I., Talib M. Sulfur Corrosion Mechanism in Power Transformers and Its Detection Techniques: A Review // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2022. Vol. 29, No. 6. P. 2283-2293. DOI: 10.1109/TDEI.2022.3216847.
16. Ashkezari A., Ma H., Saha T., Ekanayake C. Application of Fuzzy Support Vector Machine for Determining the Health Index of the Insulation System of In-Service Power Transformers // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. Vol. 20, No. 3. P. 965-973. DOI: 10.1109/TDEI.2013.6518966.
17. Singh A., Ahamad J. Machine Learning Based Transformer Health Monitoring Using IoT Edge Computing // *5th International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS)*. 2020. P. 1-5. DOI: 10.1109/ICCCS49678.2020.9276889.
18. Ahmed A. Smart Transformer Health Monitoring System // *IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*. 2023. P. 837-840.
19. Rokani V., Kaminaris S., Karaisas P., Kaminaris D. Power Transformer Fault Diagnosis Using Neural Network Optimization Techniques // *Mathematics*. 2023. Vol. 11, No. 22. P. 4693. DOI: 10.3390/math11224693.
20. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с. ISBN 978-5-94836-331-8.
21. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection // *2016 IEEE Conference on*

Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 27-30 June 2016. 2016. P. 779-788. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.02640>.

22. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 27-30 June 2016. 2016. P. 770-778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90.

23. Polonskaia I.S., Aliev I.R., Nikitin N.O. Automated Evolutionary Design of CNN Classifiers for Object Recognition on Satellite Images // Procedia Computer Science, 2021. Vol. 193. P. 210-219. DOI: 10.1016/j.procs.2021.10.021.

24. Muller A.C., Guido S. Introduction to Machine Learning with Python: A Guide for Data Scientists. Sebastopol: O'Reilly, 2016. 340 p. [https://inprogrammer.com/wp-content/uploads/2023/02/Andreas-C.-Muller-Sarah-Guido-Introduction-to-Machine-Learning-with-Python\\_-A-Guide-for-Data-Scientists.pdf](https://inprogrammer.com/wp-content/uploads/2023/02/Andreas-C.-Muller-Sarah-Guido-Introduction-to-Machine-Learning-with-Python_-A-Guide-for-Data-Scientists.pdf).

## References

1. *Analiz povrezhdaemosti transformatorov moshchnost'yu 16 i 25 MVA klassa napryazheniya 110 kV* [Analysis of damageability of transformers with a power of 16 and 25 MVA, voltage class 110 kV] [Electronic Resource]. URL: <https://pue8.ru/elektricheskie-seti/623-analiz-povrezhdaemosti-transformatorov-moshchnostyu-16-i-25-mva-klassa-napryazheniya-110-kv.html> (accessed 19.03.2024). [in Russian].

2. Ivanov G., Spasova A., Matveev V., Marinaova I. Applied Complex Diagnostics and Monitoring of Special Power Transformers. *Energies*, 2023, Vol. 16, No. 2142. DOI: 10.3390/en16052142.

3. Gutten M., Kucera M., Korenciak D., Karman M. Diagnostics of Construction Parts of the Dry Transformers. *International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering*, 2022, pp. 1-4. DOI: 10.1109/Diagnostika55131.2022.9905159.

4. Melnikova O., Nazarychev A., Suslov K. Enhancement of the Technique for Calculation and Assessment of the Condition of Major Insulation of Power Transformers. *Energies*, 2022, Vol. 15, No. 4 (1572). DOI: 10.3390/en15041572.

5. Gairola A., Rawat S. Modern Diagnostic Tests for Condition Monitoring of Power Transformers of Koteshwar HEP. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2016, Vol. 7, No. 12, pp. 390-396. URL: <https://www.ijser.org/research-paper/Modern-Diagnostic-Tests-for-Condition-Monitoring-of-Power-Transformers-of-Koteshwar-HEP.pdf>.

6. Hoek S. et al. Localizing Partial Discharge in Power Transformers by Combining Acoustic and Different Electrical Methods. *IEEE International*

*Symposium on Electrical Insulation*, 2012, pp. 237-241. DOI: 10.1109/CMD.2012.6416433.

7. Hoek S., Kraetge A., Kessler O., Broniecki U. Time-Based Partial Discharge Localization in Power Transformers by Combining Acoustic and Different Electrical Methods. *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 2012, pp. 289-292. DOI: 10.1109/CMD.2012.6416433.

8. Tatzawa H., Burani G. Analysis and Location of Partial Discharges in Power Transformers by Means of Electrical Methods. *16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, 2001, Vol. 1, pp. 4. DOI: 10.1049/cp:20010719.

9. Faiz J., Soleimani M. Dissolved Gas Analysis Evaluation in Electric Power Transformers Using Conventional Methods a Review. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, April, 2017, Vol. 24, No. 2, pp. 1239-1248. DOI: 10.1109/TDEI.2017.005959.

10. Secic A., Krpan M., Kuzle I. Vibro-Acoustic Methods in the Condition Assessment of Power Transformers: A Survey. *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 83915-83931. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2923809.

11. Rathod V., Kumbhar G., Bhalja B. Partial Discharge Detection and Localization in Power Transformers Based on Acoustic Emission: Theory, Methods, and Recent Trends. *IETE Technical Review*, 2022, Vol. 39, No. 3, pp. 540-552. DOI: 10.1080/02564602.2021.1871672.

12. Kunicki M., Wotzka D. A Classification Method for Select Defects in Power Transformers Based on the Acoustic Signals. *Sensors*, 2019, Vol. 19, No. 23, pp. 5212. DOI: 10.3390/s19235212.

13. Fazliddinov S., Kuchkarov B., Sharibaev N., Abdulkhaev A., Tulkinov M. Analysis of Modern Methods of Determination of Mechanical Status and Diagnostic Models of Power Transformers. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, Vol. 2388, pp. 1-5. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012173.

14. Barros R. et al. The Contribution of Inrush Current to Mechanical Failure of Power Transformers Windings. *High Volt*, 2019, Vol. 4, No. 4, pp. 300-307. DOI: 10.1049/hve.2018.5019.

15. Khair M., Ghani S., Bakar N., Chairul I., Talib M. Sulfur Corrosion Mechanism in Power Transformers and Its Detection Techniques: A Review. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2022, Vol. 29, No. 6, pp. 2283-2293. DOI: 10.1109/TDEI.2022.3216847.

16. Ashkezari A., Ma H., Saha T., Ekanayake C. Application of Fuzzy Support Vector Machine for Determining the Health Index of the Insulation

System of In-Service Power Transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, Vol. 20, No. 3, pp. 965-973. DOI: 10.1109/TDEI.2013.6518966.

17. Singh A., Ahamad J. Machine Learning Based Transformer Health Monitoring Using IoT Edge Computing. *5th International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS)*, 2020, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICCCS49678.2020.9276889.

18. Ahmed A. Smart Transformer Health Monitoring System. *IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, 2023, pp. 837-840.

19. Rokani V., Kaminaris S., Karaisas P., Kaminaris D. Power Transformer Fault Diagnosis Using Neural Network Optimization Techniques. *Mathematics*, 2023, Vol. 11, No. 22, pp. 4693. DOI: 10.3390/math11224693.

20. Gonsales R., Vuds. R. Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii [Digital Image Processing]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2012. 1104 p. ISBN 978-5-94836-331-8. [in Russian].

21. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 27-30 June 2016*, 2016, pp. 779-788. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.02640>.

22. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 27-30 June 2016*, 2016, pp. 770-778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90.

23. Polonskaia I.S., Aliev I.R., Nikitin N.O. Automated Evolutionary Design of CNN Classifiers for Object Recognition on Satellite Images. *Procedia Computer Science*, 2021, Vol. 193, pp. 210-219. DOI: 10.1016/j.procs.2021.10.021.

24. Muller A.C., Guido S. *Introduction to Machine Learning with Python: A Guide for Data Scientists*. Sebastopol, O'Reilly Publ., 2016. 340 p. [https://inprogrammer.com/wp-content/uploads/2023/02/Andreas-C.-Muller-Sarah-Guido-Introduction-to-Machine-Learning-with-Python\\_-A-Guide-for-Data-Scientists.pdf](https://inprogrammer.com/wp-content/uploads/2023/02/Andreas-C.-Muller-Sarah-Guido-Introduction-to-Machine-Learning-with-Python_-A-Guide-for-Data-Scientists.pdf).

*Статья поступила в редакцию 03.05.2024; одобрена после рецензирования 14.05.2024; принята к публикации 30.05.2024.*

*The article was submitted 03.05.2024; approved after reviewing 14.05.2024; accepted for publication 30.05.2024.*

Научная статья

УДК 621.3

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-2-37-49

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ****Михаил Юрьевич Воротников****Mikhail Yu. Vorotnikov***магистрант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
Магнитогорск, Россия***Александр Сергеевич Лимарев****Alexander S. Lymarev***кандидат технических наук, доцент кафедры технологий, сертификации и сервиса  
автомобилей,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
Магнитогорск, Россия***Александр Аркадьевич Николаев****Alexander A. Nikolaev***кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
Магнитогорск, Россия***Актуальность**

Ключевым элементом развития электромобилей служит сокращение выбросов парникового газа от автомобильного транспорта, так как электромобиль характеризуется своим непрямолинейным воздействием на окружающую среду — основной выброс аккумулируется на электростанциях. Эффективное развитие электромобилей создаёт новые возможности за счёт увеличения потребления электроэнергии, что в свою очередь стимулирует рост производства и интеграции альтернативных источников энергии в российскую энергетическую инфраструктуру, диверсифицируя энергетический сектор. Также сфера электромобильности нова для рынка Российской Федерации. Большинство российских автопроизводителей заинтересованы в этой сфере, разрабатывают собственные платформы и модели электромобилей, одним из примеров служат КАМА АТОМ и электромобили марки EVOLUTE. Вследствие вышесказанного возникает потребность в исследованиях данной тематики. Один из актуальных методов изучения объектов, в том числе электромобиля, является моделирование. При должной настройке модели оно позволяет точно оценивать поведение объекта, а также определять его технические параметры в определённый промежуток времени, что даёт возможность изучать, анализировать и усовершенствовать исследуемый объект.

**Ключевые слова**

электромобиль,  
электродвигатель, модель,  
модель электромобиля,  
MATLAB Simulink,  
модель MATLAB  
Simulink, система  
управления, трансмиссия  
электромобиля,  
широотно-импульсная  
модуляция, динамика,  
энергетика

### Цель исследования

Целью работы является создание актуальной и гибкой модели электромобиля в среде MATLAB Simulink, позволяющей оценить динамические и энергетические показатели электромобилей с различными техническими и эксплуатационными характеристиками.

### Методы исследования

Методом исследования является моделирование, включающее построение математической модели электромобиля с применением программной среды MatLab Simulink. Данная модель включает в себя набор функциональных блоков из сред физической сети Simscape и графической Simulink, описывающих физические принципы движения транспортного средства, а также электромеханические характеристики используемых компонентов, таких как двигатель, батарея и система управления.

### Результаты

В работе выявлены основные системы электромобиля, на основании чего в среде MATLAB Simulink были подобраны и настроены соответствующие функциональные блоки и разработана гибкая модель электромобиля, способная изменяться в зависимости от характеристик электромобиля, а также поддающаяся модифицированию и дополнению периферийными системами. Кроме того, в работе была испытана представленная модель. В неё были внесены технические и эксплуатационные характеристики реального электромобиля и сформирована задача на движение. В ходе выполнения поставленной задачи были сняты основные показатели, такие как скоростная характеристика, отношение потребления тока от времени, диаграмма разряда батареи и напряжений.

**Для цитирования:** Воротников М. Ю., Лимарев А. С., Николаев А. А. Разработка математической модели электромобиля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 2. Т. 20. С. 37-49. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-37-49>.

Original article

## DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF AN ELECTRIC VEHICLE

### Relevance

Main element of the development of electric vehicles is the reduction of greenhouse gas emissions from road transport, since electric vehicles are characterized by their indirect environmental impact — the main emission accumulates at power plants. The effective development of electric vehicles creates new opportunities by increasing electricity consumption, which in turn stimulates the growth of production and integration of alternative energy sources into the Russian energy infrastructure, diversifying the energy sector. Also, the field of electric mobility is new for the Russian Federation market. Most Russian automakers are interested in this area, developing their own platforms and models of electric vehicles, one of the obvious examples are the KAMA ATOM and electric cars of the EVOLUTE brand. As a result of the above, there is a need for research on this topic. One of the most relevant methods of studying objects, including electric vehicles, is modeling. With proper configuration of the model, it allows you to accurately assess the behavior of an object, as well as determine its technical parameters in a certain period of time, which makes it possible to study, analyze and improve the object under study.

### Keywords

electric vehicle, electric motor, model, electric vehicle model, MATLAB Simulink, MATLAB Simulink model, control system, electric vehicle transmission, pulse width modulation, dynamics, power engineering

### Aim of research

Aim of the work is to create an up-to-date and flexible model of an electric vehicle in the MATLAB Simulink environment, allowing to evaluate the dynamic and energy performance of electric vehicles with various technical and operational characteristics.

### Research methods

Research method is modeling, which includes the construction of a mathematical model of an electric vehicle using the MatLab Simulink software environment. This model includes a set of functional blocks from the Simscape physical network and Simulink graphical environments that describe the physical principles of vehicle movement, as well as the electromechanical characteristics of the components used, such as the engine, battery and control system.

### Results

The main systems of the electric vehicle were identified in the work, on the basis of which, in the MATLAB Simulink environment, the appropriate functional blocks were selected and configured and a flexible model of the electric vehicle was developed, capable of changing depending on the characteristics of the electric vehicle, as well as amenable to modification and addition of peripheral systems. In addition, the presented model was tested in the work. The technical and operational characteristics of a real electric car were introduced into it and the task for movement was formed. During the execution of the task, the main indicators were removed, such as the speed characteristic, the ratio of current consumption to time, the diagram of battery discharge and voltage.

**For citation:** Vorotnikov M. Yu., Lymarev A. S., Nikolaev A. A. Razrabotka matematicheskoy modeli elektromobilya [Development of a Mathematical Model of an Electric Vehicle]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 2, Vol. 20, pp. 37-49 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-37-49>.

В современном мире электромобили становятся ключевым элементом транспортной системы, играя важную роль в снижении выбросов парниковых газов и минимизации зависимости от традиционных источников энергии [1, 2]. С целью более эффективного проектирования и оптимизации характеристик электромобилей создание точных и реалистичных моделей является необходимостью. В данной статье представлена модель электромобилия в среде MATLAB Simulink, которая не только отражает фундаментальные аспекты его работы, но также позволяет определить различные характеристики, важные для современной электромобильной индустрии.

Актуальность данной модели основывается на растущей потребности в опти-

мизации эффективности и производительности электромобилей. С учетом стремительного развития технологий и постоянного улучшения дизайна электромобилей создание точных математических моделей становится неотъемлемой частью исследований в области автомобильной инженерии. Предложенная модель обеспечивает возможность более глубокого понимания динамики и энергетической эффективности электромобилей, что имеет большое значение для разработки транспортных средств, отвечающих современным требованиям [3].

Электромобиль представляет собой сложную систему, сочетающую в себе множество подсистем, взаимодействующих между собой и зависящих друг от



друга, поэтому для создания модели электромобиля необходимо выделить его главные элементы и разделить на подсистемы [4]. Главные системы электромобиля представлены на рисунке 1.

Как видим из диаграммы, представленной на рисунке 1, необходимо представить модель электромобиля и учесть все его главные системы.

Кузов автомобиля является одной из главных подсистем, потому что он принимает внешние динамические нагрузки. За его моделирование будет отвечать блок Vehicle Body (Кузов автомобиля): этот блок представляет собой физическую модель транспортного средства.

Может включать параметры, такие как масса, габариты и коэффициенты аэродинамического сопротивления, также он позволяет моделировать движение в различных условиях — под наклоном или при дополнительном лобовом сопротивлении. Данный блок будет взаимодействовать с двумя подсистемами электромобиля — двигателем и колёса. Колёса, в свою очередь, будут сцеплены последовательно с трансмиссией электромобиля и его двигателем.

Колёса электромобиля будет моделировать блок Tire (Magic Formula). Блок использует Magic Formula для моделирования характеристик шины, включая



**Рисунок 1.** Главные системы электромобиля

**Figure 1.** Main electric vehicle systems

коэффициент сцепления с дорогой, силу трения, радиус качения и другие параметры, которые влияют на движение транспортного средства. Так как модель проектируется переднеприводной, ведущие колёса будут последовательно соединены с трансмиссией.

Трансмиссия электромобиля в подавляющем большинстве не требует многоступенчатой коробки передач (КП), так как в отличие от двигателя внутреннего сгорания (ДВС) электродвигатель способен поддерживать широкий диапазон оборотов, поэтому для моделирования трансмиссии электромобиля применяем два блока: Differential (Дифференциал) — моделирует работу дифференциала в трансмиссии и Simple Gear — представляет собой базовую передачу, которая будет задавать передаточное число дифференциала [5].

Модель кузова электромобиля, его колёс и трансмиссии представлена на рисунке 2.

Для моделирования двигателя электромобиля был взят двигатель постоянного тока, блок DC Motor, по большей части, это обусловлено более лёгкой системой его управления, которая завязана на широкой импульсной модуляции (ШИМ). Также двигатель постоянного тока способен обеспечивать актуальные выходные показатели при прямолинейном движении электромобиля [6].

К двигателю электромобиля подключены два блока: блок контрольной точки вращения (Mechanical Rotational Reference), блок датчика тока (Current Sensor) и заземление. Current Sensor выступает в роли связующего звена для двигателя, он соединяет систему управления двигателя с его аккумуляторной батареей.

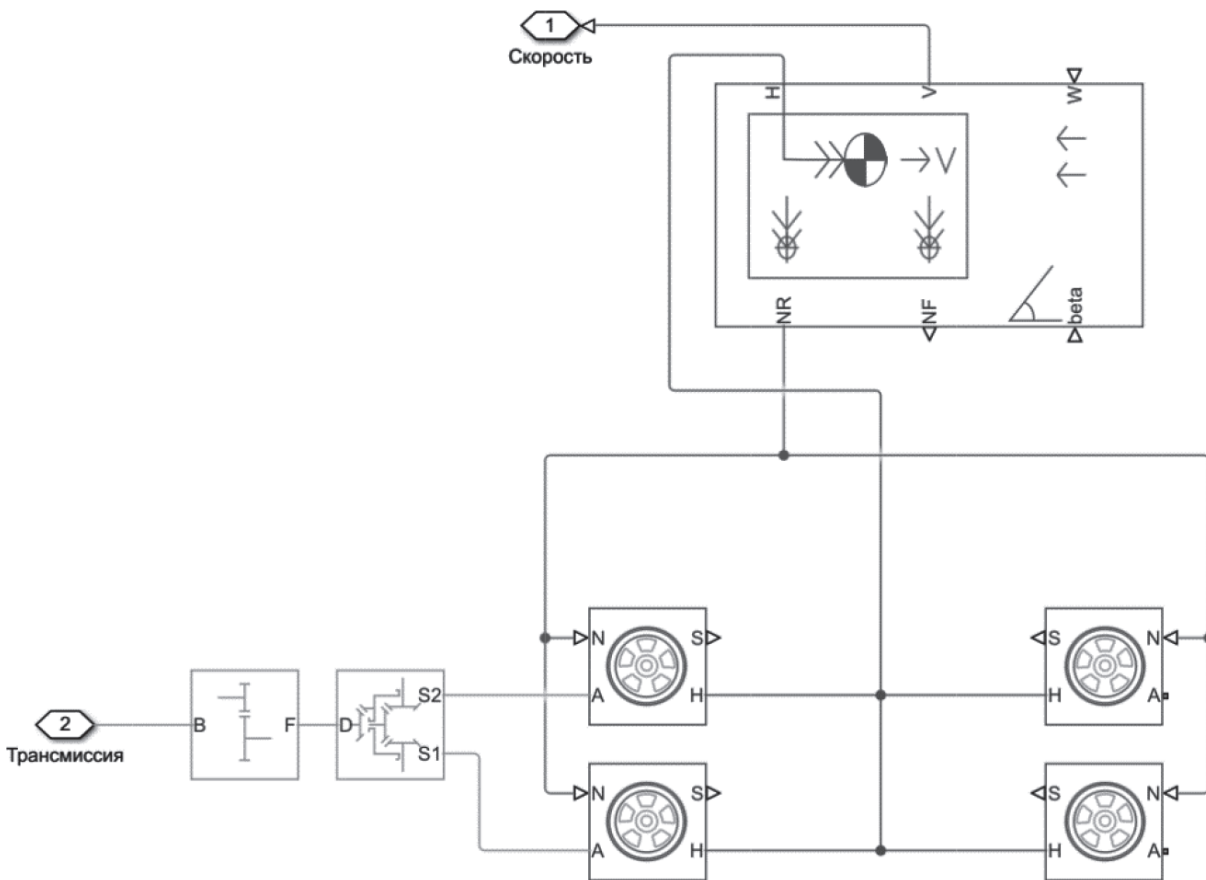


Рисунок 2. Модель кузова, колёс и трансмиссии электромобиля

Figure 2. Model of the body, wheels and transmission of an electric vehicle

Электронное управление двигателем осуществляют блок управления широтно-импульсной модуляцией, регулирующий напряжение (Controlled PWM Voltage), и блок управления направления тока в электрической цепи (H-Bridge) [7].

Исполнителем генерируемой задачи является водитель транспортного средства — блок Longitudinal Driver моделирует водителя, управляющего продольным движением автомобиля. Водитель в соответствии с поставленной задачей генерирует выходные сигналы для управления: движение или торможение, логика поведения водителя основывается на переменных величинах, позволяющих наиболее актуально моделировать его действия. В качестве настройки используется настройка PI пропорционально-интегрального управления с прослеживанием коэффициентов усиления [8]. Данный блок относится к физической сети Simscape, поэтому для преобразования данного физического сигнала используются преобразователи — Simulink-PS Converter. Также для конвертации сигналов от водителя в эквивалентное напряжение используется блок преобразователь — Controlled Voltage Source.

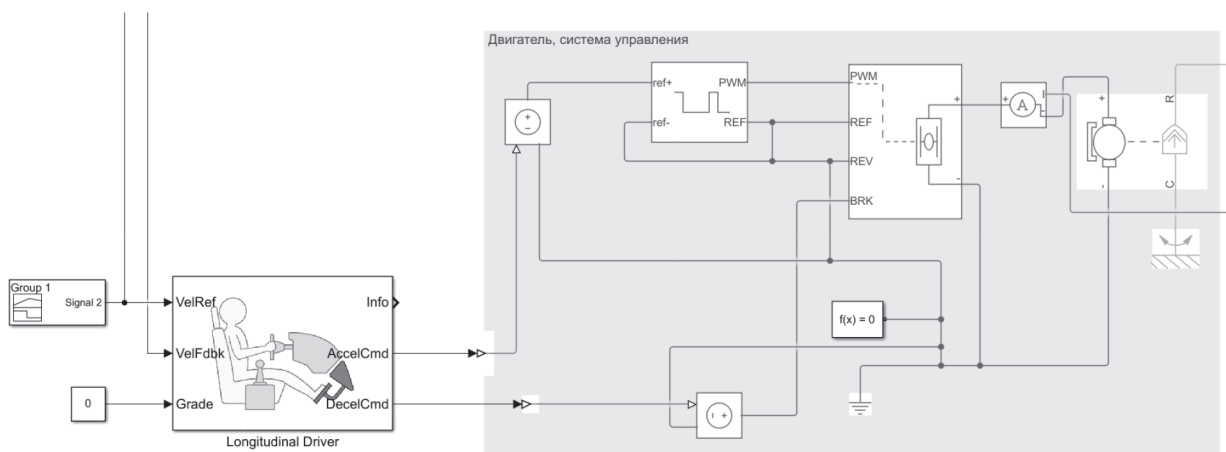
Задачей для водителя транспортного средства может служить таблица с пара-

метрами скорости и времени, например в формате Excel, или определённый сигнал, способный отображать скоростную характеристику. В предложенной модели в качестве задачи для водителя используется генератор сигналов — Signal Builder.

Модель и соединение блоков двигателя, системы управления двигателем, водителя и задатчика представлена на рисунке 3.

В современных электромобилях в качестве тяговой аккумуляторной батареи используются литий-ионные аккумуляторные батареи, главным преимуществом которых являются высокие ёмкостные показатели, поэтому в модели использован блок Battery (Lithium-ion), который представляет собой литий-ионный аккумулятор, учитывающий все его показатели, например такие как ёмкости и напряжения. За управление выходным из батареи током будет отвечать блок Controlled Current Source [9]. В сфере автомобилестроения применяются различные технологии производства литий-ионных аккумуляторов, поэтому стоит их рассмотреть [10]:

— большинство производителей компонентов электромобилей разрабатывают батареи с положительными электродами на основе материалов никель-



**Рисунок 3.** Модель двигателя, системы управления двигателем, водителя и задатчика

**Figure 3.** Model of the engine, engine control system, driver and setpoint

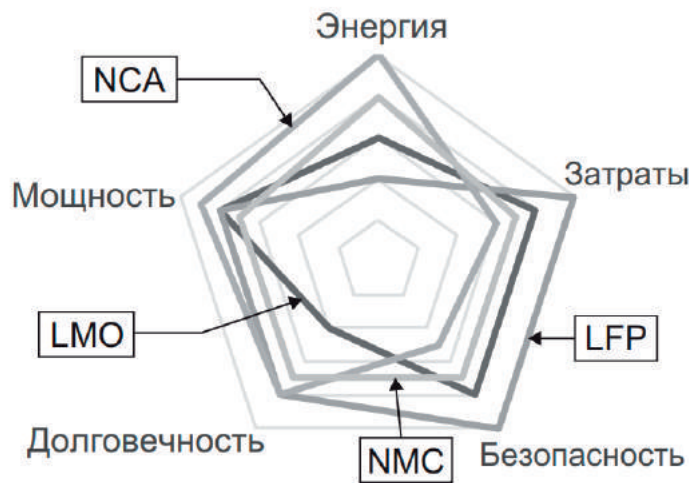
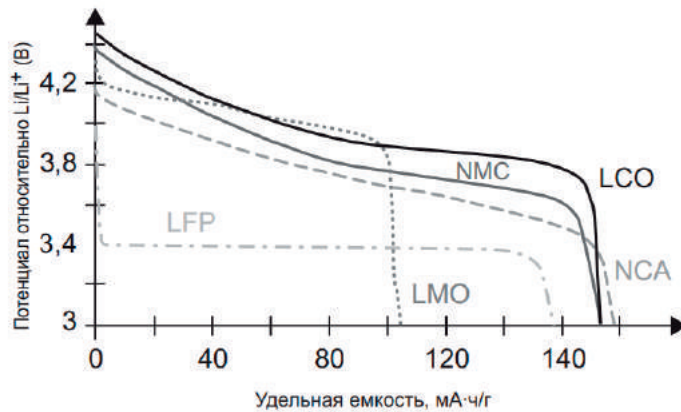
марганец-кобальт (NMC), наиболее ярким примером является компания Nissan. Различные варианты NMC-материалов, обозначаемые как NMC<sub>x</sub>yz, где x, y, z — содержание никеля, марганца и кобальта, широко используются. Исходно был применен материал NMC111, впоследствии уровень кобальта был снижен до NMC622, а затем до NMC811, который используется в модели электромобиля;

— компания Tesla в сотрудничестве с Panasonic разрабатывает батареи с положительными электродами из никеля, кобальта и алюминия (NCA). Согласно информации, представленной Tesla, с 2012 г. по 2018 г. количество кобальта на один автомобиль увеличилось с 1,1 до 4,5 кг. Такую технологию предпочитает

компания SAFT, производящая аккумуляторные батареи для электромобилей;

— китайские производители предпочитают проверенную технологию с положительными электродами из фосфата лития и железа (LFP). Основное преимущество этой технологии заключается в отсутствии кобальта, что делает ее потенциально более доступной даже при более низкой удельной энергии аккумулятора по сравнению с NMC и NCA из-за более низкого номинального напряжения. Многие китайские электробусы, и в том числе Tesla Model 3, продаваемый в Китае, оснащены батареями на основе материалов LFP.

Для наглядности на рисунке 4 представлено сравнение технологий производства литий-ионных аккумуляторов.



**Рисунок 4.** Сравнение технологий производства литий-ионных аккумуляторов

**Figure 4.** Comparison of lithium-ion battery manufacturing technologies

Также от аккумуляторной батареи для удобства выведены на осциллографы основные показатели, такие как текущий потребляемый ток, процент заряда аккумуляторной батареи (SOC) и напряжение.

Модель аккумуляторной батареи электромобиля представлена на рисунке 5, общий вид модели электромобиля представлен на рисунке 6.

В качестве исследуемого объекта был выбран электромобиль Nissan Leaf, что обусловлено следующими причинами [11].

1. *Популярность и распространенность.* Nissan Leaf является одним из наиболее популярных и широко распространенных электромобилей на рынке Российской Федерации, составляет порядка 60 % от общего числа электромобилей [12]. Это делает его интересным объектом исследования, так как результаты могут быть легко сопоставлены с реальными данными.

2. *Технические характеристики.* Nissan Leaf обладает разнообразными техническими характеристиками, такими как мощность электродвигателя и

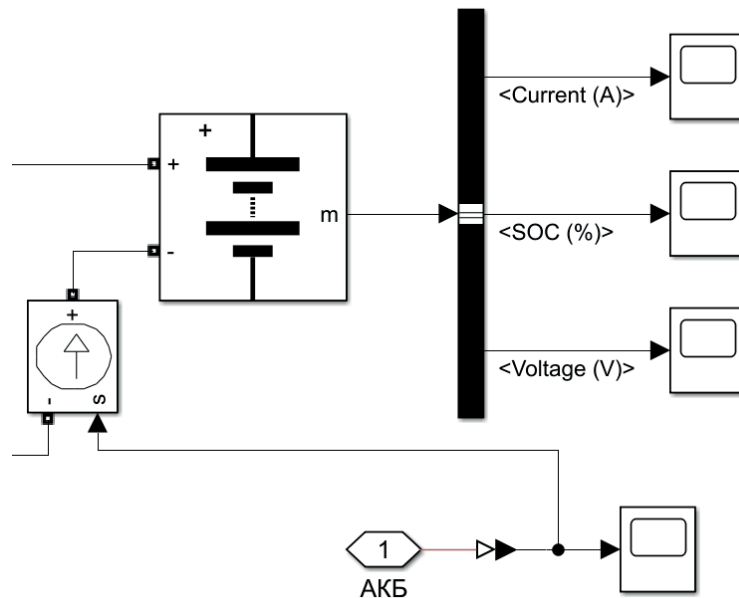


Рисунок 5. Модель аккумуляторной батареи электромобиля

Figure 5. Battery model of the electric vehicle

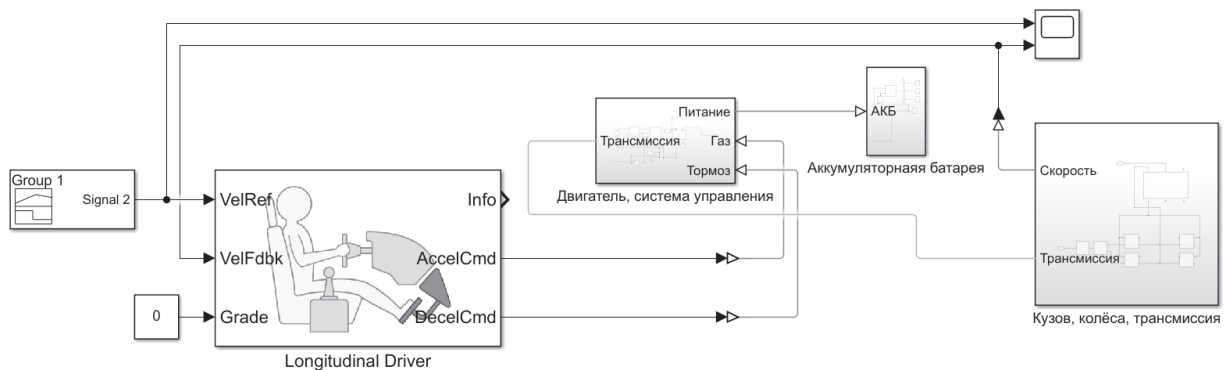


Рисунок 6. Модель электромобиля

Figure 6. Electric vehicle model

емкость батареи, что делает его подходящим объектом для изучения электропривода и энергетической эффективности.

3. *Электрическая архитектура.* Nissan Leaf представляет собой типичный электромобиль с современной электрической архитектурой, что позволяет более обобщенно изучать принципы работы электромобильных систем.

Технические характеристики для моделирования движения электромобиля Nissan Leaf представлены в таблице 1 [13].

Исходя из технических характеристик, была спроектирована модель электромобиля Nissan Leaf. Для начала движения водителю необходимо сформировать задание на движение в системе координат время — скорость. Задача на движение, сформированная в Signal builder, представлена на рисунке 7.

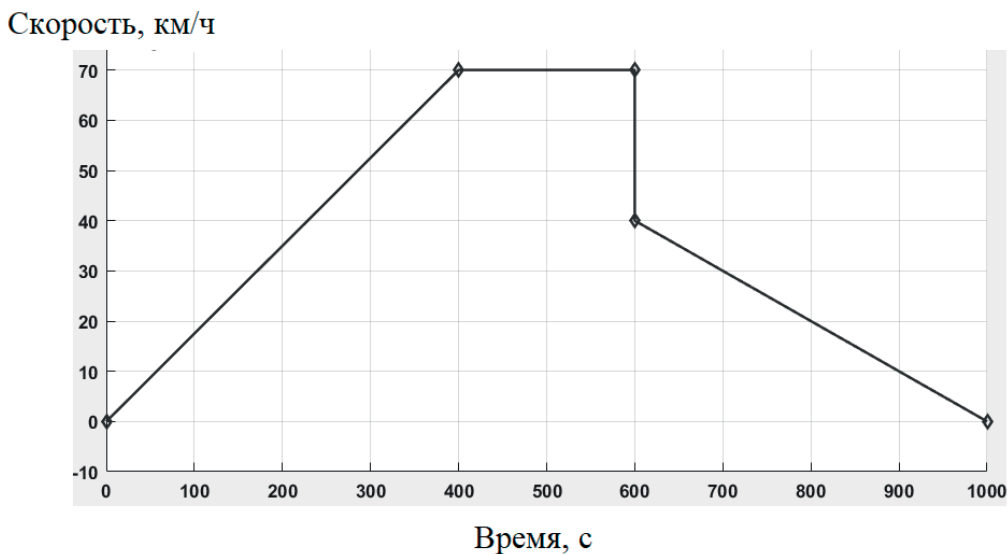
Исходя из сформированной задачи, водитель приводит модель электромобиля в действие. На рисунке 8 можно заметить то, как модель выполняет поставленную задачу, описывая график задачи, тем самым формируется скоростная характеристика электромобиля.

Также в процессе моделирования мы можем проследить за процессами, происходящими в аккумуляторной батарее электромобиля. На рисунке 9 представлена диаграмма текущего потребления значения тока.

**Таблица 1.** Исходные данные для электромобиля Nissan Leaf

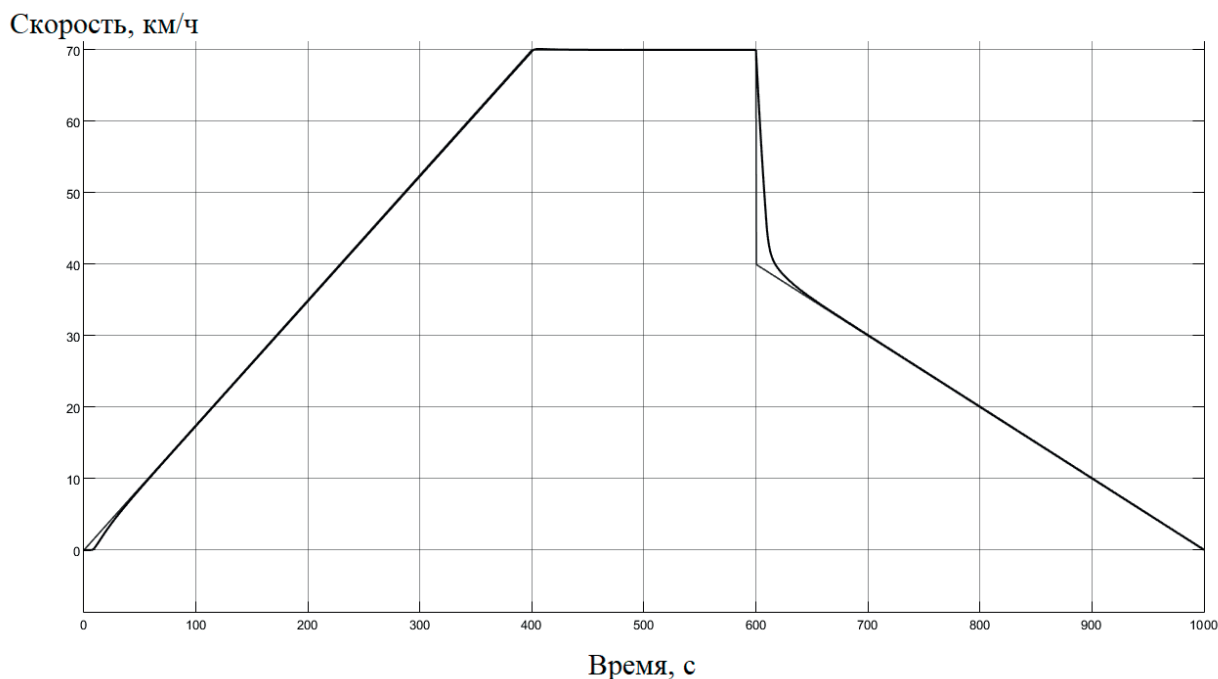
**Table 1.** Initial data for the Nissan Leaf

Название показателя	Значение
Масса	1520 кг
Радиус качения колеса	0,32 м
Передаточное число редуктора	8,2
Мощность двигателя	80 кВт
Номинальные обороты двигателя	14 000 об./мин
Номинальное напряжение	360 В
Тип аккумулятора	Литий-Ион
Ёмкость аккумулятора	1000 Ач



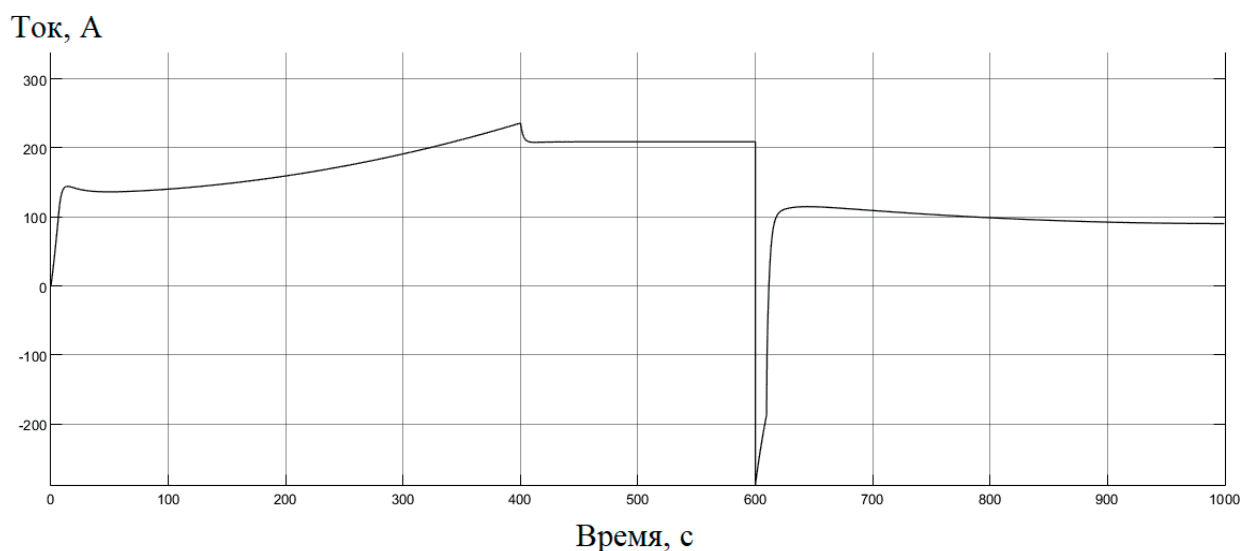
**Рисунок 7.** Задача на движение для водителя

**Figure 7.** Driving task for the driver



**Рисунок 8.** Скоростная характеристика модели

**Figure 8.** Speed characteristics of the model



**Рисунок 9.** Диаграмма текущего потребления тока

**Figure 9.** Current consumption diagram

Диаграмма уровня заряда аккумуляторной батареи представлена на рисунке 10.

Диаграмма напряжения на аккумуляторной батарее представлена на рисунке 11.

Исходя из предоставленных диаграмм, можно заметить скоростную характеристику электромобиля, отображающую реальное поведение водителя

при управлении автомобилем, также процессы, проходящие внутри аккумуляторной батареи. Диаграмма уровня заряда (рисунок 9) показывает плавное снижение заряда аккумулятора, где при торможении заметен рекуперативный режим, производящий зарядку, что подтверждают диаграммы текущего потребления тока и напряжения на аккумуляторной батарее электромобиля.

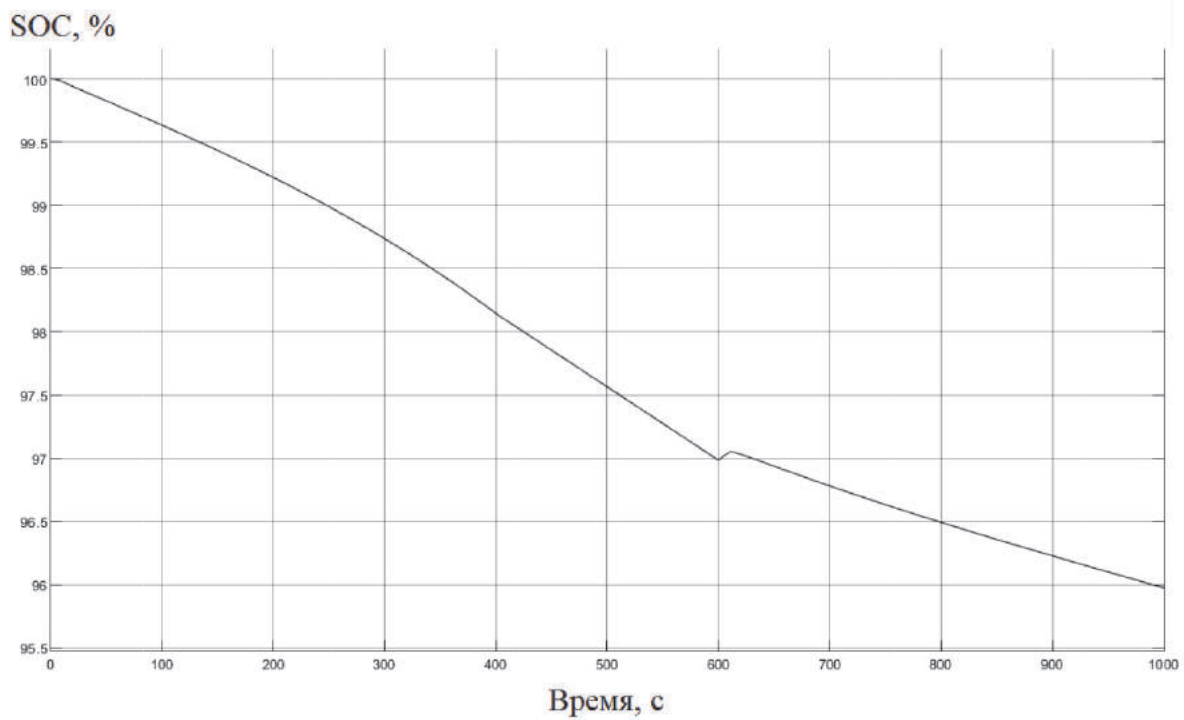


Рисунок 10. Диаграмма разряда аккумуляторной батареи

Figure 10. Battery discharge diagram

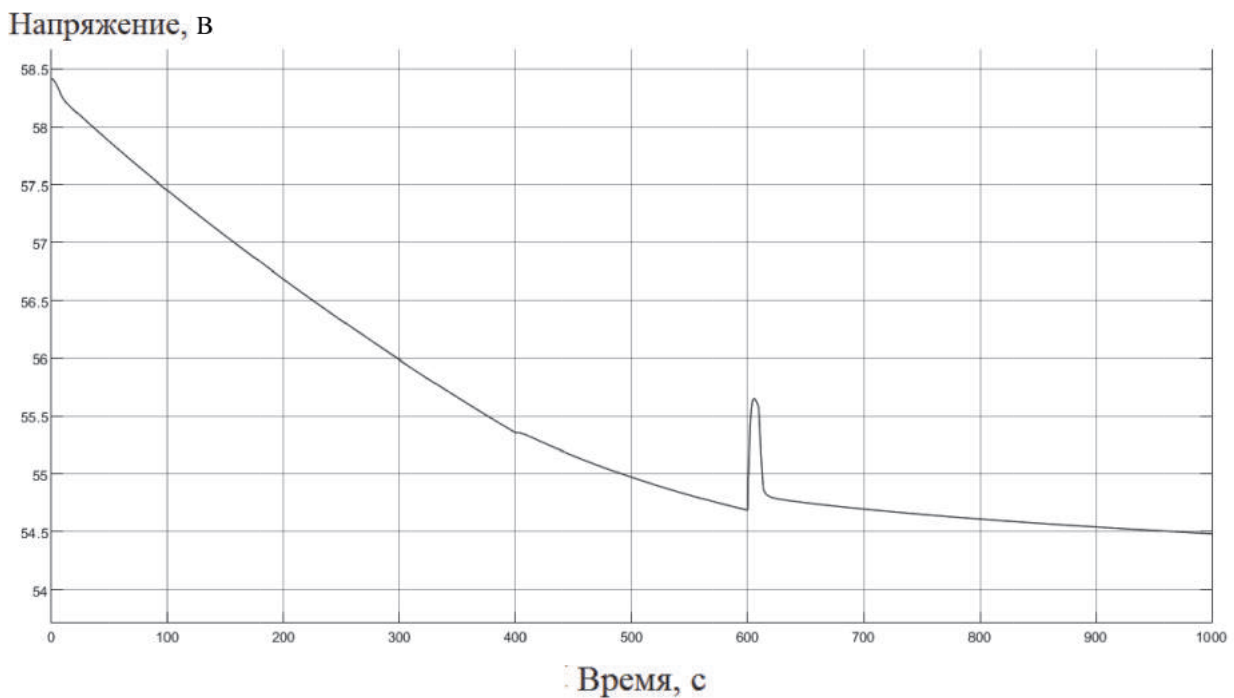


Рисунок 11. Диаграмма напряжения на аккумуляторной батарее

Figure 11. Battery voltage diagram

### Выводы

Разработанная модель электромобиля в MATLAB Simulink представляет собой гибкий инструмент для исследования и оптимизации его систем. Она способна

соответствовать реальному электромобилю, так как содержит в себе все его системы, что говорит об актуальности проведения исследовательских работ с данной моделью, например, расчёт эко-



логических показателей или выброса от электромобиля, создав городские условия движения. Также данная модель является гибкой, она легко поддается модифицированию и дополнению периферийными системами. Одними из актуальных методов модифицирования

модели являются замена двигателя постоянного тока на двигатель переменного тока и разработка системы управления и защиты, что поможет увеличить КПД силовой установки, а также улучшить эксплуатационные характеристики электромобиля.

#### Список источников

1. Лимарев А.С., Мезин И.Ю., Воротников М.Ю., Сомова Ю.В., Москвина Е.А. Электромобиль как перспектива снижения воздействия на окружающую среду // *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. 2022. № 8. С. 55–59. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-08-8. EDN: VOAYHK.
2. Лимарев А.С., Воротников М.Ю. Сравнительная оценка перспективности применения электромобилей на водородном топливном элементе // *Мир транспорта*. 2023. Т. 21, № 4 (107). С. 99–105. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-4-11. EDN: THZGHW.
3. Achim Kampker. *Elektromobilproduktion*. Springer–Verlag Berlin Heidelberg. 2014. 289 p. DOI: 10.1007/978-3-642-42022-1.
4. Сафиуллин Р.Н., Шаряков В.А., Резниченко В.В. Системы тягового электропривода транспортных средств / под ред. Р.Н. Сафиуллина. Москва–Берлин: Директ–Медиа, 2020. 434 с. ISBN: 978-5-4499-1610-5.
5. Лимарев А.С., Мезин И.Ю., Воротников М.Ю., Зотов С.В. Улучшение динамической характеристики электромобиля за счет применения многоступенчатой коробки передач // *Наука и техника транспорта*. 2022. № 4. С. 61–67. EDN: DEDEJM.
6. Yang W., Zhu Y., Wang C., Li P., Liu Y. Research on Simulation Model Control Strategy of Brushless DC Motor Based on MATLAB // *Proceedings of the World Conference on Intelligent and 3-D Technologies (WCIDT 2022). Smart Innovation, Systems and Technologies*. Springer, Singapore, 2023. Vol. 323. DOI: 10.1007/978-981-19-7184-6.
7. Zhang Xj., Chen Bs. Influence of PWM Modes on Commutation Torque Ripples in Sensorless Brushless DC Motor Control System // *J. of Shanghai Univ.* 2001. No. 5. P. 217–223. DOI: 10.1007/s11741-996-0028-3.
8. Indu K., Aswatha Kumar M. A Fundamental Study on Electric Vehicle Model for Longitudinal Control // *Communication and Control for Robotic Systems. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022. Springer, Singapore, 2022. Vol. 229. P. 367–375. DOI: 10.1007/978-981-16-1777-5.
9. Dhinakaran V., Surendran R., Varsha Shree M., Gupta P. Study on Electric Vehicle (EV) and Its Developments Based on Batteries, Drive System and Charging Methodologies in Modern World // *Electric Vehicles. Green Energy and Technology*, 2021. Springer, Singapore, 2021. P. 103–118. DOI: 10.1007/978-981-15-9251-5.
10. Juton A., Rain X., Sauvant-Moynot V., Orsini F., Saber Ch., Bacha S., Bethoux O., Labouré E. *Technologies des voitures électriques: Motorisations, batteries, hydrogène, interactions reseau*. DUNOD, 2021. 424 p.
11. Винаков А.Ф., Савелова Э.В., Скринник А.И. Технические характеристики современных электромобилей // *Электротехнические и компьютерные системы*. 2016. № 22 (98). С. 371–377. EDN: YMIUKZ.
12. Число зарегистрированных электромобилей в России превысило 20 тысяч // *Аналитическое агентство АВТОСТАТ [Электронный ресурс]*. 2023. URL: <https://www.autostat.ru/news/54027/> (дата обращения: 11.12.2023).
13. 2013 Nissan Leaf Advanced Vehicle Testing — Baseline Testing Results // *Vehicle Technologies Programs*. 2015 URL: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/01/fl19/fact2013nissanleaf.pdf> (дата обращения 14.12.2023).

#### References

1. Limarev A.S., Mezin I.Yu., Vorotnikov M.Yu., Somova Yu.V., Moskvina E.A. *Elektromobil' kak perspektiva snizheniya vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredu* [Electric Vehicle as a Prospect for Reducing Environmental Impact]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik — Transport: Science, Equipment, Management. Scientific Information Collection*, 2022, No. 8, pp. 55–59. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-08-8. EDN: VOAYHK. [in Russian].
2. Limarev A.S., Vorotnikov M.Yu. *Sravnitel'naya otsenka perspektivnosti primeneniya elektromobiley na vodorodnom toplivnom elemente*

[Comparative Assessment of the Prospects for Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles]. *Mir transporta — World of Transport and Transportation*, 2023, Vol. 21, No. 4 (107), pp. 99–105. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-4-11. EDN: THZGHW. [in Russian].

3. Achim Kampker. *Elektromobilproduktion*. Springer–Verlag Berlin Heidelberg. 2014. 289 p. DOI: 10.1007/978-3-642-42022-1.

4. Safiullin R.N., Sharyakov V.A., Reznichenko V.V. Sistemy tyagovogo elektroprivoda transportnykh sredstv [Traction Electric Drive Systems for Vehicles]. Moscow-Berlin, Direkt-Media Publ., 2020. 434 p. ISBN: 978-5-4499-1610-5. [in Russian].

5. Limarev A.S., Mezin I.Yu., Vorotnikov M.Yu., Zotov S.V. Uluchshenie dinamicheskoi kharakteristiki elektromobilya za schet primeneniya mnogostupenchatoi korobki peredach [Improving Dynamic Performance of Electric Vehicle by Using Multiple-Speed Gearbox]. *Nauka i tekhnika transporta — Science and Technology of Transport*, 2022, No. 4, pp. 61–67. EDN: DEDEJM. [in Russian].

6. Yang W., Zhu Y., Wang C., Li P., Liu Y. Research on Simulation Model Control Strategy of Brushless DC Motor Based on MATLAB. *Proceedings of the World Conference on Intelligent and 3-D Technologies (WCIDT 2022)*. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, Springer, Singapore, 2023. Vol. 323. DOI: 10.1007/978-981-19-7184-6.

7. Zhang Xj., Chen Bs. Influence of PWM Modes on Commutation Torque Ripples in Sensorless Brushless DC Motor Control System. *J. of Shanghai Univ.*, 2001, No. 5, pp. 217–223. DOI: 10.1007/s11741-996-0028-3.

8. Indu K., Aswatha Kumar M. A Fundamental Study on Electric Vehicle Model for Longitudinal Control. *Communication and Control for Robotic Systems. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022. Springer, Singapore, 2022. Vol. 229. P. 367–375. DOI: 10.1007/978-981-16-1777-5.

9. Dhinakaran V., Surendran R., Varsha Shree M., Gupta P. Study on Electric Vehicle (EV) and Its Developments Based on Batteries, Drive System and Charging Methodologies in Modern World. *Electric Vehicles. Green Energy and Technology*, 2021. Springer, Singapore, 2021, pp. 103–118. DOI: 10.1007/978-981-15-9251-5.

10. Juton A., Rain X., Sauvant-Moynot V., Orsini F., Saber Ch., Bacha S., Bethoux O., Labouré E. *Technologies des voitures électriques: Motorisations, batteries, hydrogène, interactions reseau*. DUNOD, 2021. 424 p.

11. Vinakov A.F., Savelova E.V., Skrinnik A.I. Tekhnicheskie kharakteristiki sovremennykh elektromobiley [Technical Characteristics of Modern Electric Cars]. *Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy — Electrical and Computer Systems*, 2016, No. 22 (98), pp. 371–377. EDN: YMIUKZ. [in Russian].

12. Chislo zaregistrirrovannykh elektromobiley v Rossii prevysilo 20 tysyach [The Number of Registered Electric Vehicles in Russia Has Exceeded 20 Thousand]. *Analiticheskoe agentstvo AVTOSTAT* [Analytical Agency AVTOSTAT] [Electronic Resource]. 2023. URL: <https://www.autostat.ru/news/54027/> (accessed 11.12.2023). [in Russian].

13. 2013 Nissan Leaf Advanced Vehicle Testing — Baseline Testing Results // *Vehicle Technologies Programs*. 2015 URL: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/01/f19/fact2013nissanleaf.pdf> (data accessed 14.12.2023).

Статья поступила в редакцию 22.04.2024; одобрена после рецензирования 29.05.2024; принята к публикации 03.06.2024.

The article was submitted 22.04.2024; approved after reviewing 29.05.2024; accepted for publication 03.06.2024.

Научная статья

УДК 621.311.243

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-2-50-63

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

*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 рамках стратегии декарбонизации и перехода к низкоуглеродной экономике проектирование солнечной электростанции для производства водорода, представленное в данной статье, является актуальным и перспективным направлением. Этот проект может стать пилотным и обозначить новые возможности для создания водородных кластеров и дальнейшего развития водородной энергетики в России.

### Цель исследования

Объектом исследования является солнечная электростанция, предназначенная для производства водорода в рамках стратегии декарбонизации в России. Определяются ее проектная мощность, эффективность, возможности и ограничения различных компонентов.

### Методы исследования

В процессе исследования были использованы различные методы анализа и моделирования, включая систему консультаций SAM и другие программные инструменты.

### Результаты

В статье описана концепция солнечной электростанции, способной эффективно использовать доступную солнечную энергию для производства водорода, и определить потенциал применения в контексте стратегии декарбонизации в России. В результате исследования была разработана модель фотоэлектрической станции, предназначенной для производства водорода. Были проанализированы и выбраны оптимальные компоненты системы и разработана стратегия управления энергией.

Практическая значимость работы заключается в создании основы для проектирования и внедрения эффективных и устойчивых солнечных электростанций для производства водорода, что может способствовать достижению целей декарбонизации в России и повышению энергетической безопасности страны.

### Ключевые слова

солнечная электростанция, инсоляция, низкоуглеродный водород, производство водорода, декарбонизация

**Благодарности:** Исследования выполнены на средства гранта Стипендии Президента Российской Федерации в 2022–2024 годах для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики. Грантополучатель Хазиева Регина Тагировна.

Приоритетное направление модернизации российской экономики (направление конкурса № СП-2022 Совета по грантам Президента Российской Федерации) «Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива». Тема исследований «Разработка и исследование фильтрокомпенсирующего устройства для повышения качества электроэнергии».

**Для цитирования:** Хазиева Р. Т. Проектирование солнечной электростанции // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 2. Т. 20. С. 50-63. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-50-63>.

Original article

## SOLAR PHOTOVOLTAIC POWER PLANT DESIGN

### Relevance

As part of the decarbonization strategy and transition to a low-carbon economy, the design of a solar power plant for hydrogen production, presented in this article, is a relevant and promising direction. This project can become a pilot project and identify new opportunities for creating hydrogen clusters and further development of hydrogen energy in Russia.

### Aim of research

The object of the study is a solar power plant designed to produce hydrogen as part of the decarbonization strategy in Russia. Its design capacity, efficiency, capabilities and limitations of various components are determined.

### Research methods

During the research, various analysis and modeling methods were used, including the SAM consultation system and other software tools.

### Results

The article describes the concept of a solar power plant capable of efficiently using available solar energy to produce hydrogen, and identifies the potential application in the context of Russia's decarbonization strategy. As a result of the research, a model of a photovoltaic station designed to produce hydrogen was developed. Optimal system components were analyzed and selected, and an energy management strategy was developed.

The practical significance of the work is to create a basis for the design and implementation of efficient and sustainable solar power plants for hydrogen production, which can help achieve decarbonization goals in Russia and improve the country's energy security.

### Keywords

solar photovoltaic power plant, insolation, low-carbon hydrogen, hydrogen production, decarbonization

**Acknowledgments:** The research was carried out using a grant from the President of the Russian Federation in 2022–2024 for young scientists and graduate students carrying out promising scientific research and development in priority areas of modernization of the Russian economy. Grant recipient is Regina Tagirovna Khazieva.

The priority direction of modernization of the Russian economy (direction of competition No. SP-2022 of the Grant Council of the President of the Russian Federation) is «Energy Efficiency and Energy Saving, Including Issues of Developing New Types of Fuel». Research topic: «Development and Research of a Filter Compensating Device to Improve the Quality of Electricity».

**For citation:** Khazieva R. T. *Proyektirovaniye solnechnoy elektrostantsii [Solar Photovoltaic Power Plant Design]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 2, Vol. 20, pp. 50-63 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-50-63>.*

## Введение

Одной из перспективных областей развития является использование возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергия. Солнечные электростанции могут стать надежным и эффективным решением этой задачи. Для обеспечения максимальной производительности таких электростанций важно уделить внимание многим аспектам, включая выбор оптимального местоположения, определение их конфигурации и подбор соответствующего оборудования.

Оптимально сконфигурированная солнечная электростанция может внести значительный вклад в производство низкоуглеродного водорода, который, в свою очередь, является перспективным вариантом хранения энергии и может стать ключевым компонентом в стратегии декарбонизации [1].

Расширение возможностей солнечной энергии и перспективы низкоуглеродного водорода открывают новые горизонты для развития энергетики, сохранения экологии и укрепления энергетической независимости.

## Методы расчета и анализ производительности солнечной электростанции

Проектируемая фотоэлектрическая станция предназначена для питания электролизера по производству водорода.

Электролизер — это устройство, которое используется для проведения процесса, при котором электрический ток приводит к химическим изменениям в электролите, приводя к разложению вещества на его составные части. Электролизеры применяются в основном для производства водорода, кислорода и других химических продуктов.

Например, с помощью электролизера можно разлагать молекулы воды на водород и кислород с целью дальнейшего использования водорода в различных областях, таких как энергетика, транспорт, промышленность.

Электролизеры являются сильным инструментом в различных областях, включая производство чистой энергии и химиче-

скую промышленность. Они играют серьезную роль в создании устойчивых технологий и процессов.

Структурная схема данного электролизера приведена на рисунке 1. Технические характеристики электролизера приведены в таблице 1.

Данное решение основано на технологии PEM и предназначено для промышленного производства.

Электролиз с протонообменной мембраной (PEM) — это электролиз воды в ячейке, оснащенной твердым полимерным электролитом (SPE) [3], который отвечает за проводимость протонов, отделение газовых продуктов и электрическую изоляцию электродов. Электролизер PEM был представлен для решения проблем частичной нагрузки, низкой плотности тока и работы при низком давлении, которые в настоящее время присущи щелочному электролизеру [4]. В нем используется протонообменная мембрана.

Электролизёры с протон-обменной мембраной (PEM) являются следующим поколением устройств после щелочных. В них электролитом служит не раствор щелочи, а увлажненная полимерная мембрана, способная проводить протоны, за счет движения которых и осуществляется протекание электрического тока. Данный тип установок эффективно используется для создания автономных энергосистем в удаленных или труднодоступных населенных пунктах.

Основные преимущества PEM-электролизёров:

- PEM-электролизёр не имеет агрессивных жидкостей, требующих утилизации;
- PEM-электролизёр имеет высокую плотность тока до  $10000 \text{ A/m}^2$ , низкое электропотребление  $4,5 \text{ кВтч/н} \cdot \text{м}^3$ , меньшие габариты и низкие затраты на техническое обслуживание;
- PEM-электролизёр совместим с источниками питания, имеющими широкий диапазон колебаний мощности, и поддерживает автоматическое регулирование нагрузки в пределах от 0 % до 100 %;
- максимальное рабочее давление без компримирования достигает 5,0 МПа;
- водородные и кислородные камеры надежно разделены между собой газонепро-

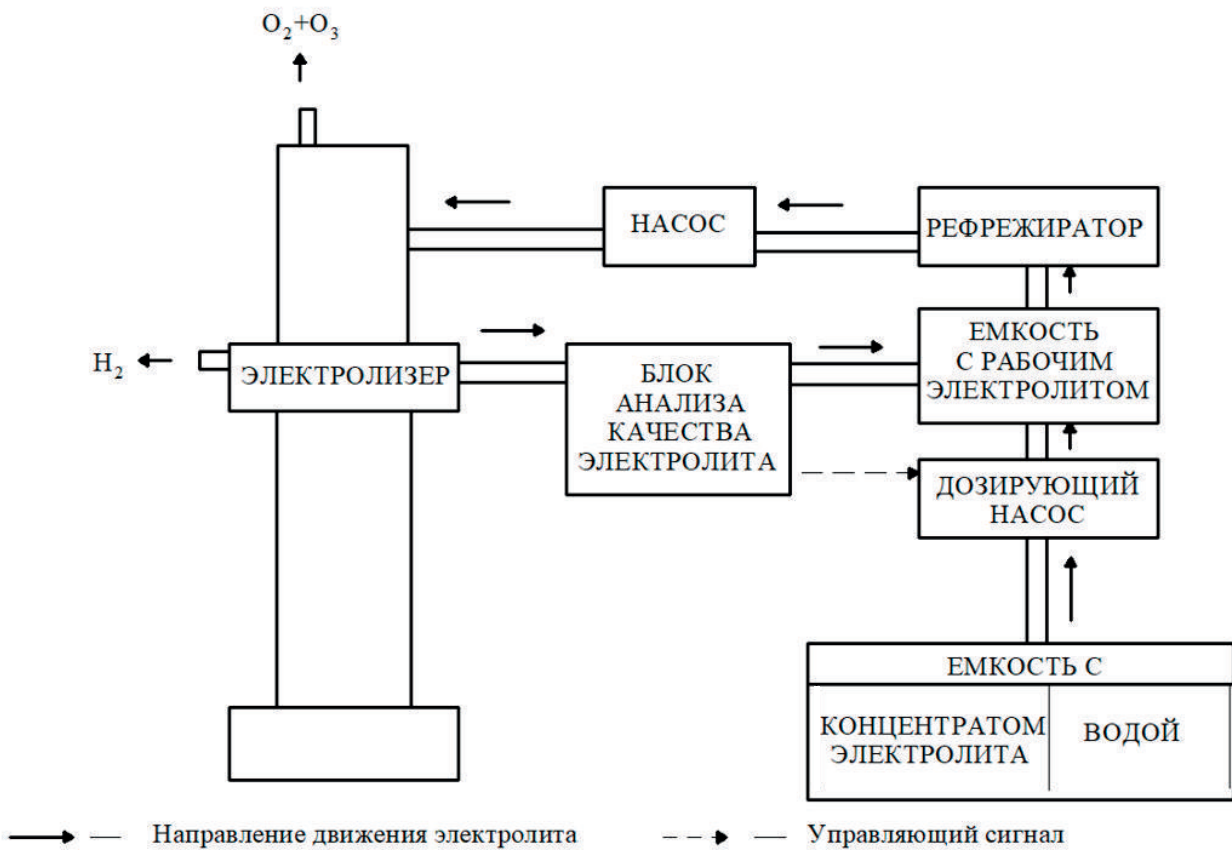


Рисунок 1. Электролизер H-TEC SYSTEMS MHP [2]

Figure 1. Electrolyzer H-TEC SYSTEMS MHP [2]

Таблица 1. Технические характеристики электролизера

Table 1. Technical characteristics of the electrolyser

Характеристики	Значение
Номинальное производство водорода	4600 кг/сут   2130 Нм <sup>3</sup> /ч
Энергопотребление для производства водорода	4,6 кВт·ч/Нм <sup>3</sup>   51 кВт·ч/кг
Эффективность системы	77 %
Класс производительности	10 МВт
Диапазон модуляции продукции водорода	(213 – 2130) Нм <sup>3</sup> /ч   (10 – 100) %
Размеры Д × Ш × В	10 × 21,5 × 4,5 м
Температура	(5 – 40) °С

ничаемыми полимерными мембранами, которые не пропускают молекулы, а только протоны водорода;

— размещение в контейнере (опционально).

Блоки электролизера могут быть объединены в системы мощностью более 100 МВт. Система модульная, смонтированная на салазках. Оснащена комплексной очисткой технологической воды. Опционально система может быть дополнена очисткой

пресной воды и водорода, а также рекуперацией технологического тепла или утилизацией кислорода, если это необходимо.

Согласно данным из различных источников, для эффективной работы электролизной установки мощность солнечной электростанции (СЭС) должна быть выше номинальной мощности электролизера в 2–4 раза. Примером такой практики может служить проект в префектуре Фукусима, Япония [5], где построено предприятие по

производству водорода путем электролиза воды, источником питания которого является солнечная установка мощностью 20 МВт. Исходя из вышеперечисленного, предполагаемая расчетная мощность солнечной электростанции для обеспечения электроэнергией установки H-TEC SYSTEMS MHP составит 20 МВт. Это позволяет компенсировать колебания в выработке электроэнергии из-за погодных условий и дневного солнечного цикла, а также избежать излишней мощности электролизера. Схема СЭС представлена на рисунке 2 [6–17].

### Определение оптимального наклона и расстояния между рядами панелей

Одним из важнейших параметров при проектировании солнечных электростанций является угол наклона солнечных панелей. От него зависит эффективная работа солнечной электростанции. Максимальная производительность достигается, если солнечное излучение направлено перпендикулярно плоскости солнечной панели. Однако в реальных условиях достичь такого положения затруднительно, поскольку собственное вращение Земли изменяет видимое расположение светила на небосводе на протяжении всего дня, поэтому для достижения оптимального угла наклона используют различные виды конструкций установки фотоэлектрических солнечных модулей — **фотоэлектрических преобразователей (ФЭП)**.

Существуют несколько видов расположения солнечных панелей:

- неподвижное, с постоянным углом наклона;
- частично подвижное, с возможностью изменения угла наклона для разных сезонных периодов;
- подвижное, в которых с помощью специальных устройств отслеживается положение Солнца таким образом, чтобы солнечный свет падал перпендикулярно рабочей поверхности.

Наиболее оптимальным вариантом для солнечной фотоэлектрической электростанции, находящейся в Крыму, является неподвижное расположение. Такой выбор обусловлен рядом определенных факторов [18].

Во-первых, в ходе исследований [19] автор экспериментально выяснил, что изменение угла наклона солнечных батарей в зимний период года экономически нецелесообразно и значительного эффекта не дает, в летний период — повышает ее эффективность. По наблюдениям Чарльза Ландау [20], неподвижные панели получают около 71,1 % солнечной энергии, но при регулировании дважды в год — 75,2 %. Стоит учесть, что даже при небольшом приросте эффективности требуются дополнительные усилия и затраты на обслуживание.

Во-вторых, стационарное расположение более экономически привлекательно, так как установка стоит дешевле и требует меньшего обслуживания из-за отсутствия подвижных деталей, следовательно, менее подвержена износу и повреждениям в отличие от подвижных [21].

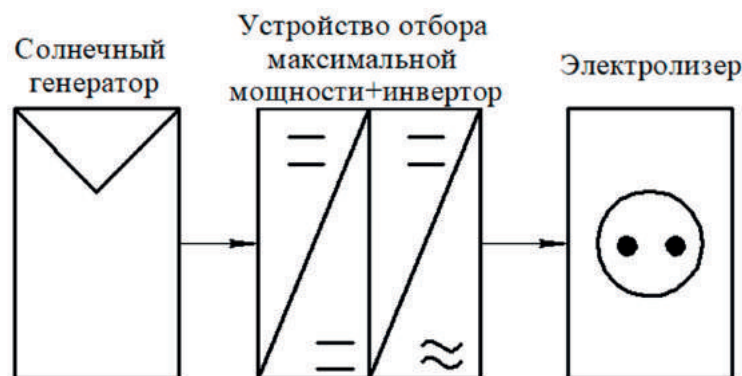


Рисунок 2. Схема солнечной электростанции для производства водорода

Figure 2. Scheme of a solar power plant for hydrogen production

Выбрав неподвижное расположение, следующим шагом станет выбор фиксированного угла наклона. Оптимальный угол наклона зависит от географической широты места установки. В соответствии с рекомендациями из различных источников и экспериментально подтвержденных данных [5] наиболее эффективный угол для круглогодичной генерации энергии стационарных панелей равен широте местоположения СЭС. Выбранное местоположение находится в районе координат 45.017 с.ш. и 35.318 в.д., соответственно, оптимальный угол, который будет необходим для дальнейших расчетов мощности. Такой угол не только оптимальный с точки зрения эффективности, но также обладает преимуществом во время эксплуатации. При угле наклона снег, который может затемнять солнечные модули, при восходе будет плавно стаять, что положительно скажется на его работе.

Еще один важный параметр — ориентация солнечных панелей. Для солнечных панелей, расположенных в северном полушарии, оптимальным направлением является юг, и север — в южном полушарии [22]. Для разъяснения южной ориентации обратимся к естественному движению солнца по небу. СЭС расположена на полуострове Крым, который находится в северном полушарии. Северная сторона находится всегда в тени, утром западная часть затенена, а восток освещен Солнцем, с наступлением

вечера запад освещен Солнцем, а восток — затенен. Южная часть получит наибольшее количество солнечной энергии на протяжении дня. Следовательно, если бы панели были ориентированы на восток или запад, они генерировали бы электрический ток в достаточном количестве только в утренние или вечерние часы. Таким образом, наиболее эффективной ориентацией для объектов, находящихся в северном полушарии, является юг.

Также необходимо, чтобы солнечные панели при расположении в несколько рядов не затеняли ряд позади него, так как это может привести к снижению производительности [23, 24].

В летний период времени длина тени меньше, чем в зимнее. Необходимо рассчитать минимальное расстояние между рядами так, чтобы панели не затенялись с 10:00 до 14:00 в день зимнего солнцестояния [25]. Такой метод позволяет минимизировать затенение между рядами, однако в зимнее время, в ранние утренние часы и поздние вечерние наблюдается некоторое затенение. Схематичное изображение размещения солнечных панелей представлено на рисунке 3.

Общее расстояние между батареями  $F$  (рисунок 3) определяется суммой горизонтальных проекций панелей  $C$  и расстоянием между рядами  $D$ . Предполагается круглогодичная работа СЭС, поэтому производительность зимой также важна, также метод

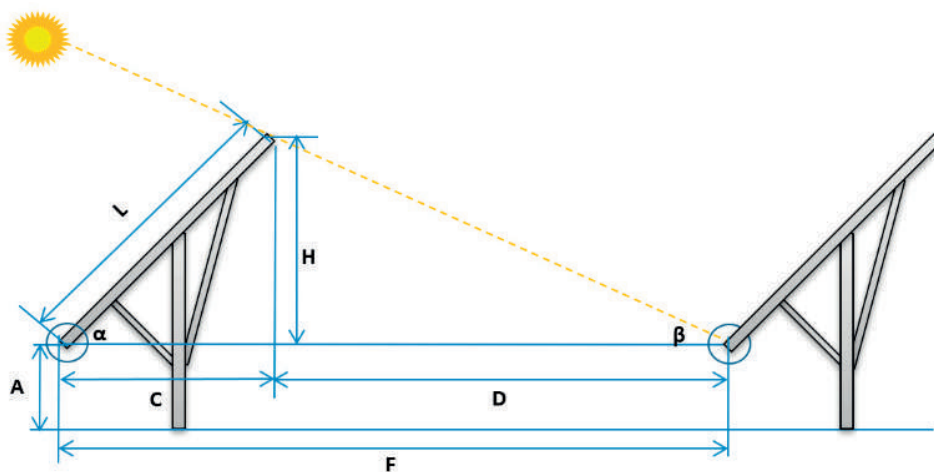


Рисунок 3. Схематичное изображение рядов солнечных панелей [26]

Figure 3. Schematic illustration of rows of solar panels [26]



предполагает только прямое солнечное излучение [27, 28].

В основном 90 % солнечного излучения беспрепятственно падает на поверхность солнечных батарей, когда высота Солнца превышает 50 % от максимальной высоты зимой [29].

Высота Солнца в полдень 21 декабря в северном полушарии определяется по формуле:

$$h = 90 - 23,45 - \varphi, \quad (1)$$

где  $\varphi$  — географическая широта места наблюдения.

Найти расстояние  $F$  можно, используя формулу:

$$F = L \cdot (\cos(\alpha) + \sin(\alpha) \times \tan(\varphi + 23,5^\circ + (0,5 \cdot h))) \quad (2)$$

где  $L$  — длина панели, м;

$\alpha$  — угол наклона панели.

Выбран солнечный модуль HVL-360/НТ, длина которого составляет 1852 мм. Определено расстояние между рядами для СЭС в выбранном местоположении и составляет 8,2 м.

Определены ключевые параметры при установке солнечных панелей для солнечной электростанции:

— фиксированный угол наклона в  $45^\circ$ : обеспечивает эффективное преобразование солнечного излучения (СИ) круглый год и облегчает эксплуатацию;

— южная ориентация: с учетом солнечного цикла и положения СЭС в северном

полушарии максимизирует выход солнечной энергии;

— расстояние между рядами 8,2 м: минимизирует затенение рядов, расположенных позади, тем самым увеличивает общую производительность СЭС.

На рисунке 4 представлена визуализированная модель ряда солнечных панелей 21 декабря в 12:00.

#### Метод приближенного определения максимального солнечного излучения

Метод приближенного определения максимального солнечного излучения — это способ оценки потенциального производства энергии, которую можно получить от солнечных панелей. Такой метод носит приблизительный характер, так как не учитывает множество факторов, которые могут повлиять на выходную мощность солнечной электростанции [30].

К таким факторам относятся:

- погодные условия;
- время года;
- местоположение и ориентация;
- температура;
- затенение;
- системные потери.

Частично влияние этих факторов можно минимизировать, если учесть дополнительные параметры. Например, учет угла наклона и ориентации панелей при использовании источников данных об уровне инсоляции.

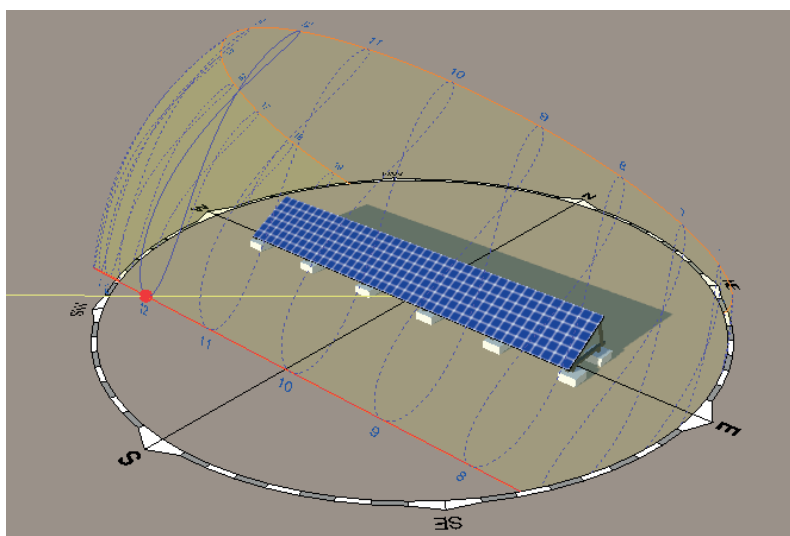


Рисунок 4. Визуализированная модель ряда солнечных панелей

Figure 4. Rendered model of a row of solar panels

Солнечная батарея будет вырабатывать номинальную мощность только в том случае, когда инсоляция составляет 1000 Вт/м<sup>2</sup>, температура окружающей среды 25 °С, и отсутствует затенение [31]. Однако такие условия редко встречаются при реальной эксплуатации.

Суть метода заключается в следующем. Предполагается, что солнечное излучение падает на поверхность только как 1 кВт/м<sup>2</sup>. Площадь исходной кривой солнечной инсоляции (рисунок 5) подгоняется к кривой пиковых солнечных часов [32]. Таким образом, панель будет постоянно получать инсо-

ляцию в размере 1 кВт/м<sup>2</sup> в течение ограниченного времени, так называемых пиковых солнечных часов.

Выходную электрическую мощность солнечной электростанции можно определить по формуле:

$$E = \frac{E_{\text{инс.}}}{P_{\text{инс.}}} \cdot P_{\text{см}}, \quad (3)$$

где  $E_{\text{инс.}}$  — среднемесячная инсоляция, кВт·ч/м<sup>2</sup>;

$P_{\text{см.}}$  — мощность солнечных модулей, кВт;

$P_{\text{инс.}}$  — мощность инсоляции на земной поверхности (1 кВт/м<sup>2</sup>).

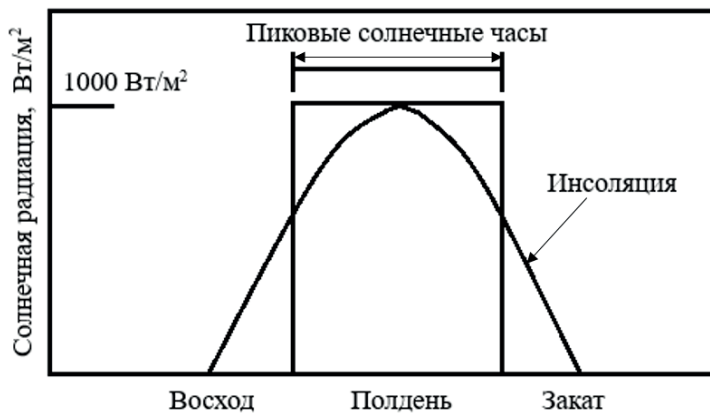


Рисунок 5. Кривая солнечной инсоляции [32]

Figure 5. Solar insolation curve [32]

Таблица 2. Среднемесячная инсоляции для выбранного местоположения

Table 2. Average monthly insolation for the selected location

Месяц	Среднемесячная инсоляция, кВт·ч/м <sup>2</sup>	Произведенная электроэнергия, согласно расчетным данным, МВт·ч	Произведенная электроэнергия с учетом ТМУ данных, МВт·ч
Январь	58,93	1178,6	1136,0
Февраль	78,23	1564,6	1334,0
Март	120,99	2419,8	2329,1
Апрель	158,40	3168,0	2012,0
Май	176,94	3538,8	2476,0
Июнь	181,14	3622,8	2775,0
Июль	191,36	3827,2	3011,0
Август	200,04	4000,8	3354,0
Сентябрь	165,61	3312,2	3083,0
Октябрь	122,75	2455,0	1563,0
Ноябрь	74,55	1491,0	1228,0
Декабрь	59,89	1491,0	1486,5
Всего за год	1588,83	32069,8	25785,7
		59444,3	

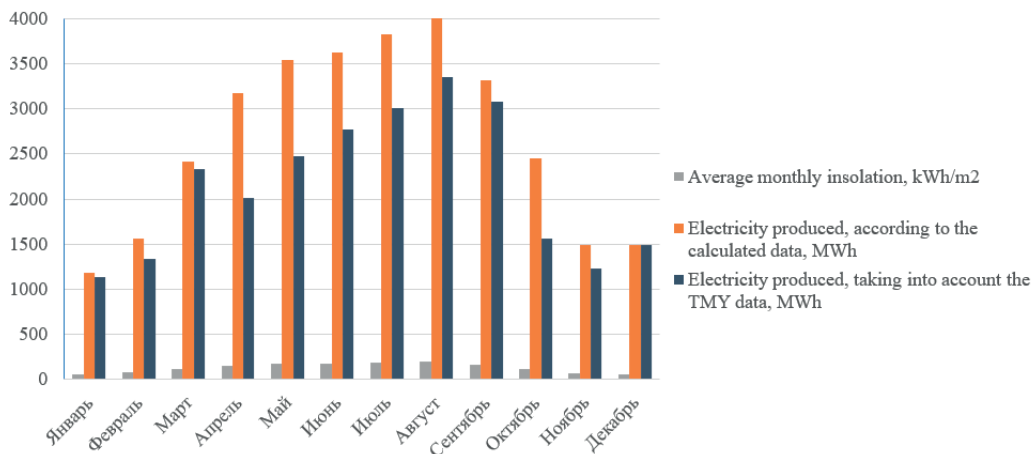


Рисунок 6. Среднемесячная инсоляция, произведенная электроэнергия

Figure 6. Average monthly insolation, electricity produced

В таблице 2 и на рисунке 6 представлены значения среднемесячной инсоляции с учетом угла наклона панелей и ориентации для выбранного местоположения, полученные в сервисе PVGIS.

Определим выработку электроэнергии на СЭС в январе по формуле (3) и получим, что

$$E = 1178,6 \text{ МВт}\cdot\text{ч.}$$

Метод приближенного определения максимального солнечного излучения представляет собой грубую оценку, что может быть полезно для первичной проверки потенциала солнечной электростанции и примерного планирования. Однако для нашего проекта необходимо знать почасовую выработку электроэнергии для оптимизации ее использования в те дни, когда вырабатываемая мощность превышает номинальную мощность электролизера.

#### Метод моделирования производительности СЭС на основе анализа ТМУ-данных с применением программного инструмента SAM

Метод моделирования на основе анализа типичного метеорологического года с использованием программных инструментов является продвинутым и более точным подходом к оценке производительности солнечных электростанций.

Типичный метеорологический год (далее ТМУ) — набор метеорологических данных, полученных за многолетний временной

период. Такой набор получается путем выбора наиболее типичного месяца из доступного периода времени, который для PVGIS-SARAH2 составляет 16 лет 2005–2020 гг.

Процесс формирования ТМУ представлен на рисунке 7.

ТМУ содержит почасовые данные следующих параметров [33]:

- дата и время;
- глобальная горизонтальная освещенность;
- прямое нормальное излучение;
- рассеянное горизонтальное излучение;
- давление воздуха;
- температура сухого термометра;
- скорость ветра;
- направление ветра;
- относительная влажность;
- длинноволновое нисходящее инфракрасное излучение.

System Advisor Model (SAM) — бесплатная технико-экономическая программная модель для упрощения проектирования и анализа возобновляемых источников энергии.

В рамках данного метода ТМУ выступает в качестве входных данных для SAM для более детального расчета производительности СЭС с учетом множества факторов, таких как температура, затенение, потери в системе.

В процессе моделирования были учтены следующие потери, предложенные программной моделью SAM:

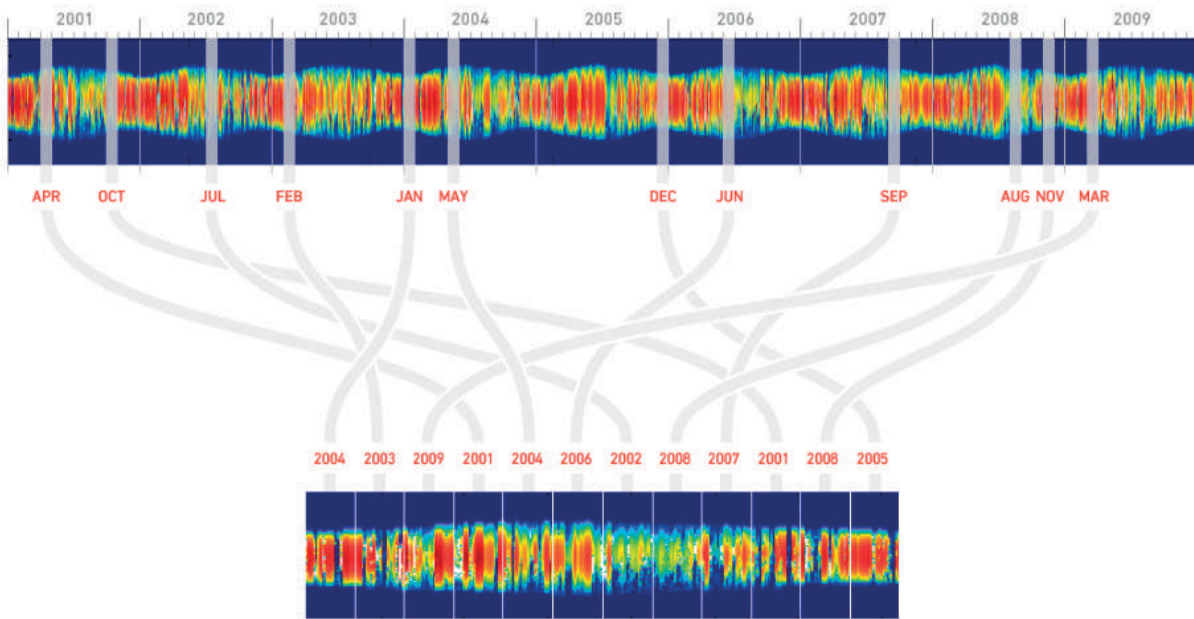


Рисунок 7. Процесс формирования ТМУ данных [34]

Figure 7. TMY data generation process [34]

- загрязнение поверхности солнечных панелей — 2 %;
- затенение — 3 %;
- снег — 0 %;
- несоответствие — 2 %;
- проводка — 2 %;
- соединения — 0,5 %;
- деградация панелей под действием солнца — 1,5 %;
- номинальная мощность — 1 %;
- устаревание панелей — 0 %;
- доступность — 3 %;
- общие потери — 14,08 %.

Рассчитано необходимое количество солнечных модулей для СЭС по формуле:

$$N_{\text{СМ}} = \frac{P_{\text{СЭС}}}{P_{\text{СМ}}}, \quad (5)$$

где  $P_{\text{СЭС}}$  — номинальная мощность СЭС, Вт;

$P_{\text{СМ}}$  — номинальная мощность СМ, Вт.

Выбран солнечный модуль HVL-360/HJT номинальной мощностью 360 Вт. Определено необходимое количество солнечных модулей, которое составляет 55 556 штук.

Площадь СЭС находится по формуле:

$$S_{\text{СЭС}} = N_{\text{СМ}} \cdot S_{\text{СМ}}, \quad (6)$$

где  $S_{\text{СЭС}}$  — площадь солнечной панели, м<sup>2</sup>.

Площадь СЭС без учета расстояния между рядами 102 556 м<sup>2</sup>, что составляет примерно

0,1 км<sup>2</sup>. Площадь территории, свободная для размещения СЭС, составляет 1,27 км<sup>2</sup>.

Таким образом, при дальнейшем развитии, есть возможность масштабировать солнечную электростанцию в более мощные модификации.

### Выводы

Проанализирована современная ситуация в области использования солнечной энергии, а также возможное развитие производства водорода в ближайшем будущем. Определена производительность солнечной фотоэлектрической электростанции при оптимальной конфигурации и выбранного оборудования.

В ходе проведенного исследования с помощью инструмента SAM было проведено моделирование производительности солнечной электростанции на основе анализа ТМУ данных. Результаты моделирования позволили получить наиболее точные представления о возможностях солнечной энергии в производстве водорода, а также данные для стратегии управления энергией.

Дальнейшие исследования в этом направлении могут способствовать развитию солнечной энергетики в России.

## Список источников

1. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqCvsexl.pdf> (дата обращения: 10.01.2024).
2. Модульная водородная платформа электролизера H-TEC PEM [Электронный ресурс]. URL: <https://www.h-tec.com/en/products/detail/mhp-series/mhp-product/> (дата обращения: 10.01.2024).
3. Яндекс. Карты и Транспорт [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/maps/?l=sat,skl&ll=35.318000,45.017000&z=17/> (дата обращения: 10.01.2024).
4. Климатические особенности Крыма [Электронный ресурс]. URL: <http://geo-storm.ru/priroda-i-klimat/pogoda/klimaticheskie-osobennosti-kryma/> (дата обращения: 10.01.2024).
5. Оптимальный угол установки солнечной батареи для максимальной выработки энергии в северных широтах [Электронный ресурс]. URL: <https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/optimalnyj-ugol-ustanovki-sb.html> (дата обращения: 10.01.2024).
6. Инверторы и контроллеры мощности в солнечной энергетике [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/34ab6p> (дата обращения: 10.01.2024).
7. Kstar [Электронный ресурс]. URL: <https://elt.uz/partners/kstar/> (дата обращения: 10.01.2024).
8. Приказ Минтруда России № 903н от 15 декабря 2020 г. «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок» [Электронный ресурс]. URL: <https://mintrud.gov.ru/docs/mintrud/orders/1816> (дата обращения: 10.01.2024).
9. Правила устройства электроустановок. 7 изд. М.: Министерство энергетики Российской Федерации, 2003. [Электронный ресурс]. URL: [https://minstroy.gov-murman.ru/files/4.14-\\_pue\\_tekst.pdf](https://minstroy.gov-murman.ru/files/4.14-_pue_tekst.pdf) (дата обращения: 10.01.2024).
10. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: утв. М-вом энергетики Российской Федерации 12.08.2022; введ. в действие с 07.10.2022. М.: ЭНАС, 2022. 78 с.
11. ГОСТ 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293733/4293733591.pdf> (дата обращения: 10.01.2024).
12. Инструкция по применению и испытанию средств защиты, используемых в электроустановках [Электронный ресурс]. М.: Изд-во НЦЭНАС, 2003.— 112 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294815/4294815350.pdf> (дата обращения: 10.01.2024).
13. Постановление Правительства РФ от 16.09.2020 № 1479 «Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации» [Электронный ресурс]. URL: <https://rosguard.gov.ru/uploads/2020/12/postano-vlenie-pravitelstva-rf-ot-16092020-n-1479-ob-utverzhdenii-pravil-protivopozharnogorezhima-v-rossijskoj-federacii.pdf> (дата обращения: 10.01.2024).
14. О пожарной безопасности: федеральный закон РФ (с изменениями от 29.12.2022 г. № 69-ФЗ) [Электронный ресурс]. URL: <https://legalacts.ru/doc/FZ-o-pozharnoj-bezopasnosti/> (дата обращения: 10.01.2024).
15. О пожарной безопасности: федеральный закон РФ (с изменениями от 14.07.2022 г. № 123-ФЗ) [Электронный ресурс]. URL: <https://legalacts.ru/doc/FZ-o-pozharnoj-bezopasnosti/> (дата обращения: 10.01.2024).
16. РД 34.21.122-87 «Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений» от 12.10.1987 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.indeks.ru/dokumenty/rd-34-21-122-87-instruktsiya-poustroystvu-molniezashchity/instruktsiya-po-ustroystvu-molniezashchity.pdf> (дата обращения: 10.01.2024).
17. СО 153-34.21.122-2003 «Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций» от 30.06.2003 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.indeks.ru/dokumenty/so-153-34-21-122-2003-instruktsiya-poustroystvu-molniezashchity/instruktsiya-po-ustroystvu-molniezashchity.pdf> (дата обращения: 10.01.2024).
18. Горбунова Т.Ю. Оценка ландшафтного потенциала Юго-Восточного Крыма для использования систем возобновляемой энергетики — солнечной и ветровой: дис. ... канд. геогр. наук. Симферополь, 2020. 223 с.
19. Воркунов О.В., Ихсанова А.И., Гайнутдинова А.М. Оптимальная ориентация солнечных фотоэлектрических модулей в г. Казани // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 11/12. С. 26-29. EDN: VRWVOT.
20. Лучший угол для солнечных панелей и как его правильно получить [Электронный ресурс]. URL: <https://alsolarstore.com/blog/best-angle-for-solar-panels-and-how-to-get-it-right.html> (дата обращения: 10.01.2024).
21. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. Солнечная энергетика. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 300 с. ISBN ISBN 978-5-383-00608-5.
22. Лучшая ориентация для солнечных панелей [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294815/4294815350.pdf> (дата обращения: 10.01.2024).

[solarsena.com/best-orientation-solar-panels/](https://solarsena.com/best-orientation-solar-panels/) (дата обращения: 10.01.2024).

23. Амерханов Р.А., Григораш О.В., Самородов И.Б., Цыганков Б.К., Воробьев Е.С. Солнечные фотоэлектрические станции. Краснодар: КубГАУ, 2017. 206 с. ISBN 978-5-00097-279-3.

24. Почанин Ю. Конструкции и монтаж фотоэлектрических модулей [Электронный ресурс]. URL: <https://libcat.ru/knigi/nauka-i-obrazovanie/prochaya-nauchnaya-literatura/578660-2-yurij-pochanin-konstrukcii-i-montazh-fotoelektricheskikh-modulej.html> (дата обращения: 10.01.2024).

25. Как определить оптимальное расстояние между рядами солнечных панелей? [Электронный ресурс]. URL: <https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/rasstoyanie-mezhdu-ryadami-solnechnyh-modulej.htm?ysclid=lidsysoguz705182331/> (дата обращения: 10.01.2024).

26. Расстояние между рядами солнечных панелей [Электронный ресурс]. URL: <https://azsolarcenter.org/pv-row-to-row-spacing> (дата обращения: 10.01.2024).

27. Жураева З.И. Обзорный анализ основных видов солнечных элементов и выявление путей повышения эффективности их работы и применения // *Universum: технические науки*. 2018. № 10. С. 66–68.

28. Кравцов П.В. Факторы, влияющие на производительность солнечных батарей // *Universum: технические науки*. 2022. № 9-4 (102). С. 53–55. EDN: WFDSSE.

29. Номинальная мощность солнечной батареи. Что нужно и важно знать? [Электронный ресурс]. URL: <https://helios-house.ru/novosti/nominalnaya-moshchnost-solnechnoj-batarei.html> (дата обращения: 10.01.2024).

30. Новые российские разработки для оптимизации энергоперехода [Электронный ресурс]. URL: <https://energypolicy.ru/novye-rossijskie-razrabotki-dlya-optimizaczii-energoperehoda/energetika/2023/14/19/> (дата обращения: 10.01.2024).

31. Как спроектировать солнечную фотоэлектрическую систему [Электронный ресурс]. URL: <https://lankantrailblazer.wordpress.com/2019/10/04/how-to-design-a-solar-pv-system-calculation-of-ac-power-generation/> (дата обращения: 10.01.2024).

32. Типичные данные за метеорологический год [Электронный ресурс]. URL: <https://solargis.com/products/evaluate/overview> (дата обращения: 10.01.2024).

33. Водород по одному доллару за килограмм [Электронный ресурс]. URL: <https://globalenergyprize.org/en/2022/04/01/hydrogen-at-one-dollar-per-kilogram/> (дата обращения: 10.01.2024).

34. Руководство пользователя PVGIS [Электронный ресурс]. URL: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool/getting-started-pvgis/pvgis-user-manual\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool/getting-started-pvgis/pvgis-user-manual_en) (дата обращения: 10.01.2024).

## References

1. *Kontseptsiya razvitiya vodorodnoi energetiki v Rossiiskoi Federatsii* [Concept for the Development of Hydrogen Energy in the Russian Federation] [Electronic Resource]. URL: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

2. *Modul'naya vodorodnaya platforma elektrolizera H-TEC PEM* [Modular Hydrogen Electrolyser Platform H-TEC PEM]. [Electronic Resource]. URL: <https://www.h-tec.com/en/products/detail/mhp-series/mhp-product/> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

3. *Yandeks. Karty i Transport* [Yandex. Maps and Transport]. [Electronic Resource]. URL: <https://yandex.ru/maps/?l=sat,skl&ll=35.318000,45.017000&z=17/> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

4. *Klimaticheskie osobennosti Kryma* [Climatic Features of Crimea]. [Electronic Resource]. URL: <http://geo-storm.ru/priroda-i-klimat/pogoda/klimaticheskie-osobennosti-kryma/> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

5. *Optimal'nyi ugol ustanovki solnechnoi batarei dlya maksimal'noi vyrabotki energii v severnykh shirotakh* [Optimal Installation Angle of a Solar Battery for Maximum Energy Production in Northern Latitudes]. [Electronic Resource]. URL: <https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/optimalnyj-ugol-ustanovki-sb.html> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

6. *Inventory i kontrollery moshchnosti v solnechnoi energetike* [Inverters and Power Controllers in Solar Energy] [Electronic Resource]. URL: <https://clck.ru/34ab6p> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

7. *Kstar* [Electronic Resource]. URL: <https://elt.uz/partners/kstar/> (accessed 10.01.2024).

8. *Prikaz Mintruda Rossii № 903n ot 15 dekabrya 2020 g. «Ob utverzhdenii Pravil po okhrane truda pri ekspluatatsii elektroustanovok»* [Order of the Ministry of Labor of Russia No. 903n dated December 15, 2020 «On Approval of the Rules for Labor Protection during the Operation of Electrical Installations»]. [Electronic Resource]. URL: <https://mintrud.gov.ru/docs/mintrud/orders/1816> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

9. *Pravila ustroistva elektroustanovok* [Rules for the Construction of Electrical Installations] [Electronic Resource]. 7 ed. Moscow, Ministerstvo energetiki Rossiiskoi Federatsii, 2003. URL: <https://>

minstroy.gov-murman.ru/files/4.14-\_-pue\_tekst.pdf (accessed 10.01.2024). [in Russian].

10. *Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii elektro-ustanovok potrebitelei: utv. M-vom energetiki Rossijskoi Federatsii 12.08.2022: vved. v deistvie s 07.10.2022* [Rules for the Technical Operation of Consumer Electrical Installations: Approved by the Ministry of Energy of the Russian Federation 12.08.2022: introduced since 07.10.2022]. Moscow, ENAS Publ., 2022. 78 p. [in Russian].

11. *GOST 12.1.019-2017. Sistema standartov bezopasnosti truda. Elektrobezopasnost'. Obshchie trebovaniya i nomenklatura vidov zashchity* [State Standard 12.1.019-2017. Occupational Safety Standards System. Electrical Safety. General Requirements and Nomenclature of Types of Protection]. [Electronic Resource]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293733/4293733591.pdf> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

12. *Instruktsiya po primeneniyu i ispytaniyu sredstv zashchity, ispol'zuemykh v elektroustanovkakh* [Instructions for the Use and Testing of Protective Equipment Used in Electrical Installations]. [Electronic Resource]. M.: Izd-vo NTsENAS, 2003.— 112 s. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294815/4294815350.pdf> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

13. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 16.09.2020 No. 1479 «Ob utverzhdenii Pravil protivopozharnogo rezhima v Rossijskoi Federatsii»* [Decree of the Government of the Russian Federation dated September 16, 2020 No. 1479 «On Approval of the Fire Regulations in the Russian Federation»]. [Electronic Resource]. URL: <https://rosguard.gov.ru/uploads/2020/12/postanovleniepravitelstva-rf-ot-16092020-n-1479-ob-utverzhdenii-pravil-protivopozharnogorezhima-v-rossijskoj-federacii.pdf> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

14. *O pozharnoi bezopasnosti: federal'nyi zakon RF (s izmeneniyami ot 29.12.2022 g. No. 69-FZ)* [On Fire Safety: Federal Law of the Russian Federation (as Amended dated December 29, 2022 No. 69-FZ)]. [Electronic Resource]. URL: <https://legalacts.ru/doc/FZ-o-pozharnoj-bezopasnosti/> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

15. *O pozharnoi bezopasnosti: Federal'nyi zakon RF (s izmeneniyami ot 14.07.2022 g. No. 123-FZ)* [On Fire Safety: Federal Law of the Russian Federation (as Amended dated July 14, 2022 No. 123-FZ)]. [Electronic Resource]. URL: <https://legalacts.ru/doc/FZ-o-pozharnoj-bezopasnosti/> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

16. *RD 34.21.122-87 «Instruktsiya po ustroystvu molniezashchity zdaniy i sooruzhenii» ot 12.10.1987* [RD 34.21.122-87 «Instructions for the Installation of Lightning Protection of Buildings and Structures»

dated 10.12.1987]. [Electronic Resource]. URL: <https://www.indeks.ru/dokumenty/rd-34-21-122-87-instruktsiya-poustroystvu-molniezashchity/instruktsiya-po-ustroystvu-molniezashchity.pdf> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

17. *SO 153-34.21.122-2003 «Instruktsiya po ustroystvu molniezashchity zdaniy, sooruzhenii i promyshlennykh kommunikatsii» ot 30.06.2003* [SO 153-34.21.122-2003 «Instructions for the Installation of Lightning Protection of Buildings, Structures and Industrial Communications» dated 30.06.2003]. [Electronic Resource]. URL: <https://www.indeks.ru/dokumenty/so-153-34-21-122-2003-instruktsiya-poustroystvu-molniezashchity/instruktsiya-po-ustroystvu-molniezashchity.pdf> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

18. Gorbunova T.Yu. *Otsenka landshaftnogo potentsiala Yugo-Vostochnogo Kryma dlya ispol'zovaniya sistem vozobnovlyaemoi energetiki — solnechnoi i vetrovoi: dis. ... kand. geogr. nauk* [Assessment of the Landscape Potential of the South-Eastern Crimea for the Use of Renewable Energy Systems — Solar and Wind: Cand. Geogr. Sci. Dis.]. Simferopol', 2020. 223 p. [in Russian].

19. Vorkunov O.V., Ikhsanova A.I., Gainutdinova A.M. *Optimal'naya orientatsiya solnechnykh fotoelektricheskikh modulei v g. Kazani* [Optimum Orientation of Solar PV Modules in Kazan]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki — News of Universities. Problems of Energy*, 2015, No. 11/12, pp. 26-29. EDN: VRWVOT. [in Russian].

20. *Luchshii ugol dlya solnechnykh panelei i kak ego pravil'no poluchit'* [Best Angle for Solar Panels and How to Get It Right]. [Electronic Resource]. URL: <https://alsolarstore.com/blog/best-angle-for-solar-panels-and-how-to-get-it-right.html> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

21. Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A., Malinin N.K. *Solnechnaya energetika* [Solar Energy]. Moscow, Izdatel'skii dom MEI, 2008. 300 p. ISBN 978-5-383-00608-5. [in Russian].

22. *Luchshaya orientatsiya dlya solnechnykh panelei* [Best Orientation for Solar Panels]. [Electronic Resource]. URL: <https://solarsena.com/best-orientation-solar-panels/> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

23. Amerkhanov R.A., Grigorash O.V., Samorodov I.B., Tsygankov B.K., Vorob'ev E.S. *Solnechnye fotoelektricheskie stantsii* [Solar Photovoltaic Stations]. Krasnodar, KubGAU, 2017. 206 p. ISBN 978-5-00097-279-3. [in Russian].

24. Pochanin Yu. *Konstruktsii i montazh fotoelektricheskikh modulei* [Design and Installation of Photovoltaic Modules]. [Electronic Resource]. URL: <https://libcat.ru/knigi/nauka-i-obrazovanie/prochaya-nauchnaya-literatura/578660-2-yurij->

pochanin-konstrukcii-i-montazh-fotoelektricheskikh-modulej.html (accessed 10.01.2024). [in Russian].

25. *Kak opredelit' optimal'noe rasstoyanie mezhdur yadami solnechnykh panelei?* [How to Determine the Optimal Distance between Rows of Solar Panels?]. [Electronic Resource]. URL: <https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/rasstoyanie-mezhdur-yadami-solnechnykh-modulej.htm?ysclid=lidsysoguz705182331/> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

26. *Rasstoyanie mezhdur yadami solnechnykh panelei* [Distance between Rows of Solar Panels]. [Electronic Resource]. URL: <https://azsolarcenter.org/pv-row-to-row-spacing> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

27. Zhuraeva Z.I. Obzornyi analiz osnovnykh vidov solnechnykh elementov i vyyavlenie putei povysheniya effektivnosti ikh raboty i primeneniya [Overview Analysis of the Main Types of Solar Cells and Revealing Ways to Improve the Efficiency and Use of Solar Cells]. *Universum: tekhnicheskie nauki — Universum: Technical Sciences*, 2018, No. 10, pp. 66–68. [in Russian].

28. Kravtsov P.V. *Faktory, vliyayushchie na proizvoditel'nost' solnechnykh batarei* [Factors Affecting the Performance of Solar Batteries]. *Universum: tekhnicheskie nauki — Universum: Technical Sciences*, 2022, No. 9-4 (102), pp. 53–55. EDN: WFDSER. [in Russian].

29. *Nominal'naya moshchnost' solnechnoi batarei. Chto nuzhno i vazhno znat'?* [Rated Power of the Solar Battery. What Is Necessary and

Important to Know?]. [Electronic Resource]. URL: <https://helios-house.ru/novosti/nominalnaya-moshchnost-solnechnoj-batarei.html> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

30. *Novye rossiiskie razrabotki dlya optimizatsii energoperekhoda* [New Russian Developments for Optimizing the Energy Transition]. [Electronic Resource]. URL: <https://energypolicy.ru/novye-rossiiskie-razrabotki-dlya-optimizaczi-energoperekhoda/energetika/2023/14/19/> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

31. *Kak sproektirovat' solnechnuyu fotoelektricheskuyu sistemu* [How to Design a Solar Photovoltaic System]. [Electronic Resource]. URL: <https://lankantrailblazer.wordpress.com/2019/10/04/how-to-design-a-solar-pv-system-calculation-of-ac-power-generation/> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

32. *Tipichnye dannye za meteorologicheskii god* [Typical Data for a Meteorological Year]. [Electronic Resource]. URL: <https://solargis.com/products/evaluate/overview> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

33. *Vodorod po odnomu dollaru za kilogram* [Hydrogen at One Dollar per Kilogram]. [Electronic Resource]. URL: <https://globalenergyprize.org/en/2022/04/01/hydrogen-at-one-dollar-per-kilogram/> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

34. *Rukovodstvo pol'zovatelya PVGIS* [PVGIS User Manual]. [Electronic Resource]. URL: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool/getting-started-pvgis/pvgis-user-manual\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool/getting-started-pvgis/pvgis-user-manual_en) (accessed 10.01.2024). [in Russian].

Статья поступила в редакцию 05.04.2024; одобрена после рецензирования 16.05.2024; принята к публикации 11.06.2024.

The article was submitted 05.04.2024; approved after reviewing 16.05.2024; accepted for publication 11.06.2024.



Научная статья

УДК 62-835

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-2-64-75

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЗАРЯДНОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

**Никита Русланович Кантюков****Nikita R. Kantyukov**

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

По мере увеличения числа электромобилей возникает необходимость в большем количестве зарядных станций электромобилей с передовыми технологиями быстрой зарядки. Поскольку автомобили оснащены аккумуляторами большой ёмкости для быстрой зарядки, необходима зарядная станция, обеспечивающая высокую скорость зарядки.

### Цель исследования

В данной статье осуществляется исследование возможности использования различных схем выпрямителей и инверторов для их интегрирования в зарядную станцию электромобиля.

### Методы исследования

Представленная работа заключается в разработке компьютерной модели зарядной станции на основе рассмотренных схем. Моделирование проводилось в среде Matlab/Simulink. Модель позволяет использовать различные схемы как выпрямителей, так и инверторов, а также проводить ее дальнейшее усовершенствование.

### Результаты

Авторами рассматривается возможность внедрения различных электронных компонентов для получения удовлетворительного результата исследования. Полученные результаты позволяют рассмотреть преимущества и недостатки рассматриваемых схем.

### Ключевые слова

электромобиль, зарядная станция, выпрямитель, преобразователь, инвертор, постоянный ток, переменный ток, зарядный модуль, схема, трехфазная сеть, однофазная сеть

**Благодарности:** Исследования выполнены на средства гранта Стипендии Президента Российской Федерации в 2022–2024 годах для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики. Грантополучатель Хазиева Регина Тагировна.

**Для цитирования:** Кантюков Н. Р., Хазиева Р. Т. Разработка модели зарядной станции для электромобиля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 2. Т. 20. С. 64-75. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-64-75>.

Original article

## DEVELOPMENT OF A CHARGING STATION MODEL FOR AN ELECTRIC VEHICLE

### Relevance

As the number of electric vehicles increases, there is a need for more electric vehicle charging stations with advanced fast charging technologies. Since cars are equipped with high-capacity batteries, a charging station is needed for fast charging, providing high charging speed.

### Aim of research

This article investigates the possibility of using various rectifier and inverter circuits to integrate them into an electric vehicle charging station.

### Research methods

The presented work consists in the development of a computer model of a charging station based on the considered schemes. The simulation was carried out in the Matlab/Simulink environment. The model allows the use of various circuits of both rectifiers and inverters, as well as its further improvement.

### Results

The authors consider the possibility of introducing various electronic components to obtain a satisfactory research result. The results obtained allow us to consider the advantages and disadvantages of the schemes under consideration.

### Ключевые слова

electric vehicle, charging station, rectifier, converter, inverter, direct current, alternating current, charging module, circuit, three-phase network, single-phase network

**Acknowledgements:** The research was carried out using a grant from the President of the Russian Federation in 2022–2024 for young scientists and graduate students carrying out advanced research and development in priority areas of modernization of the Russian economy. Grant recipient is Regina Tagirovna Khazieva.

**For citation:** Kanyukov N. R., Khazieva R. T. Razrabotka modeli zaryadnoi stantsii dlya elektromobilya [Development of a Charging Station Model for an Electric Vehicle]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 2, Vol. 20, pp. 64-75 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-64-75>.

### Введение

С темпами развития технологий и изменениями в сознании людей о важности устойчивого развития, зарядные станции для электромобилей становятся все более актуальной и значимой темой. В наше время, когда стремление к экологической безопасности и сокращению выбросов углекислого газа становится важным приоритетом, электромобили и инфраструктура для их зарядки играют ключевую роль в переходе к устойчивой транспортной системе. В статье рассмотрены типы зарядных станций, используемые технологии для повышения их эффективности.

### Типы зарядных станций

Рассмотрим различные конфигурации силовой электроники, используемой для создания быстрых зарядных устройств (рисунок 1).

Существует два типа зарядных устройств. Зарядные устройства переменного тока и постоянного тока. Первое питает аккумулятор электроавтомобиля от встроенного зарядного устройства автомобиля [1]. У такой зарядной станции существует два режима заряда:

*1 режим:* аккумулятор потребляет от 12 до 16 А и до полной зарядки аккумулятора емкостью 110 А·ч потребуется от 12 до 17 ч;

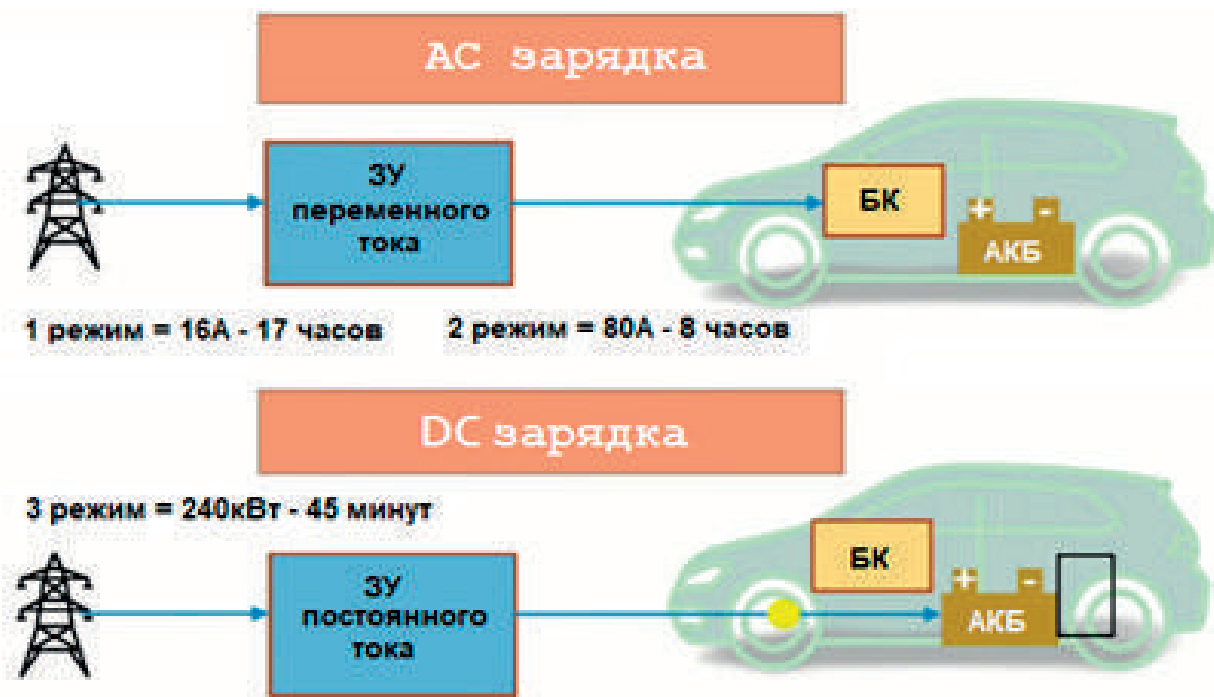


Рисунок 1. Режимы заряда электромобиля

Figure 1. Electric vehicle charging modes

*2 режим:* аккумулятор потребляет от 15 до 80 А и до полной зарядки аккумулятора емкостью 110 А·ч потребуются около 8 ч [2].

Зарядная станция постоянного тока подключается напрямую к автомобилю, минуя зарядный блок, встроенный в автомобиль. Зарядная станция постоянного тока относится к *3 режиму* заряда и может выдавать высокие мощности 120–240 кВт. При использовании *3 режима* аккумулятор заряжается менее чем за 45 мин [3]. В таких зарядных устройствах используются модульные преобразователи, которые устанавливаются непосредственно на самой электрозаправочной станции.

Рассмотрим ряд схем, используемых в зарядных станциях, осуществляемых заряд непосредственно посредством постоянного тока (рисунок 2).

Модуль питания в станциях постоянного тока разделяется на два типа. Первый состоит из преобразователя переменного тока в постоянный (AC/DC), который входит в блок зарядной станции. Модуль переменного тока — это первый уровень преобразования энергии. В зависимости от номинальной мощности он может быть однофазным или трехфазным. При заряде

автомобиля переменным однофазным напряжением происходит преобразование типа энергии из переменного в 400 В постоянного, а трехфазное преобразуется в 800 В постоянного [4]. Блок переменного тока также отвечает за коррекцию коэффициента мощности и должен поддерживать коэффициент нелинейных искажений не более 5 %.

Второй тип модуля питания представляет собой источник постоянного тока (DC/DC). Описываемое устройство преобразует стабильное напряжение постоянного тока в более низкое напряжение постоянного тока для зарядки аккумулятора. Преобразователь постоянного тока должен обеспечивать подачу номинальной мощности на аккумулятор в широком диапазоне напряжений, а также регулировать уровень напряжения в зависимости от степени заряда аккумулятора. Модуль зарядки постоянным током имеет возможность обеспечивать гальваническую развязку между входом и выходом через высокочастотный трансформатор [4]. Данные преобразователи также способны работать при низком уровне напряжения и тока, тем самым достигается крайне высокая эффективность установки.

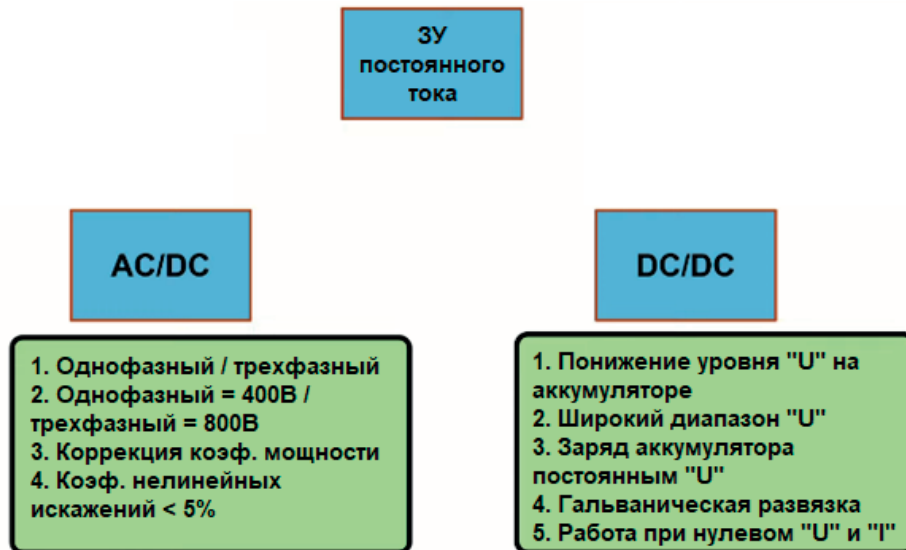


Рисунок 2. Схема заряда автомобиля посредством постоянного тока

Figure 2. The scheme of charging the car by direct current

### Типы преобразователей для зарядной станции

Теперь рассмотрим схемы, используемые для реализации модулей AC/DC и DC/DC. Наиболее используемой схемой для преобразования переменного тока в постоянный однофазный ток является повышающий преобразователь PFC (рисунок 3) [5]. Преимущество использования схемы в том, что управление замкнутым контуром очень простое, но у этой схемы есть несколько недостатков. Наличие диодного моста на входе делает схему менее эффективной, а также исключает двунаправленную работу схемы, кроме того, она состоит из большого количества компонентов [6]. Так что эта схема в основном используется в устройствах с низким энергопотреблением.

Для более эффективного использования повышающего преобразователя PFC, с учетом приложения средней мощности, существует повышающий чередующийся PFC (корректор коэффициента мощности с форсированным чередованием) (рисунок 4). Представленная схема сохраняет преимущества предыдущей, и при этом с меньшими недостатками. К тому же схема чередующегося повышающего преобразователя совмещает в себе простоту и эффективность работы [7–12].

Для уменьшения влияния недостатков прошлых схем используют тотемно-полюсную коррекцию коэффициента мощности (totem-pole PFC) (рисунок 5).

Количество компонентов в этой схеме меньше по сравнению с повышающим пре-

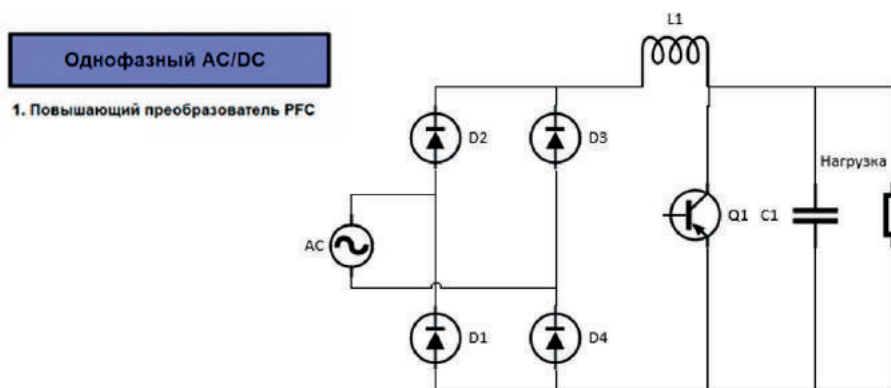


Рисунок 3. Повышающий преобразователь PFC

Figure 3. PFC boost converter

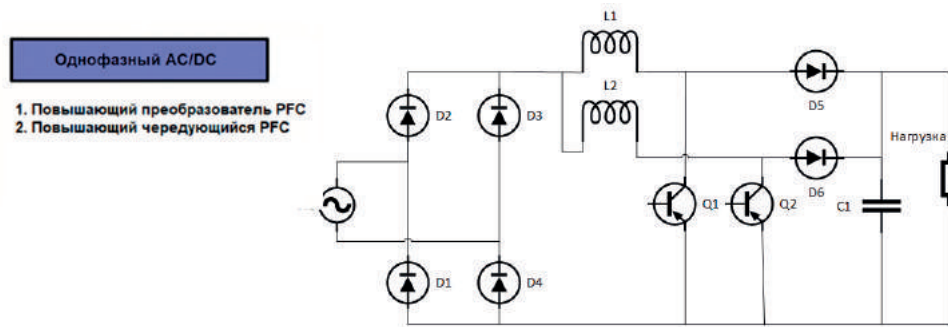


Рисунок 4. Повышающий чередующийся PFC

Figure 4. Step-up alternating PFC

образователем PFC при условии, что к тотемно-полюсной схеме будет приложена большая мощность [13]. Кроме того, отсутствие диодного моста повышает ее эффективность, а в случае интегрирования дополнительного контроллера тотемного полюса может в значительной степени упростить реализацию данного преобразователя [14]. Схема обладает способностью двунаправленного подключения, что помогает при

подключении автомобиля к электросети. В высоком ценовом сегменте total-pole PFC используется устройство из карбида кремния или нитрида галлия, а в низком — используются диоды или кремниевые полевые MOSFET транзисторы.

Для трехфазной работы наиболее распространенной схемой является двухуровневый PFC преобразователь (рисунок 6) [6].

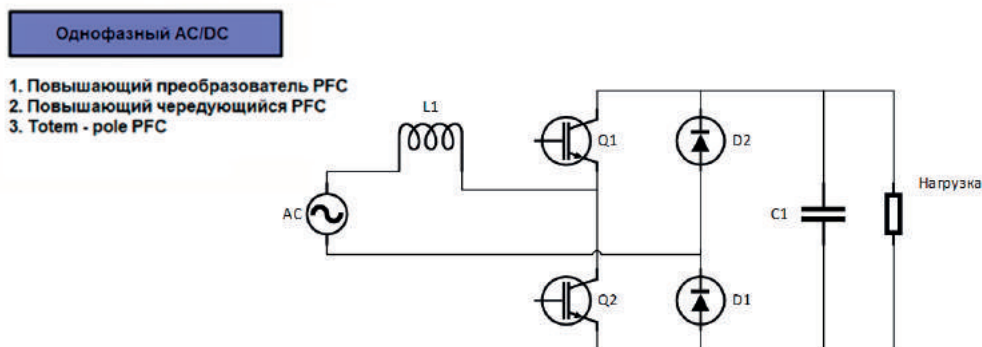


Рисунок 5. Тотемно-полюсная схема коррекции мощности

Figure 5. Totem-pole power correction scheme

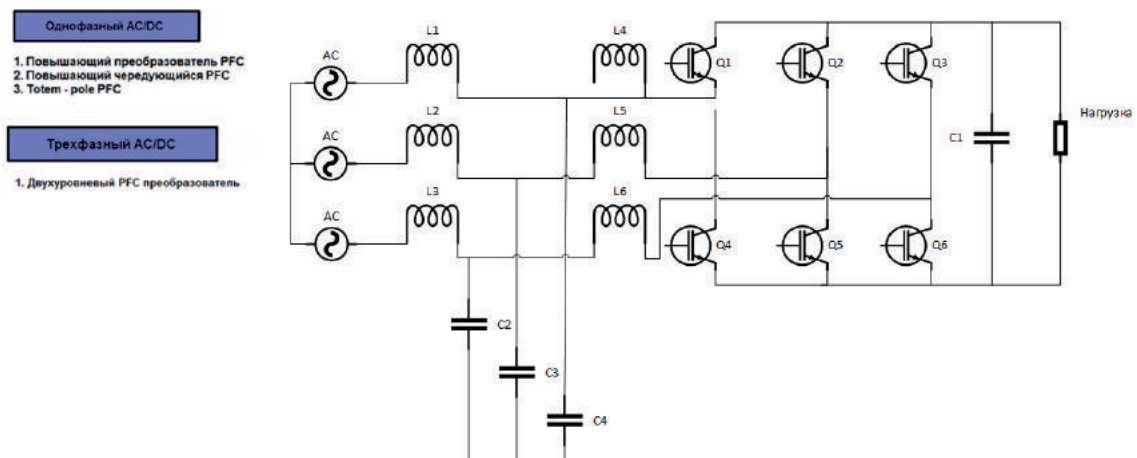


Рисунок 6. Двухуровневый PFC преобразователь

Figure 6. Two-level PFC converter

Двухуровневый PFC преобразователь — это выпрямитель повышающего типа с 6 переключателями, отличающийся крайне простой схемой и легким управлением. Он обладает возможностью двунаправленного потока энергии и может достигать высокого коэффициента мощности при соответствующем КПД. Одним из недостатков этой схемы является крупногабаритный фильтр, который требуется для фильтрации входного тока до нормированных значений.

Другой схемой, используемой в трехфазной системе, является Виенна-выпрямитель (рисунок 7). Эта схема распространена благодаря своей работе в режиме непрерывной проводимости, возможности трехуровневой коммутации и снижения нагрузки на силовые устройства. Ее единственным недостатком является отсутствие двунаправленного потока энергии.

Другой схемой трехфазной работы является трехфазный трехуровневый конвертер NPC с зажимом нейтральной точки (рисунок 8). У этой схемы самая низкая нагрузка на устройство среди всех трех схем. Требование к фильтрации для этой схемы также меньше, поэтому размер катушки индуктивности может быть уменьшен, что улучшает общую плотность мощности системы. Схема также обеспечивает двунаправленную передачу мощности и является предпочтительным выбором для переключения частот более 50 кГц из-за меньших потерь при переключении и большей эффективности.

Теперь проанализируем схемы DC/DC.

Наиболее распространённой схемой является полный мост DC/DC со сдвигом фаз (рисунок 9).

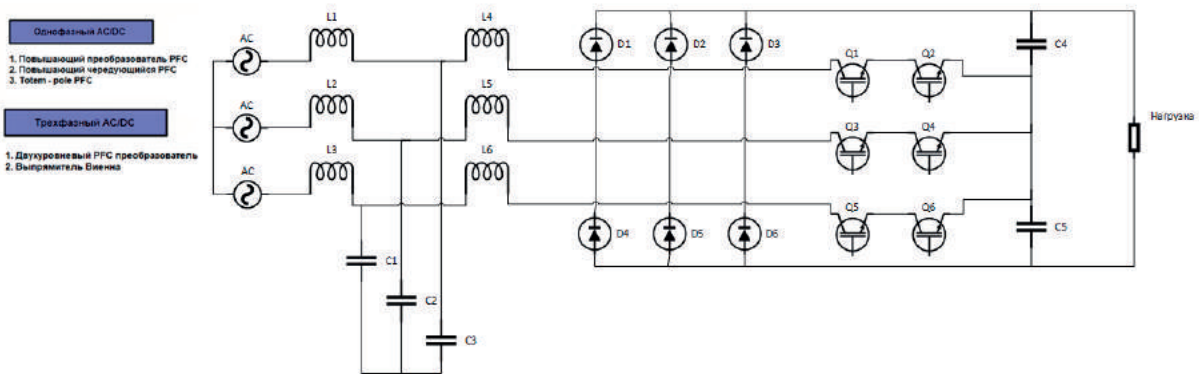


Рисунок 7. Выпрямитель Виенна

Figure 7. Vienna rectifier

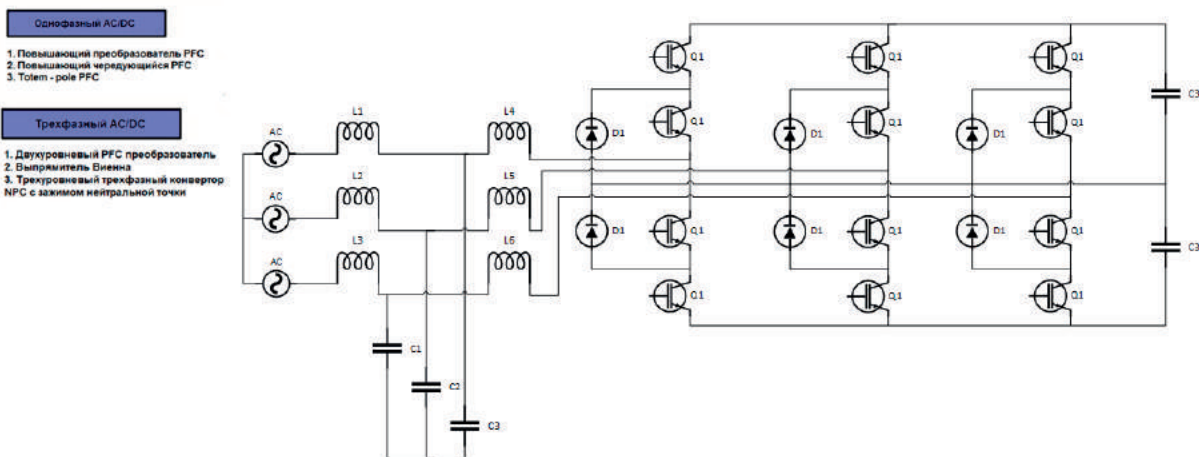


Рисунок 8. Трехуровневый трехфазный конвертер NPC с зажимом нейтральной точки

Figure 8. Three-level three-phase NPC converter with neutral point clamp

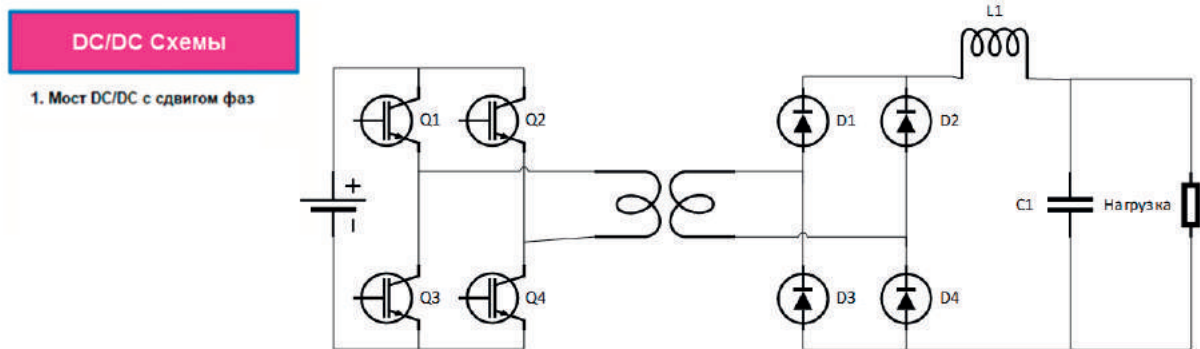


Рисунок 9. Мост DC/DC со сдвигом фаз

Figure 9. DC/DC bridge with phase shift

В обычном мосте можно использовать диод или полевой транзистор. Если используется полевой транзистор, схема способна работать в двух направлениях. Передача энергии между первичной и вторичной обмотками контролируется изменением фазы между переключателями первичного моста. В результате можно добиться включения ZVS (Zero voltage switching) на одной обмотке и включения низкого напряжения на другой обмотке, что приводит к снижению потерь.

Другой схемой, используемой в каскаде DC/DC, является резонансный преобразователь LLC (рисунок 10).

Схема работает с переменной частотой переключения, а выходное напряжение определяется емкостью и коэффициентом поворота трансформатора. Когда схема работает на частоте, близкой к резонансной, могут быть достигнуты при ZVS (zero voltage switching) и ZCS (zero current switching), и, следовательно, она более эффективна по сравнению с мостовым пре-

образователем с фазовым сдвигом. Недостатком схемы является то, что она не обладает возможностью двунаправленного преобразования.

Еще одна схема — это двойной активный мост (рисунок 11).

У него есть транзисторы, выступающие в роли переключателей, как на первичном, так и на вторичном мостах. Поток энергии между входом и выходом корректируется путем регулировки фазового сдвига между первичным и вторичным мостами. Схема также может обеспечивать переключение нулевого напряжения и, следовательно, высокую эффективность. Недостатком является сложное управление при использовании в широком диапазоне напряжений.

Таким образом, подытожим все вышесказанное (рисунок 12).

Теперь для реализации полной схемы зарядного устройства объединим случайный преобразователь переменного тока в постоянный и преобразователь постоянного тока в постоянный ток.

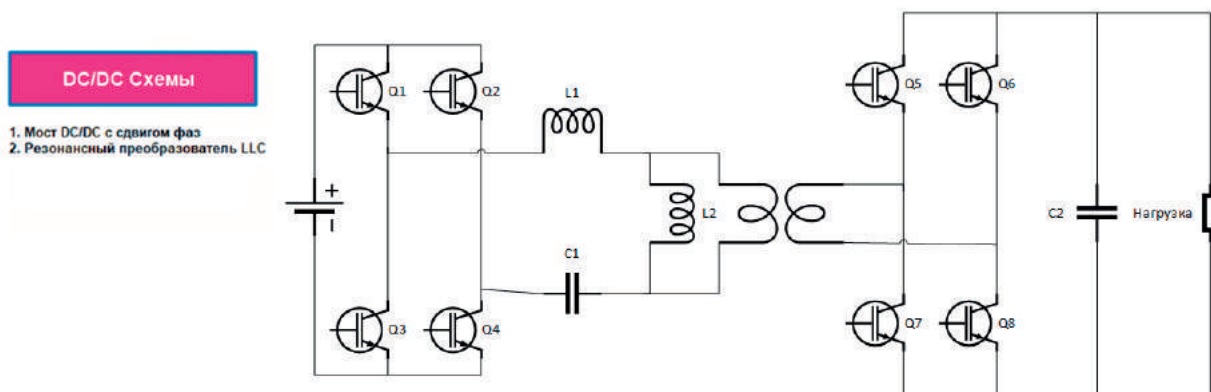


Рисунок 10. Резонансный преобразователь LLC

Figure 10. Resonant converter LLC

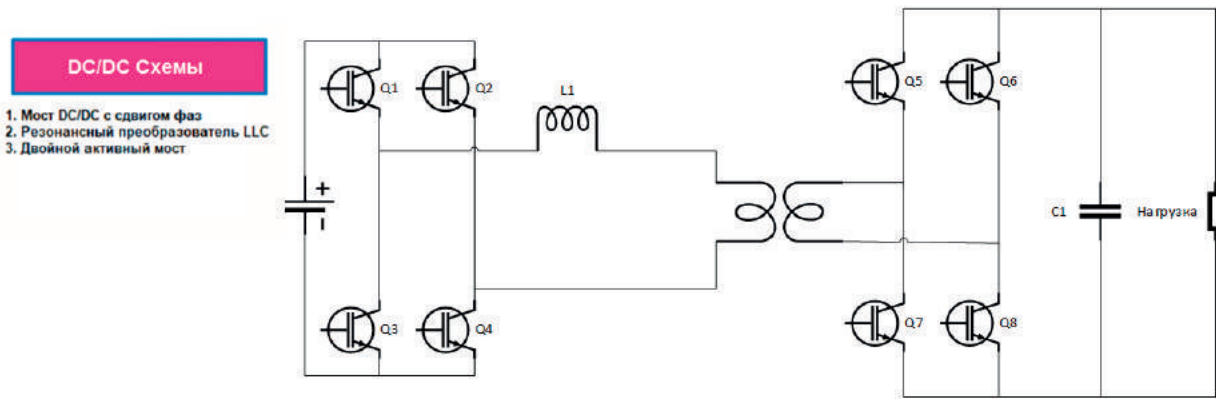


Рисунок 11. Двойной активный мост

Figure 11. Double active bridge



Рисунок 12. Схемы преобразователей

Figure 12. Converter circuits

Далее в среде Matlab Simulink смоделируем модель зарядного устройства для электромобилей, комбинируя эти схемы преобразователей [15].

### Моделирование в Matlab

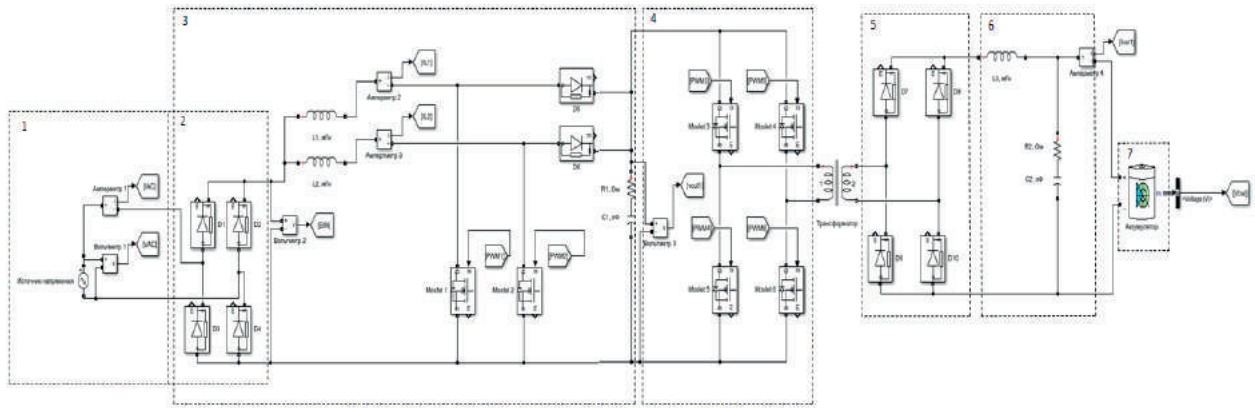
Смоделируем зарядное устройство для электромобиля. В статье были описаны различные схемы, как для модуля переменного тока, так и постоянного. Теперь смоделируем однофазное зарядное устройство для электромобилей. Для этого воспользуемся повышающим преобразователем с чередованием для сети переменного тока и полного мостового преобразователя с фазным сдвигом для секции постоянного тока (рисунок 13).

На рисунке 14 изображен график напряжения на выходе повышающего чередую-

щегося PFC. График показывает, что в период до 0,7 с наблюдается неравномерность амплитудно-частотной характеристики по причине переходного процесса. Далее график принимает равномерный вид, что является показателем правильной работы выпрямителя. Напряжение на выходе повышающего чередующегося PFC колеблется на уровне 400 В.

График на рисунке 15 показывает напряжение и ток на входе системы. Скачок тока обусловлен также переходным процессом при запуске модели. Ток имеет синусоидальную форму и совпадает по фазе с напряжением, таким образом можно сделать вывод, что схема работает в нормальном режиме.



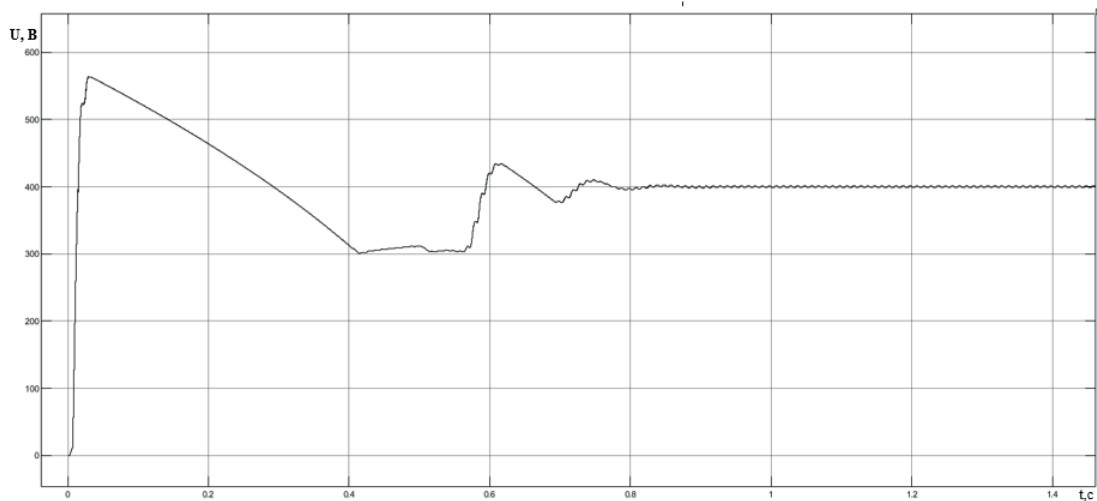


1 — источник питания; 2 — выпрямитель; 3 — повышающий чередующийся PFC;  
4 — инвертор; 5 — выпрямитель; 6 — фильтр; 7 — батарея

1 — power supply; 2 — rectifier; 3 — step-up alternating PFC;  
4 — inverter; 5 — rectifier; 6 — filter; 7 — battery

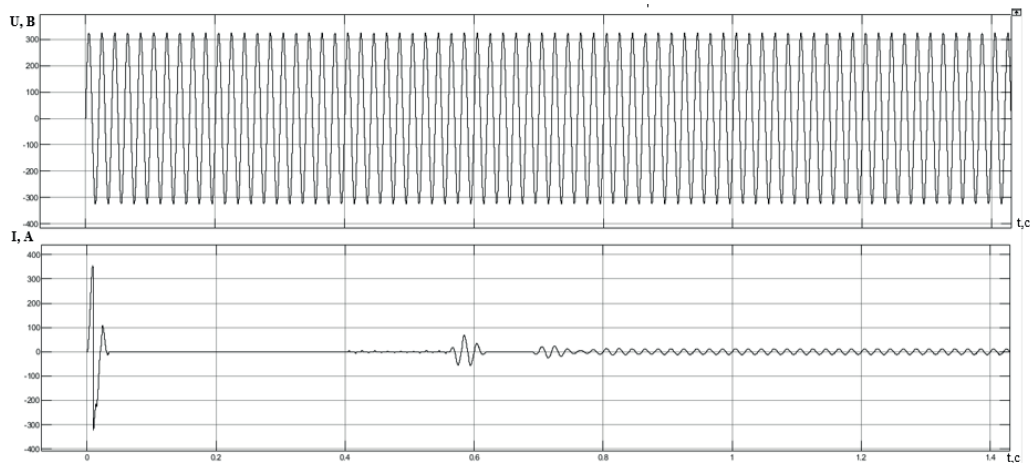
**Рисунок 13.** Модель в MATLAB

**Figure 13.** Model in MATLAB



**Рисунок 14.** Напряжение на выходе повышающего чередующегося PFC

**Figure 14.** Output voltage of the step-up alternating PFC

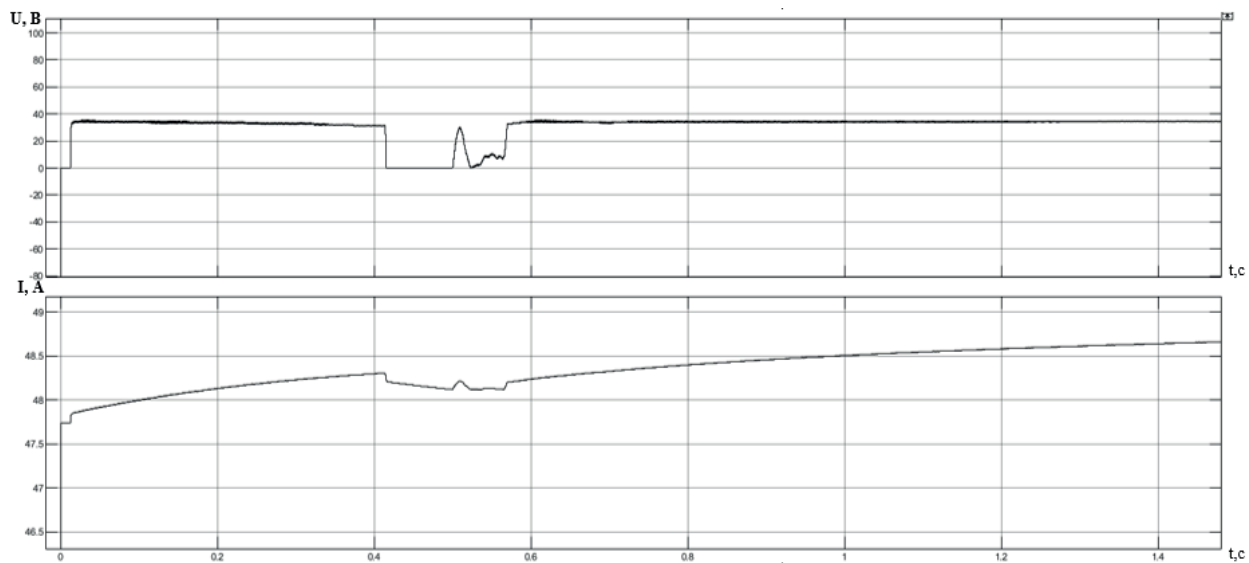


**Рисунок 15.** График напряжения и тока на входе схемы

**Figure 15.** Diagram of voltage and current at the input of the circuit

График на рисунке 16 указывает на напряжение и ток в процессе заряда аккумулятора. Ток практически на всем графике сохраняет одно значение. На нижнем гра-

фике — графике напряжения на аккумуляторе — мы наблюдаем равномерное повышение напряжения, что сигнализирует о нормальном режиме заряда.



**Рисунок 16.** График тока и напряжения на батарее в процессе его зарядки

**Figure 16.** Graph of current and voltage on the battery during its charging

### Выводы

В ходе данного исследования были изучены аспекты использования схем выпрямителя и инвертора для интегрирования их в систему заряда электромобиля. Полученные результаты исследования позволяют сделать вывод о преимуществах и недостатках рассматриваемых схем. Наиболее перспективными схемами для однофазной системы заряда являются тотемно-полюсной преоб-

разователь и повышающий чередующийся преобразователь. Для трехфазной системы актуальной схемой будет двухуровневый PFC преобразователь. На основе проведенного анализа можно утверждать, представленное исследование расширяет понимание о системах заряда электромобилей и может служить основой для дальнейших исследований в данной области.

### Список источников

1. Виды зарядных станций электромобилей [Электронный ресурс]. URL: [https://hybrids.ru/useful\\_materials/articles/vid\\_i\\_tipu\\_zaryadnyh\\_stancij](https://hybrids.ru/useful_materials/articles/vid_i_tipu_zaryadnyh_stancij).
2. Рязанов Г.М., Доманов В.И. Анализ и перспектива развития зарядных устройств для электромобилей // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: матер. VI Национальн. науч.-практ. конф.: в 2 т. Казань, 2020. Т. 2. С. 20-22. EDN: RVEEUM.
3. Вахрушев М.А. Анализ эффективности использования зарядных станций для электромобилей // Столыпинский. 2022. № 4. С. 57–70. EDN: ZPSZGO.

4. Огиевич А.В., Рубаносова А.Д., Скакалова В.В., Козловская В.Б. Зарядные станции для электромобилей. Их виды, особенности, требования // Электроэнергетика и электротехника: матер. 78-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Минск, 2022. С. 64-69. EDN: LSKZHE.
5. Контроллер зарядки электромобиля [Электронный ресурс]. URL: <https://prosto.energy/blogs/news/kontroller-zaryada-elektromobilya-on-zhe-secc>.
6. Chirag Panchal, Sascha Stegen, Junwei Lu. Review of Static and Dynamic Wireless Electric Vehicle Charging System // Engineering Science and Technology an International Journal 21. 2018. June. P.922-937. DOI:10.1016/j.jestch.2018.06.015.
7. Бхалла А. Вы за SiC или кремний? Тенденции развития и проблемы применения

SiC в приложениях. Часть 1 // Силовая электроника. 2020. № 1 (82). С. 8-11. EDN: BPGWME.

8. Бхалла А., Рентюк В. Вы за SiC или кремний? Часть 2. Современные тенденции применения SiC-устройств и технологии корпусирования // Силовая электроника. 2020. № 2 (83). С. 4-9. EDN: RTKNTV.

9. Бхалла А., Рентюк В. Вы за SiC или кремний? Часть 3. Тенденции в применении sic в электромобилях применение полупроводниковых приборов на основе SiC в преобразовании энергии электромобилей // Силовая электроника. 2020. № 3 (84). С. 10-15. EDN: DNMAIN.

10. Бхалла А. Вы за SiC или кремний? Часть 4. Как создать лучшие тяговые инверторы для электромобиля? Ответ: использовать SiC! // Силовая электроника. 2020. № 4 (85). С. 7-13. EDN: QTYDNP.

11. Бхалла А., Рентюк В. Вы за SiC или кремний? Часть 5. SiC-транзисторы сверхвысокого рабочего напряжения и суперкаскоды // Силовая электроника. 2020. № 5 (86). С. 12-19. EDN: MMCKSQ.

12. Бхалла А., Рентюк В. Вы за SiC или кремний? Часть 6. Использование полевых SiC-транзисторов в блоках питания центров обработки данных и телекоммуникационного оборудования // Силовая электроника. 2020. № 6 (87). С. 16-23. EDN: DYAQKG.

13. Roberts S. M.Sc. B.Sc. AC/DC Book of Knowledge: Practical Tips for the User. RECOM Engineering, GmbH & Co.KG, Austria, 2018. 189 p. URL: [https://www.schukat.com/schukat/pdf.nsf/06AADCC65C10D841C125833F002B0AF4/\\$file/recom-acdc-book-of-knowledge-english.pdf](https://www.schukat.com/schukat/pdf.nsf/06AADCC65C10D841C125833F002B0AF4/$file/recom-acdc-book-of-knowledge-english.pdf).

14. Робертс С., Рентюк В. Переменный ток — начало начал // Компоненты и технологии. 2021. № 11. С. 98-103. EDN: LTHMPF.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2021618552. Встроенное программное обеспечение контроллера управления устройства быстрой зарядки аккумулятора электромобиля по стандарту CHADEMO / М.А. Архаткин (РФ). 2021617963, Заявлено 28.05.2021; Опубл. 28.05.2021. EDN: UZSZXW.

## References

1. *Vidy zaryadnykh stantsii elektromobilei* [Types of Electric Vehicle Charging Stations] [Electronic Resource]. URL: [https://hybrids.ru/useful\\_materials/articles/vid\\_i\\_tipy\\_zaryadnyh\\_stancij](https://hybrids.ru/useful_materials/articles/vid_i_tipy_zaryadnyh_stancij). [in Russian].

2. Ryazapov G.M., Domanov V.I. Analiz i perspektiva razvitiya zaryadnykh ustroystv dlya elektromobilei [Analysis and Prospects for the

Development of Charging Devices for Electric Cars]. *Materialy VI Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Priborostroenie i avtomatizirovannyi elektroprivod v toplivno-energeticheskom komplekse i zhilishchno-kommunal'nom khozyaistve»: v 2 t.* [Materials of the VI National Scientific and Practical Conference «Instrument Making and Automated Electric Drive in the Fuel and Energy Complex and Housing and Communal Services»: in 2 vol.]. Kazan', 2020, Vol. 2, pp. 20-22. EDN: RVEEUM. [in Russian].

3. Vakhrushev M.A. Analiz effektivnosti ispol'zovaniya zaryadnykh stantsii dlya elektromobilei [Analysis of the Efficiency of Using Charging Stations for Electric Vehicles]. *Stolypinskii vestnik — Stolypin Annals*, 2022, No. 4, pp. 57–70. EDN: ZPSZGO. [in Russian].

4. Ogievich A.V., Rubanosova A.D., Skakalova V.V., Kozlovskaya V.B. Zaryadnye stantsii dlya elektromobilei. Ikh vidy, osobennosti, trebovaniya [Charging Stations for Electric Vehicles. Their Types, Features, Requirements]. *Materialy 78-i nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov i aspirantov «Elektroenergetika i elektrotehnika»* [Materials of the 78th Scientific and Technical Conference of Students and Graduate Students «Electric Power and Electrical Engineering»]. Minsk, 2022. S. 64-69. EDN: LSKZHE. [in Russian].

5. *Kontroller zaryadki elektromobilya* [Electric Vehicle Charging Controller]. [Electronic Resource]. URL: <https://prosto.energy/blogs/news/kontroller-zaryada-elektromobilya-on-zhe-secc>. [in Russian].

6. Chirag Panchal, Sascha Stegen, Junwei Lu. Review of Static and Dynamic Wireless Electric Vehicle Charging System. *Engineering Science and Technology an International Journal*, 2018, June, pp. 922-937. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.06.015.

7. Bkhalla A. Vy za SiC ili kremnii? Tendentsii razvitiya i problemy primeneniya SiC v prilozheniyakh. Chast' 1 [Are You for SiC or Silicon? Development Trends and Problems of Using SiC in Applications. Part 1]. *Silovaya elektronika — Power Electronics*, 2020, No. 1 (82), pp. 8-11. EDN: BPGWME. [in Russian].

8. Bkhalla A., Rentyuk V. Vy za SiC ili kremnii? Chast' 2. Sovremennye tendentsii primeneniya SiC-ustroystv i tekhnologii korpusirovaniya [Are You for SiC or Silicon? Part 2. Current Trends in the Use of SiC Devices and Packaging Technology]. *Silovaya elektronika — Power Electronics*, 2020, No. 2 (83), pp. 4-9. EDN: RTKNTV. [in Russian].

9. Bkhalla A., Rentyuk V. Vy za SiC ili kremnii? Chast' 3. Tendentsii v primenenii SiC v elektromobilyakh primeneniye poluprovodnikovyykh

priborov na osnove SiC v preobrazovanii energii elektromobiley [Are You for SiC or Silicon? Part 3. Trends in the Use of SiC in Electric Vehicles; the Use of Semiconductor Devices Based on SiC in Energy Conversion of Electric Vehicles]. *Silovaya elektronika — Power Electronics*, 2020, No. 3 (84), pp. 10-15. EDN: DNMAIN. [in Russian].

10. Bkhalla A. Vy za SiC ili kremnii? Chast' 4. Kak sozdat' luchshie tyagovye inventory dlya elektromobilya? Otvet: ispol'zovat' SiC! [Are You for SiC or Silicon? Part 4. How to Create the Best Traction Inverters for an Electric Vehicle? Answer: Use SiC!]. *Silovaya elektronika — Power Electronics*, 2020, No. 4 (85), pp. 7-13. EDN: QTYDNP. [in Russian].

11. Bkhalla A., Rentyuk V. Vy za SiC ili kremnii? Chast' 5. SiC-tranzistory sverkhvysokogo rabochego napryazheniya i superkaskody [Are You for SiC or Silicon? Part 5. Ultra-High Operating Voltage SiC Transistors and Supercascodes]. *Silovaya elektronika — Power Electronics*, 2020, No. 5 (86), pp. 12-19. EDN: MMCKSQ. [in Russian].

12. Bkhalla A., Rentyuk V. Vy za SiC ili kremnii? Chast' 6. Ispol'zovanie polevykh SiC-tranzistorov v blokakh pitaniya tsentrov obrabotki dannykh i telekommunikatsionnogo oborudovaniya [Are You

for SiC or Silicon? Part 6. Use of Field-Effect SiC Transistors in Power Supplies for Data Processing Centers and Telecommunications Equipment]. *Silovaya elektronika — Power Electronics*, 2020, No. 6 (87), pp. 16-23. EDN: DYAQKG. [in Russian].

13. Roberts S. M.Sc. B.Sc. *AC/DC Book of Knowledge: Practical Tips for the User*. RECOM Engineering, GmbH & Co.KG, Austria, 2018. 189 p. URL: [https://www.schukat.com/schukat/pdf.nsf/06AADCC65C10D841C125833F002B0AF4/\\$file/recom-acdc-book-of-knowledge-english.pdf](https://www.schukat.com/schukat/pdf.nsf/06AADCC65C10D841C125833F002B0AF4/$file/recom-acdc-book-of-knowledge-english.pdf).

14. Roberts S., Rentyuk V. Peremennyi tok — nachalo nachal [Alternating Current — the Beginning of the Beginning]. *Komponenty i tekhnologii — Components and Technologies*, 2021, No. 11, pp. 98-103. EDN: LTHMPF. [in Russian].

15. Arhatkin M.A. *Vstroennoe programmnoe obespechenie kontrollera upravleniya ustroystva bystroj zaryadki akkumulyatora elektromobilya po standartu CHADEMO* [The Built-In Software of the Controller for Controlling the Fast Charging Device of the Electric Vehicle Battery on CHADEMO Standards]. Certificate of State Registration of a Computer Program No. RU 2021618552, 2021. EDN: UZSZXW. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 17.05.2024; одобрена после рецензирования 24.05.2024; принята к публикации 31.05.2024.*

*The article was submitted 17.05.2024; approved after reviewing 24.05.2024; accepted for publication 31.05.2024*

Научная статья

УДК 681.2

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-2-76-88

## РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ВОДОГАЗОВОЙ СМЕСИ

*Андрей Николаевич Китабов**Andrei N. Kitabov*

кандидат технических наук,  
главный специалист отдела новых технологий добычи нефти и газа,  
ООО «РН-БашНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия

*Артём Викторович Иванов**Artem V. Ivanov*

заместитель начальника отдела новых технологий добычи нефти и газа,  
ООО «РН-БашНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия

*Михаил Николаевич Ткаченко**Mihail N. Tkachenko*

главный специалист отдела новых технологий добычи нефти и газа,  
ООО «РН-БашНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия

*Урал Маратович Абуталипов**Ural M. Abutalipov*

кандидат технических наук,  
начальник отдела новых технологий добычи нефти и газа,  
ООО «РН-БашНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия

### Актуальность

Одной из новейших и перспективных технологий увеличения коэффициента вытеснения нефти является закачка в пласт водогазовой смеси (ВГС) через двухтрубную систему поддержания пластового давления, через сеть нагнетательных скважин (SWAG-закачка).

Для получения эффекта от реализации технологии SWAG-закачки необходимо одновременное выполнение комплекса условий, ключевым из которых является поддержание стабильной мелкодисперсной структуры ВГС на выходе устройства смешения при транспортировке ее в нагнетательную скважину. Однако условия образования на выходе устройства смешения стабильной мелкоди-

### Ключевые слова

информационно-измерительная система, идентификация, режим течения, водогазовая смесь, функциональная модель, структурная схема, структурно-функциональная схема

сперсной структуры лежат в узком диапазоне технологических параметров его работы, в связи с чем возникает задача непрерывного контроля качества полученной смеси при транспортировке ее в пласт в режиме реального времени, что в свою очередь требует дополнения набора средств контроля параметров закачки прибором, устройством или системой, способной определять режим течения ВГС на выходе из устройства смешения.

#### **Цель исследования**

Целью проведенной работы является разработка информационно-измерительной системы идентификации режимов течения ВГС при закачке ее в пласт через сеть нагнетательных скважин для повышения эффективности управления процессом поддержания пластового давления за счет достоверной информации о режиме течения водогазовой смеси в режиме реального времени.

#### **Методы исследования**

Разработка функциональных моделей велась на основе методологии SADT (Структурный анализ и техника проектирования), с использованием стандарта функционального моделирования систем («IDEF0»). Разработка и обоснование структурных и структурно-функциональных схем проводилась на основе теории информационных систем, теоретических основ электротехники и проектирования электронных устройств.

#### **Результаты**

Представлен один из возможных подходов к формализации, а также разработана функциональная модель процесса идентификации режимов течения ВГС с использованием IDEF0-методологии. Определены место и роль системы измерения параметров ВГС в задаче идентификации режимов течения ВГС, а также сформированы основные требования к проектированию информационно-измерительной системы идентификации режимов течения ВГС, на основе которых разработан один из вариантов структурной схемы информационно-измерительной системы идентификации режимов течения ВГС. Осуществлен подбор элементной базы аппаратной части устройства определения параметров ВГС и подсистемы приема, преобразования, обработки и отображения информации как составляющих информационно-измерительной системы идентификации режимов течения ВГС.

**Для цитирования:** Китабов А. Н., Иванов А. В., Ткаченко М. Н., Абуталипов У. М. Разработка информационно-измерительной системы идентификации режимов течения водогазовой смеси // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 2. Т. 20. С. 76-88. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-76-88>.

Original article

## **DEVELOPMENT OF AN INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR IDENTIFYING FLOW MODES OF A WATER-GAS MIXTURE**

#### **Relevance**

One of the newest and most promising technologies for increasing oil displacement efficiency is the injection of a water-gas mixture into the reservoir through a two-pipe system for maintaining reservoir pressure, through a network of injection wells (SWAG-injection).

To obtain the effect of implementing the SWAG-injection technology, it is necessary to simultaneously fulfill a set of conditions, the key of which is maintaining a stable finely dispersed structure of the water-gas mixture

#### **Keywords**

information-measuring system, identification, flow regime, water-gas mixture, functional model, structural diagram, structural and functional diagram

at the outlet of the mixing device when transporting it to the injection well. However, the conditions for the formation of a stable fine structure at the output of the mixing device lie in a narrow range of technological parameters of its operation, which raises the problem of continuous quality control of the resulting mixture when transporting it into the reservoir in real time, which in turn requires the addition of a set of parameters monitoring tools injection by a device, equipment or system capable to determine the flow regime of water-gas mixture at the outlet of the mixing device.

#### **Aim of research**

Aim of research is to develop an information-measuring system for identifying the flow regimes of water-gas mixtures when pumping them into the reservoir through a network of injection wells, to improve the efficiency of managing the process of maintaining reservoir pressure basing on reliable information about the flow regime of the water-gas mixture in real time.

#### **Research methods**

The development of functional models was carried out on the basis of the SADT (Structural Analysis and Design Technique) methodology, using the standard for functional modeling of systems («IDEF0»). The development and justification of structural and structural-functional diagrams was carried out on the basis of the theory of information systems, the theoretical foundations of electrical engineering and the design of electronic devices.

#### **Results**

One of the possible approaches to formalization is presented, and a functional model of the process of identifying water-gas mixture flow regimes using the IDEF0 methodology is developed. The place and role of the system for measuring the parameters of water-gas mixture in the problem of identifying flow regimes of water-gas mixture has been determined, and the basic requirements for the design of an information-measuring system for identifying flow regimes of water-gas mixture have been formed, on the basis of which one of the variants of the block diagram of the information-measuring system for identifying flow regimes of water-gas mixture has been developed. The selection of the hardware components of the device for determining the parameters of the hydrocarbons and the subsystem for receiving, converting, processing and displaying information as components of the information-measuring system for identifying the flow regimes of the hydrocarbons has been carried out.

**For citation:** Kitabov A. N., Ivanov A. V., Tkachenko M. N., Abutalipov U. M. Razrabotka informatsionno-izmeritel'noi sistemy identifikatsii rezhimov techeniya vodogazovoi smesi [Development of an Information-Measuring System for Identifying Flow Modes of a Water-Gas Mixture]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 2, Vol. 20, pp. 76-88 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-76-88>.

#### **Введение**

В настоящее время проводятся многочисленные исследования и разработки, а также активное внедрение новейших технологий, способствующих увеличению коэффициента вытеснения нефти. Одной из таких технологий является одновременная закачка воды и газа в пласт через сеть нагнетательных скважин (SWAG-закачка), которая

может быть реализована как двухтрубная система поддержания пластового давления [1].

Для внедрения данной технологии необходимо проведение большого количества исследований, оценки принципиальной применимости в рамках конкретного месторождения, комплекса сложных геологических и геолого-технических расчетов, разработки

специальных технических решений, а также системы контроля и управления параметрами закачки воды и газа. Ключевым элементом данной технологии является устройство смешения воды и углеводородов (УСВУ), обеспечивающее смешение потоков воды и газа с одинаковыми давлениями и образование на выходе смеси с однородной мелкодисперсной структурой [2, 3].

Анализ данных исследований показал, что наиболее распространенными режимами являются: расслоенный (равномерное течение компонентов смеси в соответствии с их плотностями), пробковый (жидкостные пробки заполняют все поперечное сечение трубы и разделены участками, состоящими из отдельно движущихся газовых и жидкостных потоков), кольцевой (жидкость движется вдоль стенок трубы, высокоскоростной поток газа насыщенный капельками жидкости образует ядро течения) и дисперсно-пузырьковый (газовая фаза в виде мелких пузырьков равномерно распределена в непрерывной жидкой фазе, обе фазы перемещаются с одной скоростью) режимы течения. Стоит отметить, что для получения эффекта от реализации технологии SWAG-закачки необходимо одновременное выполнение комплекса условий, ключевым из которых является поддержание стабильной мелкодисперсной структуры водогазовой смеси (ВГС) на выходе устройства смешения при транспортировке ее в нагнетательную скважину. Однако условия образования на выходе устройства смешения стабильной мелкодисперсной структуры лежат в узком диапазоне технологических параметров его работы, в связи с чем возникает задача непрерывного контроля качества полученной смеси при транспортировке ее в пласт в режиме реального времени, что в свою очередь требует дополнения набора средств контроля параметров закачки прибором, устройством или системой, способной идентифицировать режим течения ВГС на выходе из устройства смешения [1].

Для увеличения достоверности информации о режимах течения ВГС необходимо учитывать влияние всех факторов, что подразумевает разработку новых информаци-

онно-измерительных систем для идентификации режимов течения ВГС.

Создание такой системы представляет собой сложный процесс, который требует выполнения следующих этапов: определение цели системы; разделение системы на основные части; разработка проекта, включающая объединение частей в единое целое; тестирование и проверка работы системы; запуск системы; использование системы согласно назначению [4].

В процессе решения данных вопросов используется методология SADT (Structured Analysis and Design Technique), что означает «Структурный анализ и техника проектирования». Этот подход включает в себя набор методов, принципов и процессов, которые помогают создавать структуру сложной системы в виде модели. Эта модель состоит из иерархии связанных диаграмм, которые организованы в форме дерева, где самая верхняя диаграмма наиболее общая, а самые нижние — наиболее детализированные.

Методология SADT задач позволяет определить основные функции системы, а также определить взаимосвязь между ее частями [5–7]. На основе SADT разработан стандарт функционального моделирования систем («IDEF0»). Рассмотрим основные этапы разработки информационно-измерительной системы идентификации режимов течения ВГС на основе IDEF0-методологии.

#### **Функциональная модель процесса идентификации режимов течения ВГС на основе IDEF0-методологии**

Модель состоит из набора диаграмм с возрастающим уровнем детализации при декомпозиции блоков модели. На верхнем уровне (рисунок 1) представлена предметная область, связанная с определением режимов движения водогазовой смеси.

На рисунке 1 представлен блок «Идентификация режима течения ВГС», на вход которого поступает объект исследования «ВГС», априорная информация и методы испытаний. В результате выполнения этой функции на выходе формируются результаты идентификации режима течения.



Стрелки снизу представляют механизмы реализации функции, а стрелки сверху — ограничения. Механизмы включают информационную систему, оборудование и персонал. Ограничениями являются нормативные документы, требования и рекомендации предприятия, а также документация на оборудование.

Контекстная диаграмма детализируется с учётом задач, которые будут выполняться

в процессе определения режимов течения ВГС (рисунок 2). Декомпозиция включает следующие блоки: анализ технологического режима SWAG-закачки (1), измерение параметров режима закачки ВГС (2), обработка результатов измерений (3), передача информации по уровням системы закачки (4) и формирование управляющего воздействия (5).



Рисунок 1. Контекстная диаграмма функциональной модели

Figure 1. Functional model context diagram

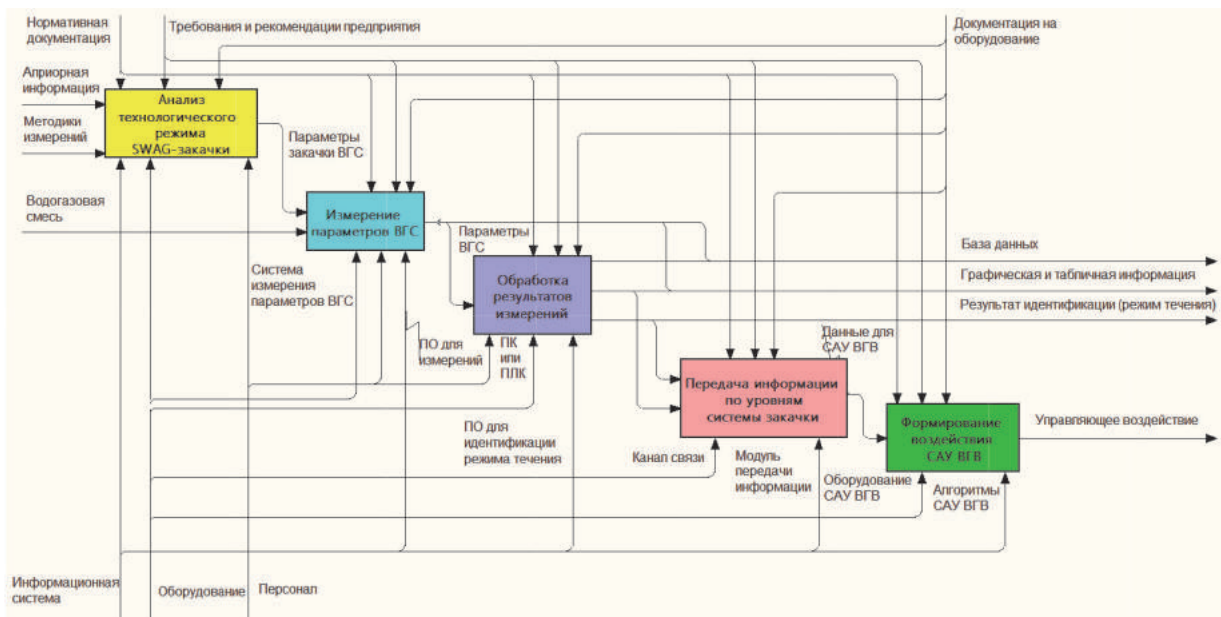


Рисунок 2. Функциональная модель процесса идентификации режима течения ВГВ

Figure 2. Functional model of the process of identifying the flow regime of a water-gas mixture

Блок «анализ технологического режима SWAG-закачки» анализирует весь комплекс параметров закачки водогазовой смеси (давления, температуры и расходы в линиях подачи воды и газа, а также на линии водогазовой смеси), на основе которых можно сделать предварительное заключение о характере режима течения ВГС на выходе устройства смешения.

Блок «Измерение параметров ВГС» — ключевой этап процесса, который предполагает получение количественных данных о значимых параметрах, напрямую связанных с режимом течения ВГС и позволяющих его идентифицировать.

Блок «Обработка результатов измерений» содержит необходимые алгоритмы обработки данных, полученных на предыдущей стадии, с последующим анализом всех измеренных параметров. Во время этого этапа происходит непосредственное определение режима течения ВГС.

Вышеупомянутые блоки функциональной схемы имеют решающее значение для определения режима потока. Следующие блоки отвечают за передачу информации в другие подсистемы управления SWAG-закачкой и формирования управляющих воздействий, что в основном касается более высоких уровней управления закачкой ВГС.

Анализ разработанных функциональных моделей позволяет определить оборудование и прочее техническое оснащение для реализации идентификации режима течения ВГС:

1. система измерения параметров ВГС как аппаратная часть информационно-измерительной системы идентификации режимов течения ВГС [8];
2. оборудование для обеспечения связи (беспроводные и проводные каналы связи);
3. программное обеспечение различного назначения (коммуникационные программы, программы предварительной обработки сигналов системы, программное обеспечение для определения режима течения по измеряемым параметрам ВГС);
4. оборудование для получения ВГС и закачки ее в скважины [2, 3].

В настоящее время реализованы следующие методы контроля режимов течения:

анализ материалов фото- и видеофиксации потока смеси в трубопроводе через прозрачные элементы, лабораторные исследования проб потока смеси, также для решения данной задачи могут быть адаптированы распределённые расходомеры и влагомеры. Недостатком первого метода является низкое рабочее давление вследствие монтажа прозрачных элементов трубопровода, а второго — отсутствие возможности идентификации режимов течения ВГС в режиме реального времени, установка распределённых расходомеров и влагомеров является функционально избыточным и экономически нецелесообразным, и кроме того требует их доработки для реализации функции идентификации режимов течения [1, 8]. Поэтому разработка и апробация новой концепции идентификации режимов течения с возможностью отслеживания параметров потока смеси и идентификации режима течения в режиме реального времени является актуальной задачей, решение которой позволит обеспечить стабильную закачку однородной мелкодисперсной ВГС в пласт.

Таким образом, описание процесса идентификации режима течения ВГС с применением IDEF0-методологии позволяет сделать вывод о том, что система измерения параметров ВГС в составе комплекса оборудования по организации закачки ВГС является одним из ключевых элементов с точки зрения обеспечения качества ВГС, которое нуждается в разработке новой структуры для устранения указанных выше недостатков.

### **Разработка системы измерения параметров ВГС для идентификации режимов течения**

Отсутствие возможности контроля режима течения ВГС в реальном времени с использованием существующих технологий, указанных в предыдущем разделе, требует разработки новых подходов к решению данного вопроса, что подразумевает выработку новой концепции построения информационно-измерительной системы идентификации режимов течения ВГС.

Предлагается концепция информационно-измерительной системы идентификации режимов течения ВГС в режиме реаль-

ного времени за счет применения первичных преобразователей, расположенных непосредственно в потоке движущейся смеси. При этом число первичных преобразователей должно давать адекватную оценку режима течения ВГС по всему сечению трубопровода, а, следовательно, должно зависеть от его типоразмера. Сигнал с первичных преобразователей должен однозначно идентифицировать воду, газ и водогазовую смесь. Также система должна обеспечивать измерение и предварительную обработку измерительной информации в непосредственной близости от первичных преобразователей, то есть первичные преобразователи и система предварительной обработки информации должны быть выполнены в виде единого устройства.

Далее информация должна передаваться посредством канала связи на следующий уровень иерархии системы управления закачкой ВГС, где происходит более углубленный анализ полученной измерительной информации с первичных преобразователей и непосредственно идентификация режима течения ВГС.

Выработка управляющих воздействий после получения информации о режиме

течения ВГС находится за периметром функционала системы идентификации режимов течения ВГС.

Исходя из функционального назначения структурная схема устройства для измерения параметров ВГС должна иметь следующий состав (рисунок 3): первичные преобразователи (ПП), нормирующие преобразователи сигналов первичных преобразователей (НП), мультиплексор (MUX), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), микропроцессор (МПК), элементы канала связи (КС), схема питания (СП).

Первичные преобразователи выполняют измерение информативного параметра, на основании численного значения которого можно сделать вывод о режиме течения ВГС. Затем эти сигналы поступают на АЦП, а далее на микроконтроллер, который реализует предобработку и сохранение результатов измерений. Затем информация передается по каналу связи на верхний уровень — подсистему приема, преобразования, обработки и отображения информации, итогом работы которой является формирование и отображение результата идентификации режима течения ВГС по сечению трубопровода.

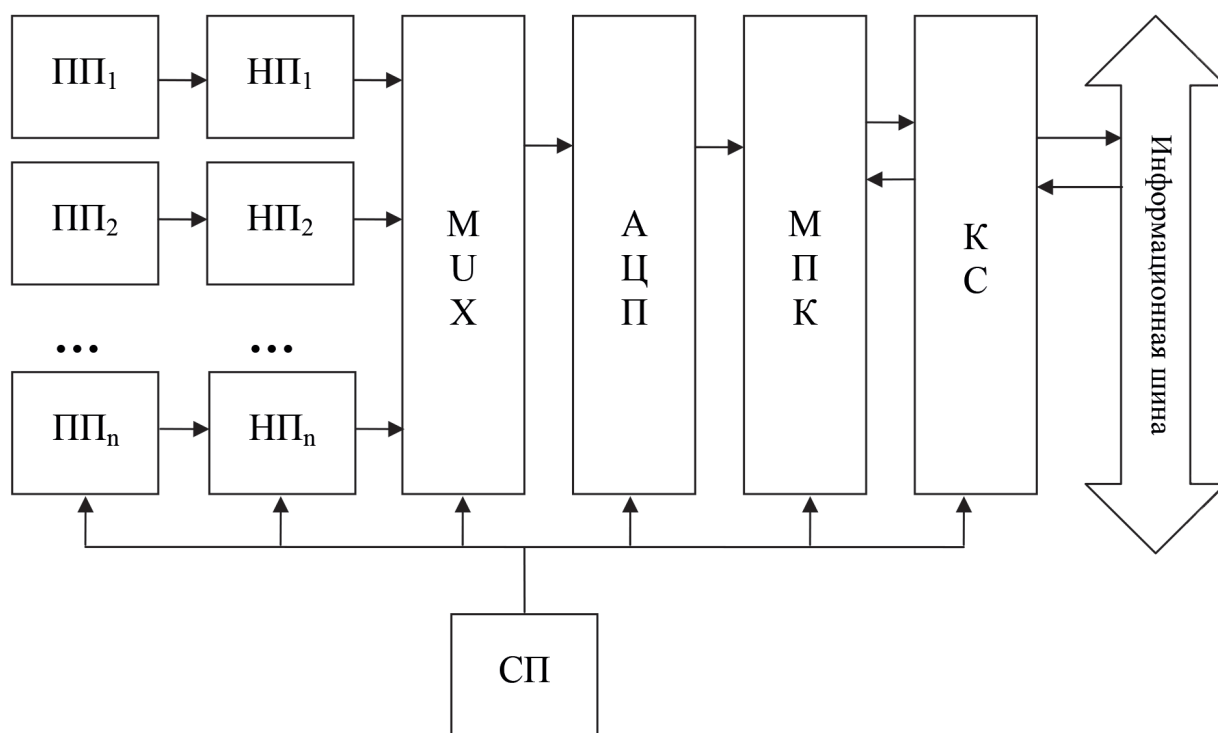
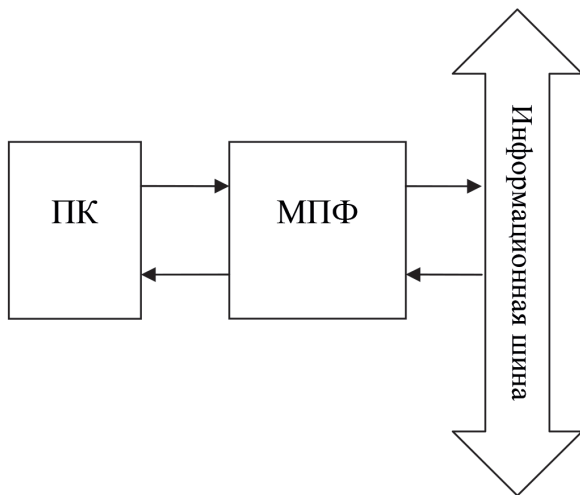


Рисунок 3. Структурная схема устройства для измерения параметров ВГС

Figure 3. Block diagram of a device for measuring parameters of a water-gas mixture

При этом необходимо учитывать согласование информации, поступающей с устройства измерения параметров ВГС, формат которой определяется каналом связи и стандартными портами обмена информации. Таким образом, в состав подсистемы приема, преобразования, обработки и отображения информации (рисунок 4) входят модуль преобразования форматов данных (МПФ) и компьютер (ПК).



**Рисунок 4.** Структурная схема подсистемы приема, преобразования, обработки и отображения информации

**Figure 4.** Block diagram of the subsystem for receiving, converting, processing and displaying information

Следующими этапами решения задачи разработки структуры системы измерения параметров ВГС являются:

- определение физического принципа работы первичных преобразователей для идентификации режимов течения ВГС;
- определение требуемого числа и расположения первичных преобразователей для идентификации режимов течения ВГС;

**Таблица 1.** Значения различных параметров для воды и газа

**Table 1.** Values of various parameters for water and gas

Физический параметр	Вода пластовая	Газ
Плотность при н.у., кг/м <sup>3</sup>	1050–1200	0,7
Электропроводность, См/м	5	0
Диэлектрическая проницаемость	50–80	1,0
Скорость звука, м/с	1300–1350	≈ 430
Показатель преломления в оптическом диапазоне	1,33/1,33	≈ 1,0

— выбор элементной базы аппаратной части устройства определения параметров ВГС и подсистемы приема, преобразования, обработки и отображения информации.

На первом этапе необходимо определить физический принцип работы первичных преобразователей для идентификации режимов течения ВГС. Основным критерием выбора принципа работы первичного преобразователя являлось определение физического параметра смеси, численное значение которого имеет существенное различие для ее компонентов (воды и газа). В процессе выбора рассматривались параметры плотности, электропроводности, диэлектрической проницаемости и др. Значения перечисленных параметров для воды и газа (метан) представлены в таблице 1.

Выбор параметра проводился с учетом реализуемости схемы измерения и целесообразности её применения на месторождениях. Лабораторные исследования макетов первичных преобразователей позволили определить измерение электропроводности как наиболее оптимальный физический принцип для реализации системы контроля параметров ВГС, поскольку значения этого параметра для воды и газа существенно различаются [1, 8].

На следующем этапе необходимо определить расположение и требуемое число первичных преобразователей. Основным требованием в данном случае является определение режима течения ВГС по всему сечению трубопровода. Очевидно, что наиболее оптимальным расположением первичных преобразователей является равномерное равноудаленное их расположение по внутреннему сечению трубопровода. Количество первичных преобразователей

выбирается в соответствии с типоразмером трубопровода. В качестве примера рассмотрим вариант для трубопровода с внутренним диаметром 75 мм. Ниже на рисунке 5 представлены возможные варианты с разным числом первичных преобразователей.

Верхний и нижний первичные преобразователи необходимы для определения типа среды в крайних точках (рисунок 5, *a*). В случае установки четырёх первичных преобразователей (рисунок 5, *b*) возможно определение режима течения только в крайних точках и в одном сечении посередине трубопровода, что не может дать представление о режиме течения потока ВГС. Установка восьми первичных преобразователей (рисунок 5, *c*) позволяет определить режим течения уже в трех сечениях, чего также недостаточно для определения режима течения ВГС по всему сечению трубопровода, поскольку возможна идентификация с шагом от 10–40 % площади. Рассмотрим варианты с установкой двенадцати (рисунок 5, *d*) и шестнадцати (рисунок 5, *e*) первичных преобразователей. Для случая с двенадцатью первичными преобразователями определение параметров электропроводности происходит уже в пяти поперечных сечениях, что позволяет идентифи-

цировать режим сечения с шагом 5–30 % по площади. Для случая с шестнадцатью первичными преобразователями определение происходит уже в семи поперечных сечениях, что позволяет идентифицировать режим сечения с шагом 1–24 % по площади (площадь крайних верхней и нижней площадей соответствует 1 %). Опыт практического исследования режимов течения водогазовой смеси показывает, что в подавляющем большинстве случаев в процессе закачки ВГС в скважину происходит не более двух изменений режима течения по сечению трубопровода. Поэтому наиболее оптимальным вариантом является установка двенадцати первичных преобразователей, что позволяет с высокой точностью определить режим течения ВГС по всему сечению трубопровода.

Далее необходимо осуществить подбор элементной базы аппаратной части устройства определения параметров ВГС и подсистемы приема, преобразования, обработки и отображения информации.

В настоящее время в качестве первичных преобразователей электропроводности используются стрелневые элементы, которые помещаются в трубопровод, однако подобный вид и расположение не позволяют

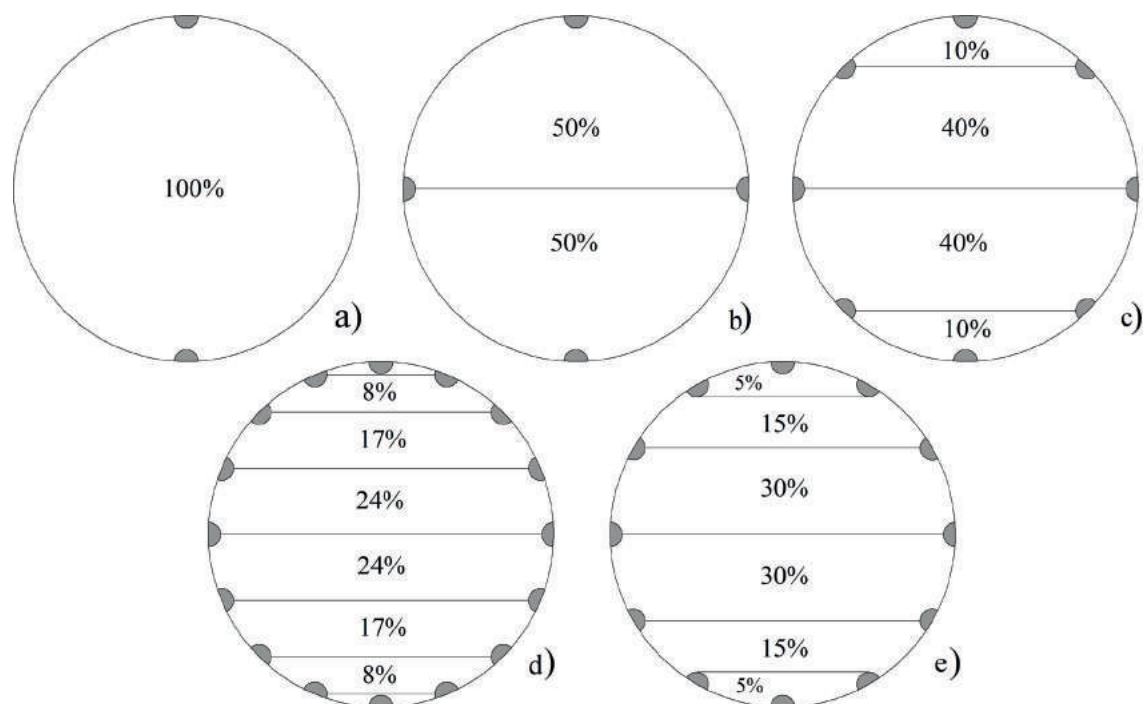
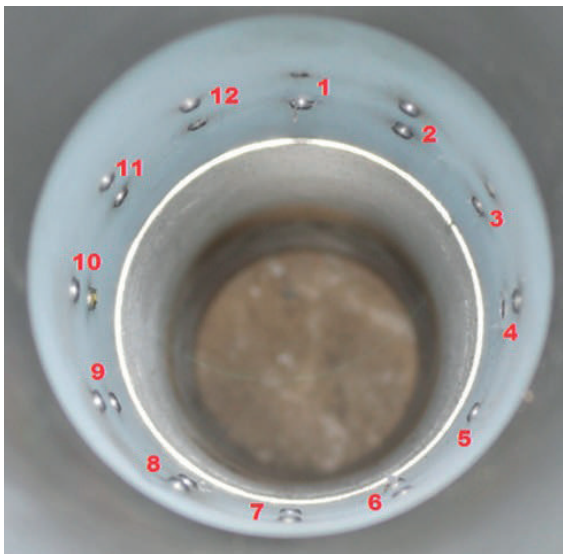


Рисунок 5. Возможные варианты числа и расположения первичных преобразователей

Figure 5. Possible options for the number and location of primary converters

решить задачу определения структуры потока, а также вносят искажения в определяемую структуру потока. Как было отмечено выше, для идентификации режима течения необходимо получать информацию с нескольких точек по сечению трубопровода. Поэтому для решения задачи разработки системы идентификации режимов течения ВГС необходимо использовать первичные преобразователи, которые не искажают определяемую структуру потока и имеют малые габаритные размеры. С учетом указанных ограничений в качестве первичных преобразователей предлагается использовать совокупность измерительных преобразователей электропроводности, расположенных на равных расстояниях друг от друга по периметру трубопровода. Каждый измерительный преобразователь состоит из двух электродов, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга. Схема расположения измерительных преобразователей в полости прибора представлена на рисунке 6.

Нормирующие преобразователи предназначены для преобразования сигнала с первичного преобразователя в форму, подходящую для подачи на АЦП. В данном случае, когда выходным параметром первичных преобразователей является электропроводность, наиболее оптимальным решением



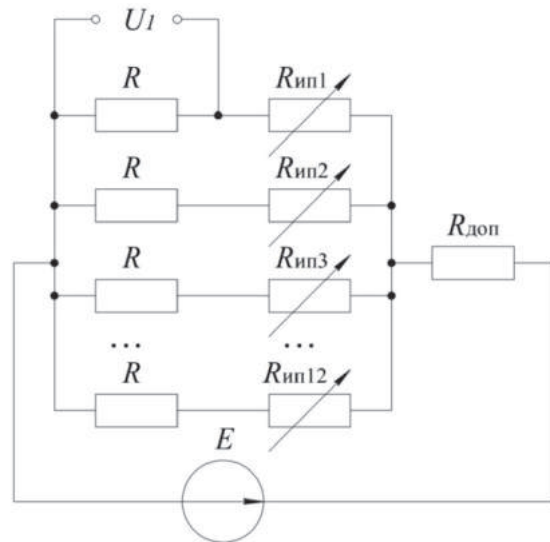
**Рисунок 6.** Схема расположения измерительных преобразователей (электродов) в полости прибора

**Figure 6.** Layout of measuring transducers (electrodes) in the device cavity

является в качестве нормирующего преобразователя выбрать делитель напряжения. Схема делителей напряжения для всех двенадцати первичных преобразователей представлена на рисунке 7. Одним из плеч делителя будет сопротивление (электропроводность) между электродами первичного преобразователя ( $R_{ин1} - R_{ин12}$ ), в другом плече делителя сопротивление ( $R$ ) постоянно, а дополнительное сопротивление ( $R_{доп}$ ) необходимо для оптимизации параметров электрической цепи с учетом требуемых значений параметров электрической цепи.

Выходным сигналом, подаваемым на вход АЦП, будет являться напряжение с плеча делителя с постоянным сопротивлением ( $U_1$  для линии первого измерительного преобразователя). Таким образом, максимальное напряжение будет соответствовать минимальному сопротивлению переменного плеча делителя напряжения, то есть фактически соответствует нахождению измерительного преобразователя в абсолютном проводнике ( $R_{ин1} = R_{ин2} = \dots = R_{ин12} = 0$ ). Для определения номинального напряжения источника питания ( $E$ ) запишем уравнение делителя напряжения для описанного случая:

$$E = U_1 \frac{R_{12} + R_{доп}}{\frac{R}{12}}$$



**Рисунок 7.** Схема делителей напряжения для 12 измерительных преобразователей

**Figure 7.** Voltage divider circuit for 12 measuring converters

Максимальное значение напряжения  $U_1$  должно соответствовать величине опорного напряжения АЦП. Предположив, что  $U_1 = 2,56$  В (одно из распространенных значений опорного напряжения АЦП), и при условии равенства  $R/12 = R_{\text{доп}}$  можно определить величину источника питания схемы делителя напряжения,  $E = 5,12$  В. Значения величин сопротивлений  $R$  и  $R_{\text{доп}}$  определяются из обеспечения условий искробезопасной цепи, то есть когда ток не превышает значений  $I = 30$  мА, с учетом чего номиналы резисторов делителя напряжения могут быть выбраны исходя из неравенства:

$$\frac{R}{12} + R_{\text{доп}} > \frac{E}{I},$$

$$\frac{R}{12} + R_{\text{доп}} > 170 \text{ Ом.}$$

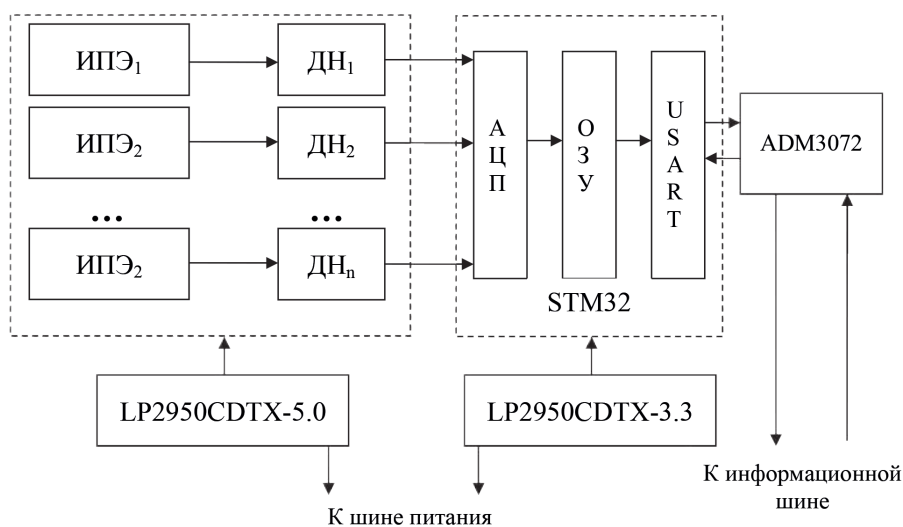
В качестве элементов мультиплексора, АЦП и микропроцессора предлагается использовать микроконтроллер со встроенным многоканальным АЦП и наличием интерфейса, который можно использовать как составляющую канала связи для трансляции информации на подсистему приема, преобразования, обработки и отображения информации. Подобные микроконтроллеры выпускает большое количество фирм, среди которых Megawin, Atmel, Holtek, STMicroelectronics и др. В качестве микропроцессорной части рассматриваемой системы предлагается использовать микроконтроллер из семейства STM32

от STMicroelectronics. Данный микроконтроллер помимо вычислительных возможностей включает в себя 12-битный многоканальный АЦП, а также интерфейс USART для решения задач преобразования и организации передачи информации.

Для передачи информации на значительные расстояния целесообразнее всего использовать интерфейс RS485, для этого к выходу модуля USART необходимо подключить микросхему преобразования интерфейса, например ADM3072 фирмы Analog Devices.

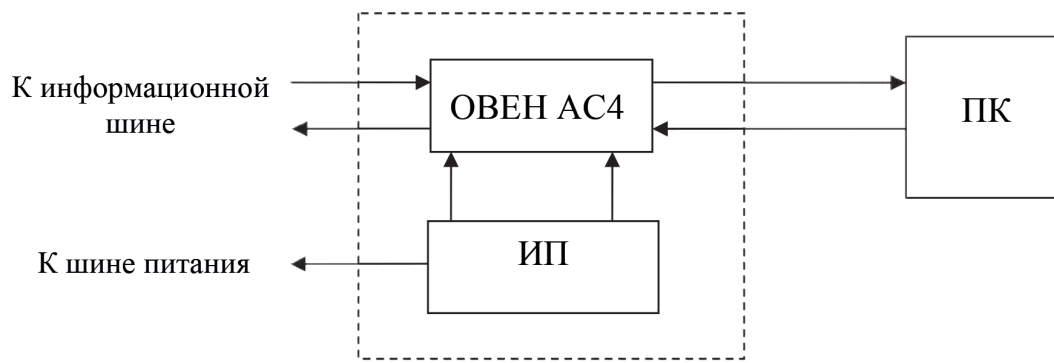
В качестве элементов питания схемы делителя напряжения и основной схемы могут быть выбраны практически любые линейные преобразователи напряжения с требуемыми уровнями выходного сигнала, например для схемы делителя напряжения выберем LP2950CDTX-5.0, а для основной схемы — LP2950CDTX-3.3 от Texas Instruments. Полученная структурно-функциональная схема системы измерения параметров ВГС представлена на рисунке 8.

Подсистема приема, преобразования и обработки измерительной информации (рисунок 9) состоит из: автоматического преобразователя интерфейсов USB/RS-485, например «ОВЕН АС4» с источником питания (ИП), персонального или промышленного компьютера (ПК).



**Рисунок 8.** Структурно-функциональная схема системы измерения параметров (электропроводности) ВГС

**Figure 8.** Structural and functional diagram of a system for measuring parameters (electrical conductivity) of a water-gas mixture



**Рисунок 9.** Структурно-функциональная схема подсистемы приема, преобразования и обработки измерительной информации

**Figure 9.** Structural and functional diagram of the subsystem for receiving, converting, and processing measurement information

Сигналы с первичных преобразователей передаются последовательно на вход АЦП микроконтроллера, где они преобразуются и записываются в регистрах оперативного запоминающего устройства. Затем преобразованные данные проходят через приемопередатчик USART и микросхему преобразования интерфейса по информационной шине в подсистему приёма, преобразования, обработки и анализа измерительной информации, где происходят углубленная обработка информации, формирование результата идентификации и отображение результата оператору. Кроме того, с выхода данной подсистемы информация может поступать на вход системы автоматического управления закачкой водогазовой смеси для корректировки соотношения и объемов закачиваемых компонентов смеси.

### Выводы

1. Представлен подход к формализации, а также разработана функциональная модель процесса идентификации режимов течения ВГС с использованием IDEF0-методологии.

### Список источников

1. Sergeev E., Vinogradov P., Abutalipov U., Ivanov A., Kitabov A., Esipov P. et al. Experimental Research of Simultaneous Water and Gas Injection Technology into Injection Wells Using Mixing Devices // SPE Russian Petroleum Technology Conference. URL: <https://doi.org/10.2118/187734-MS>.

2. Анализ IDEF0-диаграмм позволил определить место и роль системы измерения параметров ВГС в задаче идентификации режимов течения ВГС, а также сформировать основные требования к проектированию информационно-измерительной системы идентификации режимов течения ВГС.

3. На основе сформулированных требований была выполнена разработка одного из вариантов структурной схемы информационно-измерительной системы идентификации режимов течения ВГС.

4. Осуществлен подбор элементной базы аппаратной части устройства определения параметров ВГС и подсистемы приема, преобразования, обработки и отображения информации как составляющих информационно-измерительной системы идентификации режимов течения ВГС.

5. Разработанная информационно-измерительная система позволяет повысить эффективность управления процессом поддержания пластового давления за счет получения достоверной информации о режиме течения ВГС в режиме реального времени.

2. Пат. 169499 РФ, МПК F 04 F. Смеситель воды и газа / М.Е. Ставский, С.Е. Здольник, А.Р. Латыпов, Е.И. Сергеев, Н.И. Магомедшерифов, В.М. Нестеренко, В.И. Савичев, Ю.А. Церковский, У.М. Абуталипов, А.Н. Kitabov, А.В. Иванов. 2016132136, Заявлено 04.08.2016; Опубл. 21.03.2017. Бюл. 9. EDN: RVAZEI.



3. Пат. 2659444 РФ, МПК Е 21 В. Способ подготовки и закачки мелкодисперсной водогазовой смеси в нагнетательную скважину и устройство для получения этой смеси / М.Е. Ставский, Ю.С. Красневский, С.Е. Здольник, А.Р. Латыпов, Е.И. Сергеев, Н.И. Магомедшерифов, В.М. Нестеренко, А.И. Федоров, В.И. Савичев, Ю.А. Церковский, У.М. Абуталипов, А.В. Иванов, С.В. Старков. 2015140245, Заявлено 22.09.2015; Оpubл. 02.07.2018. Бюл. 19.

4. Ефанов В.Н., Китабов А.Н. Синтез структуры системы диагностики технического состояния погружного электрооборудования на основе IDEF-технологии // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9 № 4. С. 69–75. EDN: RPFQID.

5. Вендров А.М. CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем. М.: Финансы и статистика, 1998. 176 с. ISBN 5-279-01979-8.

6. Суркова Н.Е., Остроух А.В. Методология структурного проектирования информационных систем. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2014. 188 с. ISBN 978-5-906314-16-1.

7. Черемных С.В., Семенов И.О., Ручкин В.С. Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии: практикум. М.: Финансы и статистика, 2005. 192 с. ISBN 5-279-02433-3.

8. Пат. 2619797 РФ, МПК G 01 N. Способ и устройство для определения режима течения водогазовой смеси / М.Е. Ставский, С.Е. Здольник, Н.И. Магомедшерифов, А.Р. Латыпов, Е.И. Сергеев, У.М. Абуталипов, А.В. Иванов, А.Н. Китабов. 2016110784, Заявлено 24.03.2016; Оpubл. 18.05.2017. Бюл. 14.

## References

1. Sergeev E., Vinogradov R., Abutalipov U., Ivanov A., Kitabov A., Esipov P. et al. Experimental Research of Simultaneous Water and Gas Injection Technology into Injection Wells Using Mixing Devices. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. URL: <https://doi.org/10.2118/187734-MS>.

2. Stavskii M.E., Zdol'nik S.E., Latypov A.R., Sergeev E.I., Magomedsherifov N.I., Nesterenko V.M., Savichev V.I., Tserkovskii Yu.A., Abutalipov U.M., Kitabov A.N., Ivanov A.V. *Smesitel'*

*vody i gaza* [Water and Gas Mixer]. Patent RF, No. 169499, 2017. EDN: RVAZEI. [in Russian].

3. Stavskii M.E., Krasnevskii Yu.S., Zdol'nik S.E., Latypov A.R., Sergeev E.I., Magomedsherifov N.I., Nesterenko V.M., Fedorov A.I., Savichev V.I., Tserkovskii Yu.A., Abutalipov U.M., Ivanov A.V., Starkov S.V. *Sposob podgotovki i zakachki melko-dispersnoi vodogazovoi smesi v nagnetatel'nyu skvazhinu i ustroistvo dlya polucheniya etoi smesi* [A Method for Preparing and Pumping a Fine Water-Gas Mixture into an Injection Well and a Device for Obtaining This Mixture]. Patent RF, No. 2659444. 2018. [in Russian].

4. Efanov V.N., Kitabov A.N. Sintez struktury sistemy diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya pogruzhnogo elektrooborudovaniya na osnove IDEF-tekhnologii [Synthesis of the Structure of Finding the Technical State Electric Immersion IDEF-Based Technology]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2013, Vol. 9, No. 4, pp. 69–75. EDN: RPFQID. [in Russian].

5. Vendrov A.M. *CASE-tekhnologii. Sovremennye metody i sredstva proektirovaniya informatsionnykh sistem* [CASE-Technologies. Modern Methods and Tools for Designing Information Systems]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1998. 176 p. ISBN 5-279-01979-8. [in Russian].

6. Surkova N.E., Ostroukh A.V. *Metodologiya strukturnogo proektirovaniya informatsionnykh sistem* [Methodology for Structural Design of Information Systems]. Krasnoyarsk, Nauchno-innovatsionnyi tsentr, 2014. 188 p. ISBN 978-5-906314-16-1. [in Russian].

7. Cheremnykh S.V., Semenov I.O., Ruchkin V.S. Modelirovanie i analiz sistem. IDEF-tekhnologii: praktikum [Modeling and Analysis of Systems. IDEF Technologies: Workshop]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2005. 192 p. ISBN 5-279-02433-3. [in Russian].

8. Stavskii M.E., Zdol'nik S.E., Magomedsherifov N.I., Latypov A.R., Sergeev E.I., Abutalipov U.M., Ivanov A.V., Kitabov A.N. *Sposob i ustroistvo dlya opredeleniya rezhima techeniya vodogazovoi smesi* [Method and Device for Determining the Flow Regime of a Water-Gas Mixture]. Patent RF, No. 2619797, 2017. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 22.04.2024; одобрена после рецензирования 29.04.2024; принята к публикации 21.05.2024.*

*The article was submitted 22.04.2024; approved after reviewing 29.04.2024; accepted for publication 21.05.2024.*

Научная статья

УДК 621.3

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-2-89-102

## АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ШТАНГОВЫХ СКВАЖИННЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

*Андрей Николаевич Китабов***Andrei N. Kitabov***кандидат технических наук,**главный специалист отдела новых технологий добычи нефти и газа,**ООО «РН-БашНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия**Урал Маратович Абуталипов***Ural M. Abutalipov***кандидат технических наук,**начальник отдела новых технологий добычи нефти и газа,**ООО «РН-БашНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия**Данила Денисович Горбунов***Danila D. Gorbunov***старший специалист отдела новых технологий добычи нефти и газа,**ООО «РН-БашНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия**Марат Ильгизович Хакимьянов***Marat I. Khakimyanov***доктор технических наук, доцент,**заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий»,**Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия*

### Актуальность

Одним из направлений повышения эффективности процессов в нефтегазовой отрасли является оптимизация потребления электрической энергии на всех этапах производственной деятельности, причем основная доля затрат энергопотребления приходится на процессы, связанные с добычей нефти. В настоящее время для оценки и расчета уровня энергопотребления и удельного энергопотребления применяются полуэмпирические методики, характеризующиеся отсутствием комплексного подхода и низким значением точности. В связи с этим

### Ключевые слова

информационно-измерительная система, электроэнергия, штанговая скважинная насосная установка, коэффициент полезного действия, потери энергии, электродвигатель,

разработка алгоритмического и математического обеспечения для реализации информационно-измерительной системы определения энергопотребления штанговыми скважинными насосными установками является актуальной задачей.

#### **Цель исследования**

Целью работы является разработка алгоритмического и математического обеспечения информационно-измерительной системы определения энергопотребления для повышения точности фиксирования указанного параметра при эксплуатации скважин, оборудованных штанговыми скважинными насосными установками.

#### **Методы исследования**

Разработка алгоритмического и математического обеспечения проводилась с применением основ теоретической механики, теории машин и механизмов, теоретических основ электротехники, теории электрических машин и аппаратов, теории систем.

#### **Результаты**

Представлен кинематический анализ штанговой скважинной насосной установки как объекта потребления электроэнергии, на основе которого составлена схема последовательности передачи, преобразования и потери энергии в отдельных элементах и узлах установки. Проведен сравнительный анализ существующих методик расчета потребления электроэнергии, использующихся в современных информационно-измерительных системах определения энергопотребления штанговых скважинных насосных установок, который показал недопустимо высокий уровень вычислительной погрешности. Предложен один из вариантов математического и алгоритмического обеспечения рассматриваемой информационно-измерительной системы на основе анализа всех составляющих установки и проведения индивидуально-расчета уровня потерь, коэффициента полезного действия каждого узла и элемента установки с использованием максимального числа технологических параметров работы скважины и технических характеристик применяемого оборудования. Применение разработанного алгоритмического и математического обеспечения позволило снизить погрешность определения энергопотребления штанговой скважинной насосной установкой.

станок-качалка, редуктор, ременная передача, штанговая колонна

**Для цитирования:** Китабов А. Н., Абуталипов У. М., Горбунов Д. Д., Хакимьянов М. И. Алгоритмическое и математическое обеспечение информационно-измерительной системы определения энергопотребления штанговых скважинных насосных установок // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 2. Т. 20. С. 89-102. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-89-102>.

Original article

## **ALGORITHMIC AND MATHEMATICAL SUPPORT OF INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR DETERMINING ENERGY CONSUMPTION OF ROD WELL PUMPING UNITS**

#### **Relevance**

One of the directions for increasing the efficiency of processes in the oil and gas industry is to optimize the consumption of electrical energy at all stages of production activity, with the main share of energy consumption costs occurring in processes associated with oil production. Currently, to assess and calculate the level of energy consumption and specific energy consumption, semi-empirical methods are used, characterized by the lack of an integrated approach and low accuracy. In this regard, the development

#### **Keywords**

information-measuring system, electricity, sucker rod pumping unit, efficiency, energy losses, electric motor, pumping machine, gearbox, belt drive, rod column

of algorithmic and mathematical support for the implementation of an information-measuring system for determining the energy consumption of sucker rod pumping units is an urgent task.

#### **Aim of research**

The purpose of the work is to develop algorithmic and mathematical support for an information-measuring system for determining energy consumption to improve the accuracy of recording this parameter during the operation of wells equipped with sucker rod pumping units.

#### **Research methods**

The development of algorithmic and mathematical support was carried out using the fundamentals of theoretical mechanics, the theory of machines and mechanisms, the theoretical foundations of electrical engineering, the theory of electrical machines and devices, and systems theory.

#### **Results**

A kinematic analysis of a sucker rod pumping unit as an object consuming electricity is presented, on the basis of which a diagram of the sequence of transmission, conversion and loss of energy in individual elements and units of the installation is drawn up. A comparative analysis of existing methods for calculating electricity consumption, used in modern information-measuring systems for determining the energy consumption of sucker rod pumping units, was carried out, which showed an unacceptably high level of computational error. One of the options for mathematical and algorithmic support of the considered information-measuring system is proposed based on an analysis of all components of the installation and an individual calculation of the level of losses, the efficiency of each unit and element of the installation using the maximum number of technological parameters of the well and the technical characteristics of the equipment used. The use of the developed algorithmic and mathematical software made it possible to reduce the error in determining the energy consumption of a sucker rod pumping unit.

**For citation:** Kitabov A.N., Abutalipov U. M., Gorbunov D. D., Khakimyanov M. I. Algoritmicheskoe i matematicheskoe obespechenie informatsionno-izmeritel'noi sistemy opredeleniya energopotrebleniya shtangovykh skvazhinnykh nasosnykh ustanovok [Algorithmic and Mathematical Support of Information-Measuring System for Determining Energy Consumption of Rod Well Pumping Units]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 2, Vol. 20, pp. 89-102 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-89-102>.

#### **Введение**

Внедрение программ энергоэффективности в организациях нефтедобывающего комплекса привело к необходимости разработки методик определения удельного расхода электроэнергии и их интеграции в существующие информационно-измерительные системы (ИИС).

Несмотря на широкую распространенность в РФ установок электроцентробежных насосов (УЭЦН), существенная часть фонда оборудована штанговыми скважинными насосными установками (ШСНУ). Особенностью таких установок, с точки зрения аналитической оценки уровня энергопо-

требления, является большое число элементов оборудования в составе данной установки, что, очевидно, снижает точность результатов расчета энергопотребления.

Наличие корректного алгоритмического и математического обеспечения информационно-измерительной системы определения энергопотребления ШСНУ делает возможным проведение расчетов текущих и прогнозируемых уровней энергопотребления с высокой степенью достоверности. Это позволяет повысить точность при расчете себестоимости продукции, а также при прогнозировании оптимизационных мероприятий.

### Анализ ШСНУ как объекта потребления электроэнергии

На рисунке 1 представлено оборудование скважины, которая эксплуатируется ШСНУ с приводом от станка-качалки. Весь комплекс оборудования ШСНУ можно условно разделить на две части — наземную и погружную.

Основная задача наземного оборудования состоит в преобразовании электрической энергии из сети в возвратно-поступательные движения штанговой колонны. Схема преобразования выглядит следующим образом: электрическая энергия от системы питания, состоящей из комплексной трансформаторной подстанции (КТП) и станции управления (СУ), поступает к электродвигателю (ЭД) 1, где преобразуется в механическую энергию вращения ротора, после чего передается на ременную передачу 2 и затем к редуктору 3. От редуктора энергия передается четырехзвеннику, который состоит из кривошипа 4, противовеса 5 с грузами 6, шатуна 7, балансира 8 и головки 9, где энер-

гия преобразуется в возвратно-поступательное движение полированного штока 10, проходящего через сальниковый узел 11. Далее от полированного штока энергия передается подземному оборудованию скважины, а именно колонне насосных штанг 12, которая передает движение плунжерному насосу 13, который поднимает скважинную жидкость на поверхность (полезная работа).

Используя принцип декомпозиции объекта, можно представить процесс потребления электроэнергии ШСНУ как блок-схему, представленную на рисунке 2. Данная схема отражает последовательный процесс передачи энергии от элемента к элементу ШСНУ с приводом от станка-качалки.

Таким образом, для определения энергопотребления скважины, оборудованной ШСНУ с приводом от станка-качалки, требуется расчет потребления энергии (потерь) всех элементов насосной установки, в том числе и энергии, требуемой для подъема скважинной продукции на поверхность земли.

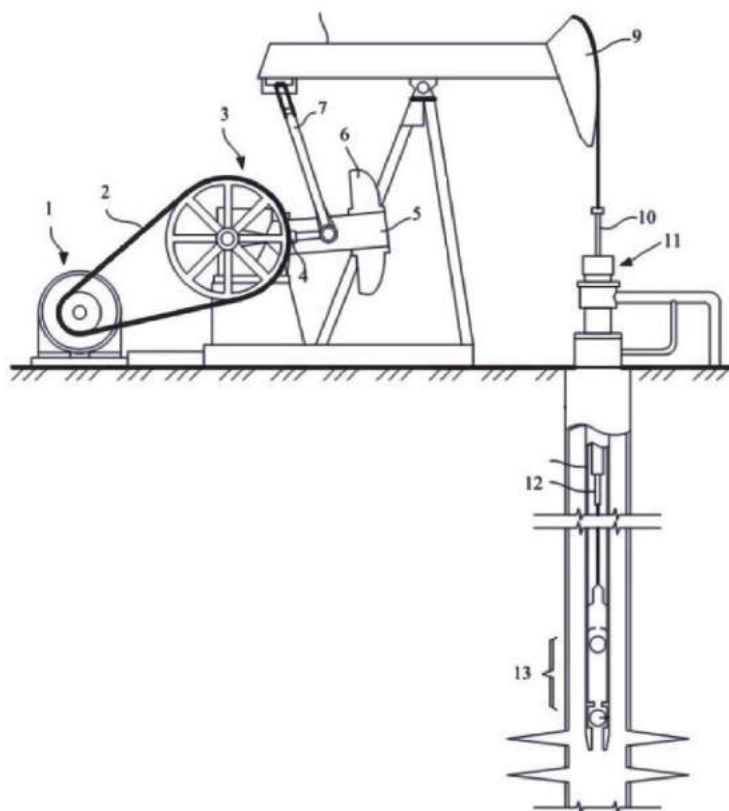


Рисунок 1. Комплекс оборудования ШСНУ с приводом от станка-качалки

Figure 1. A set of sucker rod pumping unit equipment driven by a pumping machine



КТП – комплексная трансформаторная подстанция;  
 СУ – станция управления;  
 ЭД – электродвигатель;  
 РП – ременная передача;  
 РЕД – редуктор;  
 Ч – четырехзвенник;  
 СУСГ – сальник устьевой с самоустанавливающейся головкой;  
 ШТ – штанговая колонна;  
 НАС – насос;  
 ПОЛ – полезная работа.

**Рисунок 2.** Схема передачи энергии в ШСНУ с приводом от станка-качалки

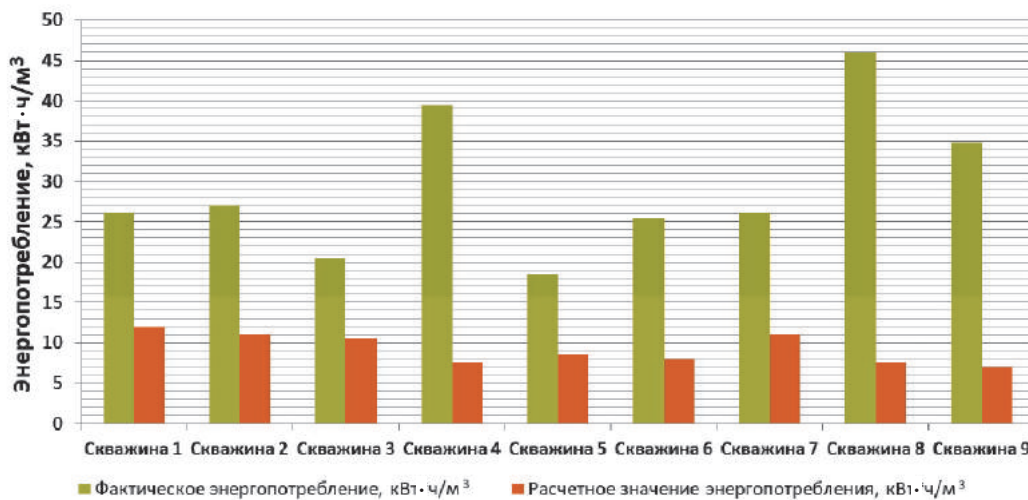
**Figure 2.** Scheme of energy transfer in a sucker rod pumping unit driven by a pumping machine

**Анализ точности математического обеспечения существующих ИИС определения энергопотребления ШСНУ**

На текущем этапе развития современных ИИС определения энергопотребления в качестве методической основы используются различные полуэмпирические зависимости (формулы «Азинмаш», Б.М. Плюща и В.О. Саркисяна и других) [1]. Они представляют собой одно или несколько аналитических выражений, адаптация которых под конкретные геологические, технологические и технические условия осуществляется введением набора корректирующих

коэффициентов. Очевидно, что применение подобных зависимостей не позволяет выполнять расчет уровня энергопотребления с высокой точностью. Так, на рисунке 3 приведены гистограммы, на которых представлены уровни фактического энергопотребления ШСНУ с приводом от станка-качалки, полученные по данным замеров с индивидуальных приборов учета, и расчетные значения потребления электроэнергии, полученные с помощью указанных полуэмпирических аналитических выражений.

Как видно из данных на рисунке 3, расчетные значения существенно отличаются от фактических, что не позволяет использо-



**Рисунок 3.** Отклонение фактических и расчетных значений энергопотребления, вычисленных на основе существующих методик

**Figure 3.** Deviation of actual and estimated energy consumption values calculated on the basis of existing methods

вать указанные подходы для формирования математического и алгоритмического обеспечения ИИС определения энергопотребления ШСНУ.

Высокие уровни погрешностей по полумпирическим методикам связаны, в первую очередь, с отсутствием учета уровня потерь энергии в указанных формулах, в каждом элементе установки, в соответствии с его параметрами.

### Математическое и алгоритмическое обеспечение ИИС определения энергопотребления ШСНУ с приводом от станка-качалки

Согласно схеме, представленной на рисунке 2, полное потребление мощности ШСНУ с двигателем от станка-качалки можно представить в виде выражения:

$$P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{сп}} + \Delta P_{\text{эд}} + \Delta P_{\text{наз.}} + \Delta P_{\text{подз.}} + P_{\text{пол.}}, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{\text{сп}}$  — потери в цепях питания, Вт;

$\Delta P_{\text{эд}}$  — потери в электродвигателе, Вт;

$\Delta P_{\text{наз.}}$  — потребление в элементах станка-качалки, за исключением электродвигателя, Вт;

$\Delta P_{\text{подз.}}$  — потребление в подземной части оборудования, Вт;

$P_{\text{пол.}}$  — мощность, требуемая на подъем скважинной продукции на поверхность земли, Вт.

Потери в цепях питания включают в себя потери в трансформаторной подстанции (пропорционально числу потребителей на линии), а также потери в станции управления установкой.

Потери в наземной части включают в себя потери во всех элементах станка-качалки (ременная передача, редуктор, четырехзвенник), а также потери на трение в устьевом сальнике (сальник устьевой с самоустанавливающейся головкой (СУСГ)), за исключением асинхронного электродвигателя станка-качалки.

Отдельно рассматриваются потери в асинхронном электродвигателе, поскольку структура потерь в данном элементе установки имеет сложный характер для прогнозирования.

Потери в подземной части состоят из потерь от гидродинамического и механиче-

ского трения штанговой колонны, а также потерь на трение плунжера и потерь в клапанах плунжерного насоса.

Таким образом, с учетом декомпозиции всех составляющих установки на элементы, выражение (1) можно записать в следующем виде:

$$P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{тп}} + \Delta P_{\text{су}} + \Delta P_{\text{эд}} + \Delta P_{\text{рп}} + \Delta P_{\text{ред}} + \Delta P_{\text{чз}} + \Delta P_{\text{сусг}} + \Delta P_{\text{гт}} + \Delta P_{\text{мт}} + \Delta P_{\text{тпл}} + \Delta P_{\text{пк}} + P_{\text{пол.}}, \quad (2)$$

где  $\Delta P_{\text{тп}}$  — потери в трансформаторной подстанции, Вт;

$\Delta P_{\text{су}}$  — потери в станции управления, Вт;

$\Delta P_{\text{рп}}$  — потери в ременной передаче, Вт;

$\Delta P_{\text{ред}}$  — потери в редукторе, Вт;

$\Delta P_{\text{чз}}$  — потери в четырехзвеннике, Вт;

$\Delta P_{\text{сусг}}$  — потери в сальниковом уплотнителе, Вт;

$\Delta P_{\text{гт}}$  — потери на гидравлическое трение штанговой колонны, Вт;

$\Delta P_{\text{мт}}$  — потери на механическое трение штанговой колонны, Вт;

$\Delta P_{\text{тпл}}$  — потери на трение плунжера в насосе, Вт;

$\Delta P_{\text{пк}}$  — потери в клапанах насоса, Вт.

Рассмотрим более подробно каждую составляющую потерь в ШСНУ, согласно выражению (2).

В соответствии со структурной схемой потерь электроэнергии в ШСНУ, в первую очередь рассмотрим потери в трансформаторной подстанции. Они зависят от множества параметров, таких как удаленность от распределительного пункта, качества электроэнергии, технического состояния трансформаторной подстанции и проводов и т.д. Указанные параметры не поддаются аналитической оценке и непосредственному измерению, поэтому в качестве нормы потерь для каждой трансформаторной подстанции целесообразно выбирать значение уровня потерь ( $\Delta P_{\text{транс}}$ ) по среднестатистическим данным, в зависимости от его мощности [2]. Соответственно, выражение для расчета потерь в трансформаторной подстанции применительно к рассматриваемой установке можно записать в следующем виде:

$$\Delta P_{\text{тп}} = \Delta P_{\text{транс}} \cdot \frac{P_{\Sigma \text{эд}}}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (3)$$

где  $P_{\Sigma \text{эд}}$  — потребляемая мощность двигателя рассматриваемой установки, Вт;

$\sum_{i=1}^n P_i$  — суммарная мощность всех потребителей трансформаторной подстанции, Вт;

$\Delta P_{\text{транс}}$  — средний уровень потерь, задаваемый исходя из статистических данных, Вт.

Максимальные потери в станции управления принимают равными 150 Вт [2], однако, если в документации на СУ приведена максимальная норма потерь, характерная для конкретного типа станции, то в расчетах следует применять это значение. Во время работы норма потерь энергии варьируется от околонулевого значения до максимального и зависит от степени загрузки. В среднем, потери энергии составляют 5 % от мощности загрузки электродвигателя:

$$\Delta P_{\text{СУ}} = 0,05 \cdot P_{\Sigma \text{эд}}. \quad (4)$$

Приводом большинства эксплуатируемых в настоящий момент времени станков-качалок является асинхронный электродвигатель, суммарные потери в котором можно разделить на две основные группы:

— потери мощности в электродвигателе (магнитные, электрические и механические потери);

— потери мощности вследствие неравномерной нагрузки электродвигателя в цикле качания (циклический КПД [3, 4], который связан с переменным характером нагрузки в цикле качания и неуравновешенностью станка-качалки).

Первая группа потерь полностью определяется паспортной нагрузочной характеристикой электродвигателя.

Также отдельным видом потерь энергии является неравномерность нагрузки на вал электродвигателя. Вследствие недогрузки в отдельные периоды работы (движение штанговой колонны вниз) происходит переход работы двигателя в режим генерации, энергия вращения с определенным силовым моментом не совершает полезную работу, соответственно, потребление электроэнергии и КПД меняются также в течение цикла качания.

Для определения циклического КПД ( $\eta_{\text{ц}}$ ) необходимо, в первую очередь, оценить соответствующий эквивалентной мощности КПД ( $\eta_{\text{э}}$ ) по нагрузочной характеристике, а затем непосредственно значение циклического КПД по следующей формуле [4, 5]:

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{\eta_{\text{э}}}{\eta_{\text{э}} + (1 - \eta_{\text{э}}) K_{\text{ф}}}, \quad (5)$$

где  $K_{\text{ф}}$  — коэффициент формы ваттметрограммы, который может быть вычислен как отношение среднеквадратического значения мощности к среднему значению мощности на электродвигателе за цикл качания;

$\eta_{\text{э}}$  — КПД, соответствующий эквивалентной мощности.

Далее необходимо найти долю дополнительных потерь, обусловленных неуравновешенностью станка-качалки. Существует несколько методик по определению коэффициента неуравновешенности ( $K_{\text{н}}$ ):

— вычисление по значениям технических параметров установки и технологических параметров ее работы;

— по форме ваттметрограммы (рисунок 4).

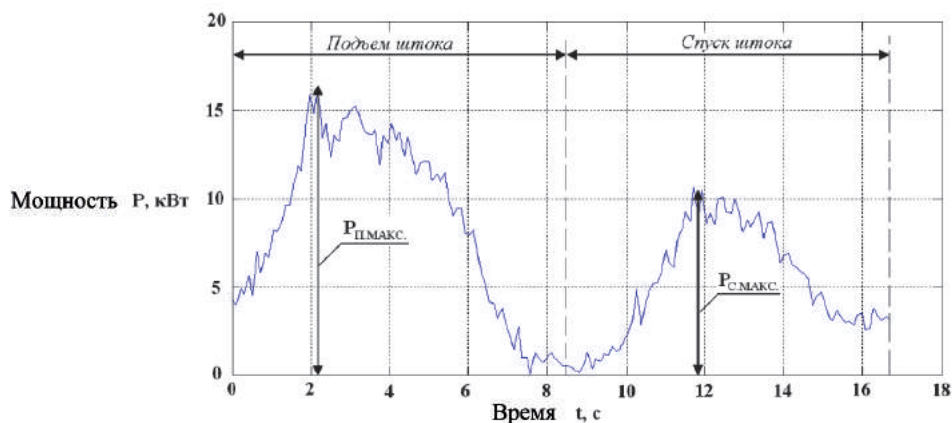


Рисунок 4. Определение максимальных значений мощности за цикл качания

Figure 4. Determination of maximum power values per a swing cycle



Наиболее корректным методом является определение коэффициента неуравновешенности по форме ваттметрограммы (рисунок 4) в соответствии со следующей формулой:

$$K_H = \frac{(P_{п.макс} - P_{с.макс})}{(P_{п.макс} + P_{с.макс})} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где  $P_{п.макс}$  — максимальное значение активной мощности при подъеме полированного штока, Вт;

$P_{с.макс}$  — максимальное значение активной мощности при спуске полированного штока, Вт.

По значению  $K_H$  определяются дополнительные потери электроэнергии. Зависимость дополнительных потерь ( $\Delta w$ ) вследствие неуравновешенности станка-качалки от расчетного значения коэффициента неуравновешенности представлена на рисунке 5.

Таким образом, потребляемая электродвигателем мощность вычисляется согласно следующему выражению:

$$P_{\Sigma эд} = \frac{P_{эд}}{\eta_{ц}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta w}{100}\right), \quad (7)$$

где  $\Delta w$  — дополнительные потери, вызванные неуравновешенностью станка-качалки, %;

$P_{эд}$  — механическая мощность на валу двигателя, Вт.

Суммарные потери мощности на электродвигателе, с учетом «паспортных» потерь от недостаточной загруженности и потерь от неуравновешенности станка качалки, находятся по формуле:

$$\Delta P_{эд} = \frac{P_{эд}}{\eta_{ц}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta w}{100}\right) - P_{эд}, \quad (8)$$

где  $\Delta w$  — доля дополнительных потерь вследствие неуравновешенности станка-качалки (определяемая по графику на рисунке 5).

Кинематический и силовой расчет ременной передачи построен на теории упругого скольжения ремня по шкивам [5]. Формула для определения потерь в ременной передаче может быть записана в следующем виде:

$$\Delta P_{рп} = P_{эд} - P_{рп}, \quad (9)$$

где  $P_{рп}$  — мощность на выходе ременной передачи, Вт.

По определению, КПД ременной передачи является отношением выходной мощности к входной мощности ременной передачи (механическая мощность на валу электродвигателя), что, с учетом записи через моменты, можно представить в виде:

$$\eta_{рп} = \frac{P_{рп}}{P_{эд}} = \frac{M_1 \cdot \omega_1}{M_2 \cdot \omega_2}, \quad (10)$$

где  $\omega_1$  — угловая скорость вала электродвигателя, об/мин;

$\omega_2$  — угловая скорость ведомого вала ременной передачи, об/мин;

$M_1$  — величина момента пары сил, приводящих в движение ведущий шкив, Н·м;

$M_2$  — величина момента пары сил полезного сопротивления (рабочей нагрузки), действующих на ведомый шкив, Н·м.

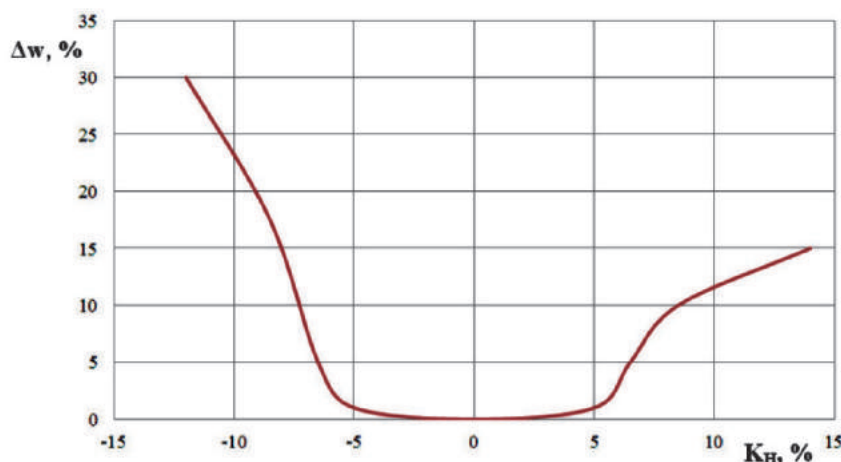


Рисунок 5. Зависимость потерь от коэффициента неуравновешенности станка-качалки

Figure 5. Dependence of losses on the unbalance coefficient of a pumping machine

Коэффициент полезного действия подшипникового узла ременной передачи находится через расчет сил трения в подшипнике по известным геометрическим параметрам. Таким образом, выражение (9) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{рп}} &= P_{\text{эд}} - P_{\text{рп}} = \\ &= P_{\text{эд}} - P_{\text{эд}} \cdot \eta_{\text{рп}} = P_{\text{эд}} \cdot \left(1 - \frac{M_1 \cdot \omega_1}{M_2 \cdot \omega_2}\right). \end{aligned} \quad (11)$$

Редуктор предназначен для уменьшения частоты вращения и повышения крутящего момента, передаваемого от электродвигателя к кривошипу станка-качалки, и является второй ступенью понижения частоты после ременной передачи.

В компоновках станков-качалок наибольшее распространение получил двухступенчатый редуктор с цилиндрической шевронной зубчатой передачей с зацеплением Новикова. При работе такого редуктора выделяют следующие виды потерь:

— потери в зацеплении зубьев. Вызваны трением зубьев одного колеса о зубья другого при их контакте, оно зависит от характера их контакта. Чем больше колебаний нагрузки, передаваемой редуктором, тем больше соударений зубьев колес друг от друга и, как следствие, тем больше потерь энергии. Наиболее оптимальный вариант для минимизации потерь в зацеплении — это плавное, равномерное и постоянное нагружение, без скачков и торможений;

— гидродинамические потери. При эксплуатации редуктора применяется картерная смазка вращающихся колес, при которой колеса периодически погружают все свои зубья в масло. В процессе контакта масла и рабочего колеса из-за наличия трения между ними происходят потери мощности в механизме.

Общая формула для определения потерь в редукторе может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{ред}} &= \Delta P_{\text{ред}}^{\text{зац}(1-2)} + \Delta P_{\text{ред}}^{\text{гдм}(2)} + \\ &+ \Delta P_{\text{ред}}^{\text{зац}(3-4)} + \Delta P_{\text{ред}}^{\text{гдм}(4)}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\Delta P_{\text{ред}}^{\text{зац}(1-2)}$  — потери в зацеплении 1-го и 2-го колес, Вт;

$\Delta P_{\text{ред}}^{\text{гдм}(2)}$  — гидродинамические потери 2-го колеса, Вт;

$\Delta P_{\text{ред}}^{\text{зац}(3-4)}$  — потери в зацеплении 3-го и 4-го колес, Вт;

$\Delta P_{\text{ред}}^{\text{гдм}(4)}$  — гидродинамические потери 4-го колеса, Вт.

Основными потерями в зубчатом зацеплении являются потери на трение скольжения. Коэффициент потерь на трение в зацеплении ( $\varphi$ ) определяется по формуле В. Н. Кудрявцева [7]:

$$\varphi^3 \approx 2,3 \cdot f_3 \cdot \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}\right) = 2,3 \cdot f_3 \cdot \left(\frac{u_{12}+1}{u_{12} \cdot z_1}\right), \quad (13)$$

где  $u_{12}$  — передаточное число;

$z_1$  — число зубьев ведущего колеса;

$z_2$  — число зубьев ведомого колеса;

$f_3 \approx 1,25f$  — коэффициент трения в зацеплении;

$f$  — коэффициент трения материалов колес.

Зная коэффициент потерь на трение в зацеплении, находят потери мощности:

$$\Delta P_{\text{ред}}^{\text{зац}} = P_{\text{зац}}^{\text{вх}} \cdot \varphi^3, \quad (14)$$

где  $P_{\text{зац}}^{\text{вх}}$  — мощность, подводимая к месту зацепления колес, Вт.

Для смазывания передач в редукторе ШСНУ применяют картерную систему. Коэффициент гидродинамических потерь мощности для цилиндрических передач с внешним зацеплением, смазываемых окунанием, определяется по формуле [7]:

$$\varphi^m \approx \left(\frac{k \cdot d_w \cdot b_w}{T_2}\right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V \cdot \nu}{(z_1 + z_2)}}, \quad (15)$$

где  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости масла, м<sup>2</sup>/с;

$T_2$  — крутящий момент, Нм;

$V$  — окружная скорость, м/с;

$d_w$  — диаметр зубчатого колеса, м;

$b_w$  — ширина рабочего колеса, м;

$k$  — поправочный коэффициент при смазывании окунанием;

$m$  — модуль зубчатого колеса.

Зная коэффициент гидродинамических потерь, находят потери мощности:

$$\Delta P_{\text{ред}}^{\text{гдм}} = P_{\text{гдм}}^{\text{вх}} \cdot \varphi^m, \quad (16)$$

где  $P_{\text{гдм}}^{\text{вх}}$  — мощность, подводимая к месту возникновения гидродинамических потерь, Вт.

Таким образом, последовательный расчет потерь в редукторе производят, используя формулы (12)–(16).

Полученная выходная мощность поступает на вход кинематической схемы станка-качалки, которая представляет собой четырехзвенник (рисунок 6). Как видно из кинематической схемы станка-качалки, ШСНУ включает четыре звена, соединенных между собой шарнирами.

Таким образом, потери в четырехзвеннике состоят из потерь на трение в шарнирах кривошипов «А», «В» и «С»:

$$\Delta P_{\text{чз}} = \Delta P_{\text{чз}}^A + \Delta P_{\text{чз}}^B + \Delta P_{\text{чз}}^C. \quad (17)$$

Потери в каждом из шарниров вычисляются по следующей формуле:

$$\Delta P_{\text{тр}} = M_{\text{шр}}^{\text{тр}} \cdot \omega_{\text{шр}} = \pi \cdot f \cdot F_x \cdot \frac{r_n}{2} \cdot \omega_{\text{шр}}, \quad (18)$$

где  $M_{\text{шр}}^{\text{тр}}$  — момент трения в шарнире, Нм;

$f$  — коэффициент трения скольжения в шарнире;

$F_x$  — сила от веса груза на шарнир, Н;

$r_n$  — радиус шипа шарнира, м;

$\omega_{\text{шр}}$  — угловая скорость вращения шарнира, рад/с.

При движении полированного штока слой набивки, контактирующий со штоком, со временем изнашивается. Каждый раз происходит трение штока о слой набивки, причем, чем сильнее затянута набивка и чем больше коэффициент трения у ее материала, тем потери энергии будут больше.

Потери на трение штока о сальниковую набивку:

$$\Delta P_{\text{сург}} = q_z \cdot K_r \cdot L \cdot \pi \cdot d_0 \cdot f \cdot v_{\text{ср}}, \quad (19)$$

где  $q_z$  — осевая нагрузка на набивку, Па;

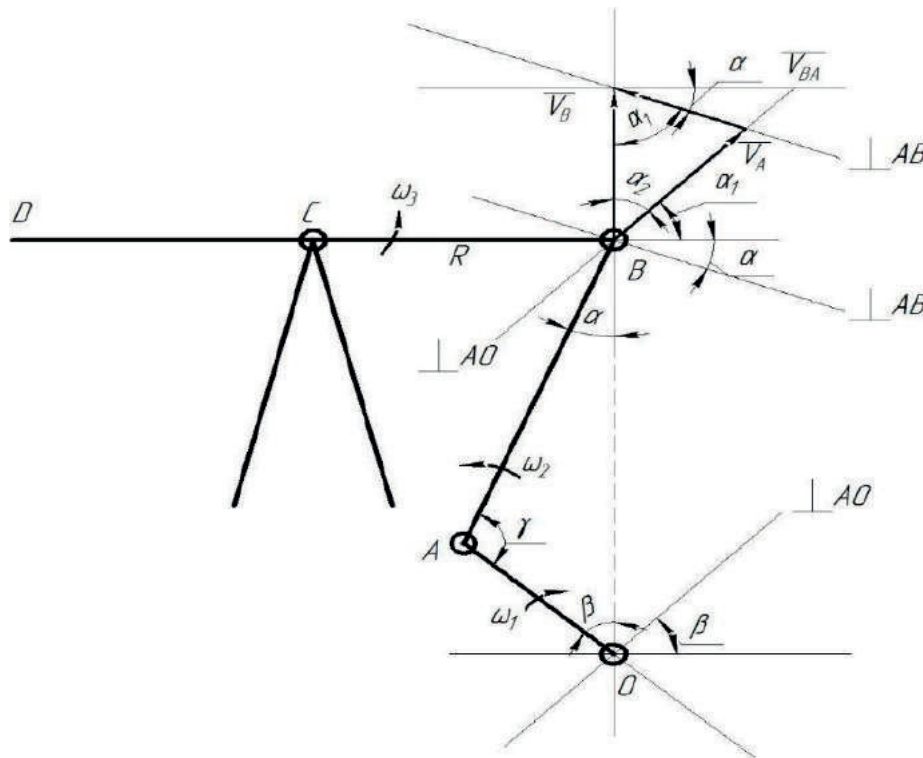
$K_r$  — коэффициент бокового давления на внутренней полости набивки, принимается в зависимости от материала (для резины лежит в диапазоне 0,19–1);

$L$  — длина СУСГ, м;

$d_0$  — диаметр штока, м;

$f$  — коэффициент трения, принимается в зависимости от материала (для резины лежит в диапазоне 0,06–0,3);

$v_{\text{ср}}$  — значение средней скорости штока, м/с.



$\omega$  — угловая скорость, об/с;  $v$  — линейная скорость, м/с;  
 $\alpha, \beta, \gamma$  — углы между различными элементами четырехзвенника

$\omega$  — angular velocity, r/s;  $v$  — linear speed, m/s;  
 $\alpha, \beta, \gamma$  — angles between various elements of a four-bar link

**Рисунок 6.** Кинематическая схема станка-качалки

**Figure 6.** Kinematic diagram of the pumping machine

Потери при движении штанговой колонны можно разделить на потери от механического трения штанг о стенки насосно-компрессорных труб (НКТ) и гидродинамического трения штанг. Указанные силы зависят от физических свойств добываемой продукции, конструкции скважины, компоновки и режима работы оборудования.

Для каждой ступени определяется мощность, затрачиваемая на гидродинамическое трение, по следующей формуле:

$$\Delta P_{\text{тр.г}i} = \frac{\pi^3 \cdot (S \cdot n)^2 \cdot \mu \cdot L_i \cdot M_{\text{шт}i}}{3600}, \quad (20)$$

где  $L_i$  — длина колонны штанг данной ступени, м;

$\mu$  — динамическая вязкость, Па·с;

$S$  — длина хода, м;

$n$  — число качаний, с<sup>-1</sup>;

$M_{\text{шт}i}$  — коэффициент (по методике Пирвердяна [2, 8]), вычисляемый по формуле:

$$M_{\text{шт}i} = \frac{1}{\frac{m_i^2 + 1}{m_i^2 - 1} \ln(m_i) - 1}, \quad (21)$$

где  $m_i$  — отношение диаметра НКТ к диаметру ступени, безразмерная величина;

$m_i = \frac{D_{\text{нкт}}}{d_{\text{шт}i}}$ , здесь  $D_{\text{нкт}}$  — внутренний диаметр НКТ, м;  $d_{\text{шт}i}$  — диаметр штанги ступени, м.

По результатам расчетов потерь мощности, для каждой ступени производят их суммирование:

$$\Delta P_{\text{штк}}^{\text{тр.г}} = \sum \Delta P_{\text{тр.г}i}, \quad (22)$$

где  $\Delta P_{\text{тр.г}i}$  —  $i$ -ое значение мощности, затрачиваемой на гидродинамическое трение, Вт.

Для учета конструкции скважины, при расчете потерь мощности на механическое трение штанговой колонны об НКТ по методике, изложенной в [8] и [9], необходимо иметь данные инклинометрических исследований скважины. Для каждой глубины, на которой выполнено определение азимутных и зенитных углов скважины, поочередно высчитывается ряд параметров:

$$\Delta P_{\text{штк}}^{\text{тр.мех}} = 2 \cdot C_{\text{шт}} \cdot S \cdot n \times$$

$$\times \sum_{i=1}^k \Delta L_i \sqrt{\left( q'_{\text{шт}i} \cdot \sin \alpha_i + P_{i-1} \frac{\Delta \alpha_i}{\Delta L_i} \right)^2 + \left( P_{i-1} \frac{\Delta \theta_i}{\Delta L_i} \sin \alpha_i \right)^2}, \quad (23)$$

где  $\alpha_i(\theta_i)$  — угол отклонения  $i$ -го участка ствола скважины от вертикали, рад;

$C_{\text{шт}}$  — коэффициент трения штанг о трубы;

$S$  — длина хода, м;

$n$  — число качаний, с<sup>-1</sup>;

$\Delta L_i$  — длина  $i$ -го участка с отклонением от вертикали, м;

$q'_{\text{шт}}$  — вес 1 м штанг в жидкости, Н;

$P_{i-1}$  — текущая суммарная нагрузка от веса жидкости, веса штанг и сил трения, приложенная к нижнему сечению  $i$ -го участка.

По результатам расчетов потерь механической мощности для каждой ступени производят их суммирование:

$$\Delta P_{\text{штк}}^{\text{тр.мех}} = \sum \Delta P_{\text{тр.мех}i}, \quad (24)$$

где  $\Delta P_{\text{тр.мех}i}$  —  $i$ -ое значение потерь на преодоление механических трений, Вт.

Таким образом, суммарные потери в штанговой колонне вычисляются по формуле:

$$\Delta P_{\text{штк}} = \Delta P_{\text{штк}}^{\text{тр.мех}} + \Delta P_{\text{штк}}^{\text{тр.г}}.$$

Потери в насосе можно условно разделить на потери от силы трения плунжера о стенки цилиндра и силы гидравлического сопротивления, обусловленного перепадом давления в нагнетательном клапане.

Учесть потери мощности в клапанах можно, используя предложенную В.М. Люстрицким зависимость для потерь напора в клапане плунжерного насоса, Вт:

$$\Delta P_{\text{кл}} = \frac{A \cdot (H_{\text{ж}} - H_{\text{ст}}) \cdot K_{\text{прод}} \cdot \rho_{\text{ж}}^2 \cdot g \cdot 10^{10}}{8,64 \cdot f_0} \times \left( \frac{v_{\text{ср}}}{\frac{\pi}{180} \arctg(B \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \mu \cdot v_{\text{ср}})} \right)^2, \quad (25)$$

где  $f_0$  — площадь проходного сечения клапана, м<sup>2</sup>;

$K_{\text{прод}}$  — коэффициент продуктивности, м<sup>3</sup>/(сут·МПа);

$A, B$  — коэффициенты;

$H_{\text{ж}}$  — динамический уровень, м;

$H_{\text{ст}}$  — статический уровень, м;

$\rho_{\text{ж}}$  — плотность водонефтяной смеси, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  — динамическая вязкость, Па·с;

$v_{\text{ср}}$  — средняя скорость движения штока, м/с;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Потери мощности на трение плунжера в цилиндре определяются по формуле:

$$\Delta P_{\text{тр.пл}} = 1,65 \cdot \frac{D_{\text{пл}}}{\delta} - 127, \quad (26)$$

где  $D_{\text{пл}}$  — диаметр плунжера, м;

$\delta$  — зазор между плунжером и цилиндром, м.

Далее рассчитывается полезная мощность, которая расходуется на поднятие жидкости на высоту подвески насоса:

$$P_{\text{пол.}} = (F_{\text{пл}} n S) \cdot (\rho_{\text{ж}} g H_{\text{ж}} + p_{\text{у}} - p_{\text{зат}}), \quad (27)$$

где  $F_{\text{пл}}$  — площадь поперечного сечения плунжера, м<sup>2</sup>;

$p_{\text{у}}$  — устьевое давление, Па;

$p_{\text{зат}}$  — давление в затрубном пространстве, Па.

На завершающем этапе выполнения алгоритма происходит суммирование всех видов потерь согласно выражению (2), что и является потребляемой мощностью ШСНУ.

### Анализ точности разработанного математического обеспечения определения энергопотребления ШСНУ

На основе разработанного математического обеспечения был проведен расчет энергопотребления на скважинах, оборудованных станками-качалками (рисунок 7).

Как видно из гистограммы на рисунке 7, расчётные значения энергопотребления достаточно близки к значениям, полученным с помощью инструментального замера. Средняя относительная погрешность определения энергопотребления, по указанной

группе скважин, составляет 11,13 %, что не превышает значение минимальной погрешности определения энергопотребления скважин с ШСНУ с учетом допустимых погрешностей определения измеряемых параметров [10].

### Выводы

1. Расчет уровня энергопотребления установок для добычи нефти, в частности ШСНУ, является актуальной задачей, точное решение которой позволяет адекватно оценивать и прогнозировать эффективность эксплуатации оборудования, а также своевременно планировать корректирующие мероприятия, направленные на повышение энергоэффективности.

2. Существующие в настоящее время методики и алгоритмы определения уровня энергопотребления ШСНУ основаны на полуэмпирических обобщенных зависимостях, не учитывающих особенностей применяемого оборудования и чаще всего представленные одной формулой, низкая точность которой не позволяет применять полученные значения для корректного анализа работы установки.

3. Для проведения расчетов уровня энергопотребления ШСНУ предложено математическое и алгоритмическое обеспечение,

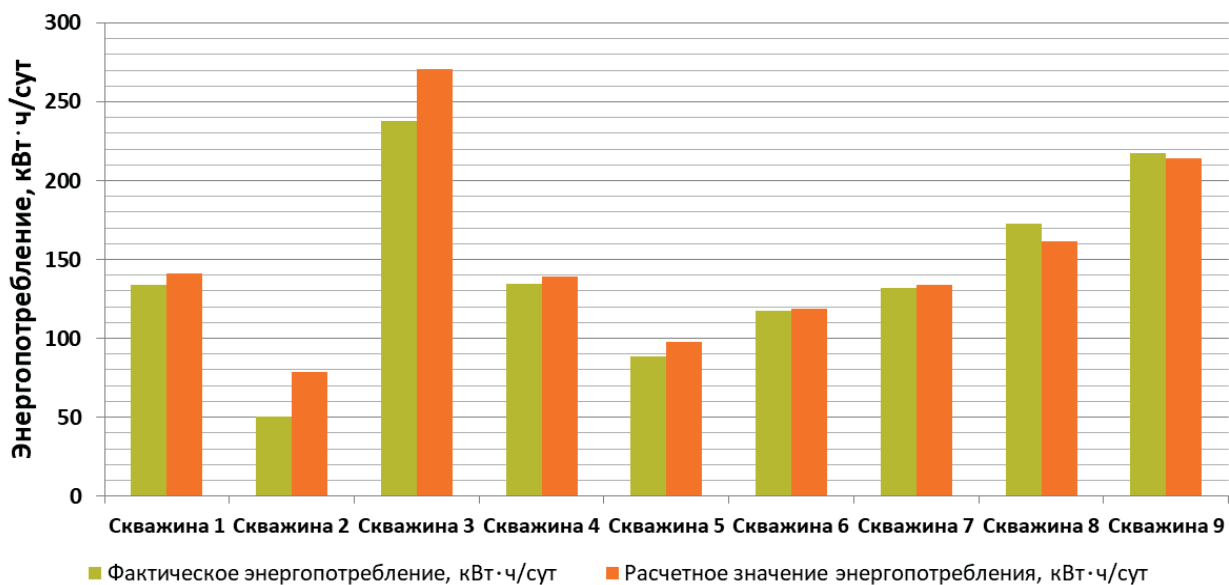


Рисунок 7. Сопоставление фактических и расчетных значений энергопотребления, вычисленных на основе ИИС

Figure 7. Comparison of actual and estimated energy consumption values calculated on the basis of IMS

основанное на узловом подробном расчете всех элементов, входящих в состав установки, с учетом большого числа исходных данных как по технологическому режиму работы, так и по конструктивным и техническим параметрам всего оборудования установки.

4. Применение разработанного обеспечения позволяет существенно повысить точ-

ность расчетов энергопотребления ШСНУ, в результате чего погрешность составляет 11,13 %, что не превышает минимальной погрешности определения энергопотребления скважин с ШСНУ с учетом допустимых погрешностей определения измеряемых параметров.

#### Список источников

1. РД 39-3-934-83. Методика расчета норм электрической энергии на добычу нефти. М.: ВНИПИтермнефть, 1983. 66 с.

2. Тахаутдинов Ш.Ф., Ибрагимов Н.Г., Валовский В.М., Валовский К.В. Цепные приводы скважинных штанговых насосов. М.: Изд-во «Нефтяное хозяйство», 2014. 447 с. ISBN: 978-5-93623-023-3.

3. Хахимьянов М.И. Удельный расход электроэнергии при механизированной добыче нефти штанговыми глубинно-насосными установками // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18, № 2 (63). С. 54–60. EDN: SEAXPT.

4. Хахимьянов М.И., Хусаинов Ф.Ф., Шафиков И.Н. Зависимость энергопотребления штанговых глубинных насосов от технологических параметров скважин // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. № 1. С. 533–563. EDN: TLSENJ.

5. Белов М.И. К расчёту ременной передачи // Universum: технические науки. 2017. № 5 (38). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/4815> (дата обращения: 25.06.2024).

6. Кудрявцев В.Н., Кирдяшев Ю.Н. Планетарные передачи. Справочник. Л.: Машиностроение, 1977. 536 с.

7. Решетов Д.Н., Гусенков А.П., Дроздов Ю.Н. Машиностроение. Энциклопедия. В 40 т. Т. IV-1. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка. М.: Машиностроение, 1995. 864 с. ISBN: 5-217-01949-2.

8. Андриасов Р.С., Мищенко И.Т., Петров А.И. и др. Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. Добыча нефти. М.: Недра, 1983. 455 с.

9. РД 03-00147275-065-2001. Глубинно-насосное оборудование. Методика подбора. Уфа: БашНИПИнефть, 2001. 81 с.

10. Китабов А.Н., Абуталипов У.М., Шарипов А.И., Хахимьянов М.И. Оценка погрешности определения потребления электроэнергии при эксплуатации штанговой скважинной насо-

мой установки // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2020. Т. 16, № 4. С. 5–17. DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-4-5-17. EDN: ZGRJYN.

#### References

1. RD 39-3-934-83. Metodika rascheta norm elektricheskoi energii na dobychu nefiti [Guidance Document 39-3-934-83. Methodology for Calculating Electrical Energy Standards for Oil Production]. Moscow, VNIPItermneft', 1983. 66 p. [in Russian].

2. Takhautdinov Sh.F., Ibragimov N.G., Valovskii V.M., Valovskii K.V. Tsepnye privody skvazhinnykh shtangovykh nasosov [Chain Drives of Downhole Sucker Rod Pumps]. Moscow, Izd-vo «Neftyanoe khozyaistvo», 2014. 447 p. ISBN: 978-5-93623-023-3. [in Russian].

3. Khakim'yanov M.I. Udel'nyi raskhod elektroenergii pri mekhanizirovannoi dobyche nefiti shtangovymi glubinno-nasosnymi ustanovkami [Energy Intensity in Artificial Lift of Sucker Rod Pumping Units]. Vestnik UGATU — Scientific Journal of Ufa State Aviation Technical University, 2014, Vol. 18, No. 2 (63), pp. 54–60. EDN: SEAXPT. [in Russian].

4. Khakim'yanov M.I., Khusainov F.F., Shafikov I.N. Zavisimost' energopotrebleniya shtangovykh glubinnykh nasosov ot tekhnologicheskikh parametrov skvazhin [Technological Parameters Influence of Oil Wells on Energy Consumption Sucker Rod Pumps]. Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business», 2015, No. 1, pp. 533–563. EDN: TLSENJ. [in Russian].

5. Belov M.I. K raschetu remennoi peredachi [To the Calculation of Belt Drive]. // Universum: Tekhnicheskkiye nauki — Universum: Technical Sciences, 2017, No. 5 (38). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/4815> (accessed 25.06.2024). [in Russian].

6. Kudryavtsev V.N., Kiryashev Yu.N. Planetarnye peredachi. Spravochnik [Planetary Gears.

Directory]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1977. 536 p. [in Russian].

7. Reshetov D.N., Gusenkov A.P., Drozdov Yu.N. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. V 40 t. T. IV-1. Detali mashin. Konstruktsionnaya prochnost'. Trenie, iznos, smazka* [Mechanical Engineering. Encyclopedia. In 40 books. Vol. IV-1. Machine Parts. Structural Strength. Friction, Wear, Lubrication]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 864 p. ISBN: 5-217-01949-2. [in Russian].

8. Andriasov R.S., Mishchenko I.T., Petrov A.I. et al. *Spravochnoe rukovodstvo po proektirovaniyu razrabotki i ekspluatatsii neftyanykh mestorozhdenii. Dobycha nefti* [Reference Guide for Design of Oil Field Development and Operation. Oil Production]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 455 p. [in Russian].

9. RD 03-00147275-065-2001. *Glubinno-nasosnoe oborudovanie. Metodika podbora* [Guidance Document 03-00147275-065-2001 Deep-Well Pumping Equipment. Selection Technique]. Ufa, BashNIPIneft', 2001. 81 p. [in Russian].

10. Kitabov A.N., Abutalipov U.M., Shari-pov A.I., Khakim'yanov M.I. Otsenka pogreshnosti opredeleniya potrebleniya elektroenergii pri ekspluatatsii shtangovoi skvazhinnoi nasosnoi ustanovki [Estimation of Error in Determining Electric Power Consumption during the Operation of Rod Pumping Unit]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2020, Vol. 16, No. 4, pp. 5–17. DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-4-5-17. EDN: ZGRJYN. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 02.05.2024; одобрена после рецензирования 16.05.2024; принята к публикации 23.05.2024.*

*The article was submitted 02.05.2024; approved after reviewing 16.05.2024; accepted for publication 23.05.2024.*

Научная статья

УДК 681.5

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-2-103-114

## РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

**Павел Евгеньевич Корнеев****Pavel E. Korneev**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологий автоматизированного производства, Егорьевский технологический институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Егорьевск, Россия

**Алексей Андреевич Игнатьев****Alexey A. Ignatyev**

магистрант кафедры инженерной экологии и безопасности жизнедеятельности, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия

### Актуальность

Практическая подготовка высококвалифицированных инженерных кадров в области промышленной автоматизации является одним из ключевых факторов в технологическом развитии отраслей материального производства нашей экономики. Лабораторная база в высших учебных заведениях должна быть оснащена современными стендами с оборудованием, которое соответствует технологическому уровню реального оборудования промышленных предприятий. В статье рассмотрены вопросы проектирования и конструирования мобильного многофункционального учебно-исследовательского лабораторного стенда промышленной автоматизации на основе программируемого реле отечественного производства ПР200, приведены функциональная и структурная схемы лабораторного стенда, предоставлен полный перечень использованных для создания стенда электротехнических компонентов. Произведенная экономическая оценка изготовления лабораторного стенда даёт основание сделать вывод об экономической целесообразности производства подобных стендов силами сотрудников кафедр направления промышленной автоматизации. В статье также показан опыт внедрения данного лабораторного стенда в учебный процесс подготовки бакалавров по направлению 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств». Лабораторный стенд на базе ПР200 является универсальным, многофункциональным, мобильным стендом, предназначенным для реализации многоуровневых задач промышленной автоматизации, который также может использоваться в качестве наглядного пособия при проведении профориентационных и

### Ключевые слова

промышленная автоматизация, программируемое реле, лабораторный стенд, автоматизация технологических процессов и производств



выставочных мероприятий во внеаудиторных помещениях. Проект по созданию лабораторного стенда на базе ПР200 может быть масштабирован в других высших учебных заведениях нашей страны без временных затрат на подготовительную и исследовательскую части.

#### **Цель исследования**

Разработать мобильный многофункциональный учебно-исследовательский лабораторный стенд промышленной автоматизации на базе оборудования российского производства, реально применяемого промышленными предприятиями, и внедрить данный лабораторный стенд в учебный процесс подготовки специалистов в области промышленной автоматизации.

#### **Методы исследования**

Для разработки лабораторного стенда применялись методы компьютерного проектирования и автоматизированного моделирования электрических схем.

#### **Результаты**

Разработанный лабораторный стенд произведён и внедрён в учебный процесс на кафедре технологий автоматизированного производства ЕТИ ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН» при проведении лабораторных и практических занятий по дисциплинам: «Механика и управление», «Электротехника и электроника», «Средства автоматизации и управления». Кроме того, обучающиеся выпускных курсов на стенде проводят натурное моделирование систем автоматизации в рамках выполнения научно-исследовательской работы и подготовки выпускной квалификационной работы.

**Для цитирования:** Корнеев П. Е., Игнатъев А. А. Разработка учебно-исследовательского лабораторного стенда промышленной автоматизации // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 2. Т. 20. С. 103-114. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-103-114>.

Original article

## **DEVELOPMENT A TRAINING AND RESEARCH LABORATORY STAND FOR INDUSTRIAL AUTOMATION**

#### **Relevance**

Practical training of highly qualified engineering personnel in the field of industrial automation is one of the key factors in the technological development of the material production sectors of our economy. The laboratory base in higher educational institutions should be equipped with modern stands with equipment that corresponds to the technological level of real equipment of industrial enterprises. The article discusses the issues of designing and constructing a mobile multifunctional training and research laboratory stand for industrial automation based on a programmable relay of domestic production PR200, provides functional and structural diagrams of the laboratory stand, provides a complete list of electrical components used to create the stand. The economic assessment of the manufacture of a laboratory stand gives grounds to conclude that it is economically feasible to produce such stands by the staff of departments of industrial automation. The article also shows the experience of introducing this laboratory stand into the educational process of bachelor's degree preparation in the direction of 15.03.04 «Automation of technological processes and productions». The laboratory stand based on the PR200 is a universal, multifunctional, mobile stand designed to implement multi-level tasks

#### **Keywords**

industrial automation, programmable relay, laboratory stand, automation of technological processes and productions

of industrial automation, which can also be used as a visual aid when conducting career guidance and exhibition events in extracurricular premises. The project to create a laboratory stand based on the PR200 can be scaled up in other higher educational institutions of our country without spending time on preparatory and research parts.

#### **Aim of research**

To develop a mobile multifunctional training and research laboratory stand for industrial automation based on Russian-made equipment that is actually used by industrial enterprises and to introduce this laboratory stand into the educational process of training specialists in the field of industrial automation.

#### **Research methods**

Computer-aided design and computer-aided modeling of electrical circuits were used to develop the laboratory stand.

#### **Results**

The developed laboratory stand was produced and introduced into the educational process at the Department of automated production technologies of the Yegoryevsk Institute of Technology (branch) of Moscow State University of Technology «STANKIN» during laboratory and practical classes in the disciplines: «Mechanics and Control», «Electrical Engineering and Electronics», «Automation and Control Tools». In addition, graduate students at the stand conduct full-scale modeling of automation systems as part of research and preparation of the final qualification work.

**For citation:** Korneev P. E., Ignatyev A. A. Razrabotka uchebno-issledovatel'skogo laboratornogo stenda promyshlennoi avtomatizatsii [Development a Training and Research Laboratory Stand for Industrial Automation]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 2, Vol. 20, pp. 103-114 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-103-114>.

#### **Введение**

Технологический суверенитет — это словосочетание, которое в настоящее время является предметом для многоплановых дискуссий в рамках различных научных конференций, совещаний, выставок. Ключевая мысль этого понятия состоит в способности Российской Федерации самостоятельно или в кооперации с партнёрами без структурной односторонней зависимости создавать, владеть и развивать критически важные технологии, применяемые в разнообразных отраслях нашей экономики [1–3]. Очевидно, что создаваемый технологический потенциал предоставит нашему государству неоспоримое конкурентное преимущество в таких сферах нашей экономики, как военно-промышленный комплекс, промышленность, энергетика, космические технологии, банковский сектор и др. На сегодняшний день значительное влияние вновь создаваемых собственных технологических решений оказывается на сферу автоматизации технологических процессов и

производств, где до недавнего времени абсолютное технологическое господство принадлежало европейским и американским брендам [4]. Технологические изменения влекут за собой проблемы в очень чувствительных областях в кадровой сфере. Отсутствие навыков по работе с современным оборудованием промышленной автоматизации приводит к процессу «технологической безработицы» [5]. Решением проблемы недостатка квалифицированных сотрудников по направлению автоматизации технологических процессов и производств является подготовка молодых специалистов в высших учебных заведениях с акцентом на формирование требуемых предприятиям навыков. Действующие в настоящее время Федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования при подготовке бакалавров и магистров особое место отводят проведению лабораторных и практических работ. Очевидно, что уровень лабораторной базы в высших учебных заведениях должен соответствовать

технологическому уровню оборудования промышленной автоматизации, применяемого на реальных предприятиях.

Постановка задачи — требуется разработать функциональную и структурную схемы лабораторного стенда промышленной автоматизации на базе оборудования российского производства, провести монтаж комплектующих и оценку экономических затрат на изготовление лабораторного стенда.

Этапы решения поставленной задачи:

1. Подбор оборудования промышленной автоматизации российского производства для лабораторного стенда;
2. Разработка функциональной и структурной схем лабораторного стенда;
3. Монтаж лабораторного стенда, оценка экономической составляющей создания лабораторного стенда.

### **Литературный обзор**

Анализ научных публикаций по тематике создания и применения лабораторных стендов на основе оборудования промышленной автоматизации позволяет сделать вывод о наличии трёх основных направлений развития научной мысли.

1. Публикации, посвящённые сравнительному анализу зарубежных и отечественных программируемых логических контроллеров (ПЛК) и программируемых реле.

В работах [6, 7] приводится детальный анализ зарубежных и отечественных аналогов программируемых реле, ПЛК и делается вывод о наличии у отечественного оборудования, ничем не уступающему зарубежному, таких технических особенностей, как использование сетевых протоколов обмена информацией, в том числе через облачные приложения, применение симуляторов, позволяющих отлаживать программы без реального оборудования, и т.д. Делается акцент, что для учебного процесса программируемое реле ПР200 идеально подходит как замена реле иностранного производства.

2. Публикации, сравнивающие применение виртуальных и физических лабораторных стендов промышленной автоматизации.

Так, в работах [8, 9] приводятся следующие аргументы в пользу применения физических лабораторных стендов: у студентов

происходит тактильное восприятие оборудования промышленной автоматизации, вырабатываются требуемые навыки подключения модулей, датчиков, исполнительных механизмов.

3. Публикации, где описано применение лабораторных стендов промышленной автоматизации в конкретных приложениях. В работе [10] программируемое реле используется для управления эмулятором печи, в [11] описан процесс автоматизации насосных установок. Такие лабораторные комплексы отличаются стационарностью и ориентированием на решение конкретной прикладной задачи автоматизации.

Предложенное в данной работе описание учебно-исследовательского лабораторного стенда промышленной автоматизации есть продолжение исследований, начатых в вышеописанных работах, с акцентом на универсальность, многофункциональность и мобильность лабораторного стенда.

### **Подбор оборудования для лабораторного стенда промышленной автоматизации**

Егорьевский технологический институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ЕТИ ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН») располагается в городском округе Егорьевск Московской области в 70 км от Москвы и на сегодняшний день является единственным технологическим институтом юго-восточной части Московской области. На территории городского округа Егорьевска осуществляют свою деятельность более 25 крупных промышленных предприятий с ежегодной выручкой от 5 млрд руб. и количеством работников от 1000 сотрудников. Направленность промышленной деятельности предприятий очень разнообразна: от производства обуви, пищевых продуктов, теплоизоляционных материалов до фармацевтического производства, производства специальных машин и оборудования. Потребность экономики только городского округа Егорьевск в высококвалифицированных кадрах, включая спе-

специалистов в области промышленной автоматизации, составляет порядка 900 сотрудников в год, и эта цифра с каждым годом имеет тенденцию только к росту [12–14]. Анализ, проведённый сотрудниками кафедры технологий автоматизированного производства ЕТИ ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН» в 2022–2023 гг., показал, что после ухода с российского рынка таких брендов, как Siemens, Schneider Electric, Mitsubishi Electric, ABB и др., более чем 60 % предприятий округа приняли решение проводить мероприятия по промышленной автоматизации на базе программируемых логических контроллеров (серии СПК1хх, ПЛК200) и программируемых реле российского производства (серия ПР200). Очевидно, что подготовка будущих специалистов в области автоматизации промышленных технологий и производств с использованием точно такого же оборудования, которое применяется промышленными предприятиями, позволит молодым инженерам приобрести требуемый опыт решения конкретных производственных задач без каких-либо адаптационных проблем на предприятиях.

Программируемые реле — это интеллектуальные устройства, которые в техническом плане являются следующим эволюционным шагом после устройств автоматики, реализованных на базе релейных и бесконтактных логических элементов. Внедрение систем автоматизации на базе программируемых реле существенно повышает эффективность производства, а также обеспечивает контроль параметров технологического процесса с формированием требуемых управляющих воздействий исполнительным механизмом. На сегодняшний день системы управления на базе программируемых реле уже реализуются с элементами систем искусственного интеллекта, что приводит к существенному повышению потенциальных возможностей систем автоматизированного управления в целом [15, 16].

Преимущественное использование программируемого реле российского производства ПР200-24.2.0.0 (далее по тексту ПР200) промышленными предприятиями юго-восточной части Московской области при реализации проектов автоматизации с учётом

работ [6–11] явилось обоснованием для выбора компонентной базы для лабораторного стенда промышленной автоматизации.

ПР200 — программируемое реле, оснащённое монохромным текстовым жидкокристаллическим индикатором 2 x 16 символов. Основные области применения автоматизированных систем управления технологическим оборудованием на базе ПР200 [17]:

- управление насосами, промышленными вентиляторами, компрессорами и др.;
- управление системами водоснабжения;
- управление системами отопления;
- управление системами дренажа;
- управление системами освещения;
- управление подъёмниками и конвейерными системами и т.д.

Основные технические характеристики ПР200 представлены в таблице 1.

Для увеличения функциональных возможностей и расширения спектра областей применения в лабораторном стенде был применён дополнительный модуль расширения ПРМ-24.2, увеличивающий количество аналоговых входов и дискретных выходов. Основные технические характеристики модуля расширения ПРМ-24.2 представлены в таблице 2 [18].

Для питания стабилизированным напряжением 24 В программируемого реле ПР200, а также модуля расширения ПРМ-24.2 в лабораторном стенде был предусмотрен блок питания БП120К-24 номинальной мощности 120 Вт.

Для реализации на лабораторном стенде реальных проектов промышленной автоматизации стенд был укомплектован следующими датчиками: ДТС125Л-РТ1000.В2.100 (термопреобразователь сопротивления); ОК50-DI0100S3.U1.K (датчик оптический); PS2-12M55-8N11-K (датчик индуктивный).

#### **Функциональная и структурная схемы лабораторного стенда**

Функциональная схема лабораторного стенда на базе программируемого реле ПР200 представлена на рисунке 1.

Питание лабораторного стенда осуществляется от сети переменного однофазного

**Таблица 1.** Технические характеристики программируемого реле ПР200**Table 1.** Technical characteristics of the programmable relay PR200

Среда программирования	Owen Logic
Память ПЗУ	128 кБайт
Память ОЗУ	32 кБайт
Интерфейс программирования	miniUSB
Диапазон постоянного напряжения питания	19–30 В (номинальное 24 В)
Количество дискретных входов	8
Количество аналоговых входов	4
Тип измеряемых сигналов	0–10 В, 4–20 мА, 0–4 кОм
Разрешающая способность АЦП	12 бит
Количество дискретных выходов	8
Количество аналоговых выходов	2
Протокол связи	Modbus RTU/ASCII
Режим работы	Master/Slave

**Таблица 2.** Технические характеристики модуля расширения ПРМ-24.2**Table 2.** Technical characteristics of the expansion module PRM-24.2

Диапазон постоянного напряжения питания	9–30 В (номинальное 24 В)
Потребляемая мощность	не более 4 Вт
Количество аналоговых входов	4
Тип измеряемых сигналов	4–20 мА, 0–10 В, Pt1000, NTC, PTC, 0–300 кОм и др.
Количество дискретных выходов	4

**Рисунок 1.** Функциональная схема лабораторного стенда**Figure 1.** Functional diagram of the laboratory stand

напряжения 220 В. В лабораторном стенде реализована схема аварийного отключения (ручной режим) и защиты цепи (автоматический режим) для отключения питания ~ 220 В при возникновении нештатной ситуации. Блок питания БП120К-24 осуществляет автономное питание программируе-

мого реле ПР200 и модуля расширения ПРМ-24.2 постоянным напряжением +24 В. Для подключения датчиков и устройств с питанием +5 В (например для реализации на лабораторном стенде проектов с использованием платформы Arduino [19]) в схеме стенда реализован делитель напряжения

+24 В/ +5 В. Блок выводов содержит набор аналоговых и дискретных входов-выходов для подключения различных датчиков и исполнительных механизмов при реализации проектов автоматизации.

Структурная схема лабораторного стенда на базе ПР200 представлена на рисунке 2.

**Монтаж лабораторного стенда и оценка экономической составляющей создания лабораторного стенда**

Электромонтаж лабораторного стенда осуществлён с учётом требований ГОСТ Р 50571.1-2009 (МЭК 60364-1:2005) [20]. Размеры щита, основания для монтажа электрооборудования, составляют 0,82 м × 0,7 м. Щит закреплён на двух сварных металлических стойках, сделанных из металлического уголка размерами 0,04 м × 0,04 м × 0,004 м. Основное оборудование установлено на стандартную DIN рейку шириной 0,035 м, которая закреплена непосредственно на щите лабораторного стенда. При монтаже

применялись два вида провода сечением 0,75 мм<sup>2</sup> и 4 мм<sup>2</sup>. Монтаж лабораторного стенда произведён одним сотрудником кафедры в течение десяти рабочих дней.

Полный перечень комплектующих, применяемых при монтаже лабораторного стенда, представлен в таблице 3.

Внешний вид стенда представлен на рисунке 3.

На стенде предусмотрено свободное место на DIN рейке для удобного размещения дополнительного оборудования, требуемого для реализации конкретного проекта автоматизации.

Оценка экономической составляющей изготовления стенда представлена в таблице 4.

Анализ, проведённый сотрудниками кафедры технологий автоматизированного производства ЕТИ ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», показал, что уровень цен на лабораторные стенды с похожим функционалом от специализированных компаний-производителей стендов начинается от

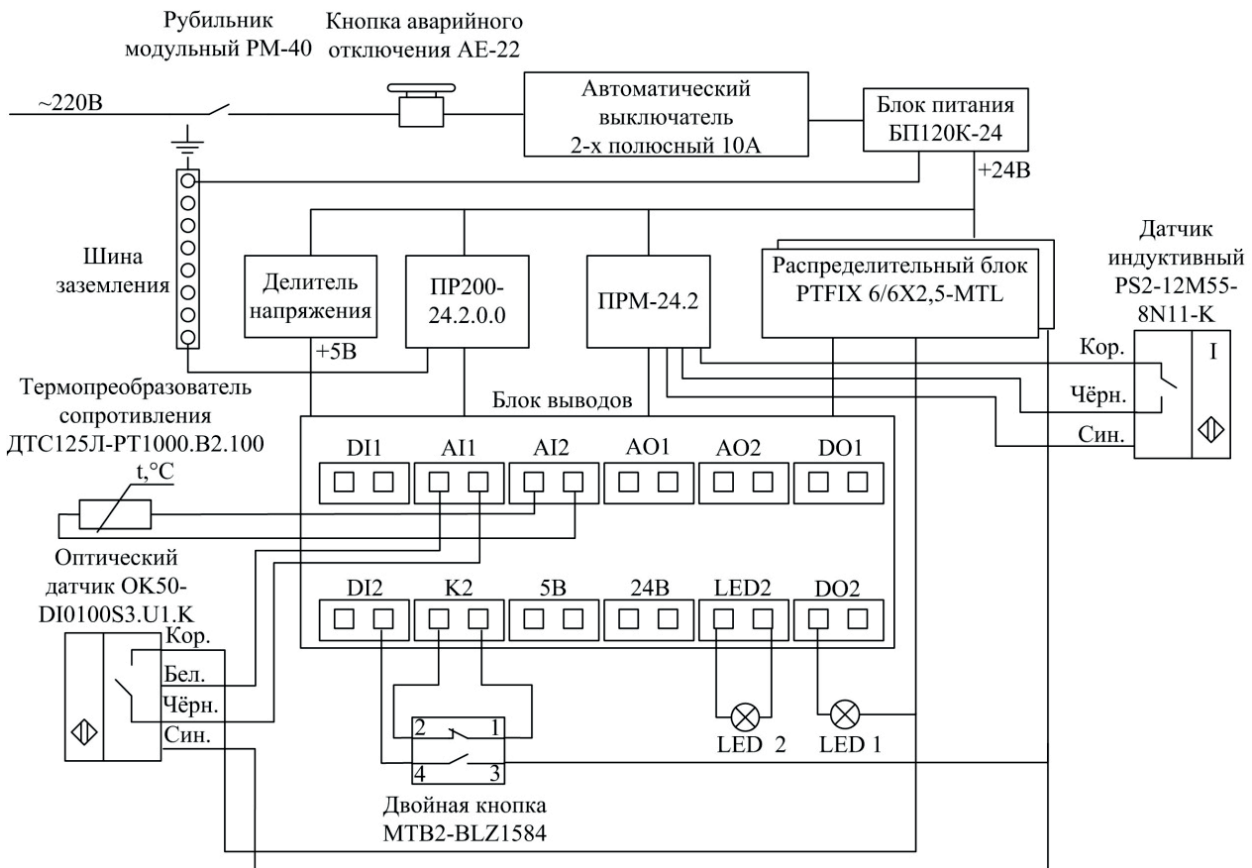


Рисунок 2. Структурная схема лабораторного стенда

Figure 2. Block diagram of the laboratory stand

**Таблица 3.** Перечень комплектующих лабораторного стенда**Table 3.** List of laboratory stand components

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Количество
1	ПР200-24.2.0.0 программируемое реле	шт.	1
2	ПРМ-24.2 модуль расширения	шт.	1
3	БП120К-24 блок питания	шт.	1
4	Выключатель автоматический 2-полюсный 10А	шт.	1
5	РМ-40 рубильник модульный 3-полюсный 40А	шт.	1
6	МТВ2-BLZ1584 кнопка двойная, красный/зелёный	шт.	1
7	АЕ-22 кнопка управления «Грибок» d22 мм с фиксацией	шт.	1
8	PTFIX 6/6x2,5-MTL распределительный блок	шт.	2
9	PTFIX-NS35 адаптер для монтажной рейки	шт.	2
10	MT22-S13 сигнальная LED лампа, зелёный, 24 V	шт.	1
11	MT22-S14 сигнальная LED лампа, красный, 24 V	шт.	1
12	Терминал на 2 зажима 24 x 53 мм	шт.	12
13	Монтажная DIN рейка 0,35 мм длина 30 см	шт.	1
14	Монтажная DIN рейка 0,35 мм длина 60 см	шт.	2
15	Ограничитель на DIN-рейку	шт.	8
16	Шина заземления 8 контактов	шт.	1
17	Кабель-канал перфорированный 25 x 25 x 2000 мм	шт.	1
18	Провод ШВВП 0,75 мм <sup>2</sup> ККЗ	м	50
19	Провод ПуГВ/ПВ 4 мм <sup>2</sup> РЭК	м	2,5
20	Обжимные клеммы для проводов, РПм 5,6 мм	шт.	24
21	Изолятор 5,6 мм	шт.	24
22	ДТС125Л-РТ1000.В2.100 термопреобразователь сопротивления	шт.	1
23	ОК50-DI0100S3.U1.К датчик оптический	шт.	1
24	PS2-12M55-8N11-К датчик индуктивный	шт.	1

**Рисунок 3.** Внешний вид лабораторного стенда**Figure 3.** The appearance of the laboratory stand

**Таблица 4.** Оценка экономической составляющей изготовления лабораторного стенда**Table 4.** Assessment of the economic component of the manufacture of a laboratory stand

№ п/п	Основные статьи затрат	Стоимость, руб.
1	Стоимость комплектующих	62 860
2	Стоимость материалов и работ на изготовление щита и стоек	9 500
3	Оплата труда сотрудника кафедры, осуществляющего монтаж стенда, в течение 10 рабочих дней	20 000
	Итого:	92 360 руб.

180 000 руб. за 1 лабораторный стенд со сроком поставки от 2 мес. Представленный в данной работе лабораторный стенд имеет практически двукратную экономическую выгоду по сравнению с ценами на лабораторные стенды от специализированных компаний.

### Выводы

1. Представленный учебно-исследовательский лабораторный стенд промышленной автоматизации на базе программируемого реле ПР200 является универсальным, многофункциональным, мобильным стендом, предназначенным для реализации многоуровневых задач промышленной автоматизации. Разработка и производство стенда силами сотрудников кафедры направления промышленной автоматизации экономически оправдана и осуществляется в короткий промежуток времени (не более 1 мес.).

2. На кафедре технологий автоматизированного производства ЕТИ ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН» лабораторный стенд внедрён в учебный процесс при проведении лабораторных и практических занятий по следующим дисциплинам: «Механика и управление» (4 семестр), «Электротехника и электроника» (5, 6 семестры), «Средства автоматизации и управления» (8 семестр). Уже со 2 года обучения студенты проходят теоретико-практическую подготовку работы с современным оборудованием промышлен-

ной автоматизации, начиная с освоения программной среды для программирования реле и заканчивая созданием реальных проектов автоматизации (управление асинхронным электродвигателем, управление гидро-, пневмоустройствами, управление светодиодным промышленным освещением и др.). Непрерывность и сбалансированность теоретико-практической подготовки студентов с использованием лабораторного стенда способствуют приобретению обучающимися требуемых для дальнейшей трудовой деятельности навыков работы с современным оборудованием. Кроме того, обучающиеся выпускных курсов имеют возможность проводить натурное моделирование системы автоматизации с применением лабораторного стенда в рамках выполнения научно-исследовательской работы и подготовки выпускной квалификационной работы. Стенд также может использоваться в качестве наглядного пособия при решении задач профориентационной направленности во внеаудиторных помещениях.

3. Проект по созданию лабораторного стенда может быть масштабирован с минимальными финансовыми вложениями кафедрами направления промышленной автоматизации других высших учебных заведений нашей страны без существенных затрат временных ресурсов на подготовительную и исследовательскую части.



## Список источников

1. Распоряжение Правительства РФ от 20.05.2023 N 1315-р «Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года». URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_447895/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_447895/) (дата обращения: 12.04.2024).
2. Семенова В.В., Секерин В.Д., Горохова А.Е. Особенности развития инновационной инфраструктуры в условиях цифровой экономики // Развитие экономики Российской Федерации в условиях формирования технологического суверенитета: актуальные вопросы теории и практики: сб. докл. региональн. науч.-практ. конф., 2023. С. 279-282. EDN: GBAEZW.
3. Афанасьев А.А. Технологический суверенитет: основные направления политики по его достижению в современной // Вопросы инновационной экономики. 2022. Т. 12. № 4. С. 2193-2212. DOI: 10.18334/vines.12.4.116433. EDN: GK KYMJ.
4. Селевцов Л.И. Автоматизация технологических процессов. М.: Академия, 2014. 352 с.
5. Лоева Я.А., Гольцова П.А. Технологическая безработица // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 10-1. С. 82-84. EDN: XAFOZR.
6. Абдулин Д.Р., Абрамов Н.А., Гусельман Г.А., Караваев М.А., Милованов К.Ю. Программируемое реле // Современные научные исследования и инновации. 2021. № 9. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2021/09/96550>. EDN: WWWNLC (дата обращения: 12.04.2024).
7. Долидзе А.Н. Сравнительный анализ ключевых особенностей контроллеров Siemens LOGO! и ОВЕН ПР200, с целью взаимозамещения в учебном процессе // Инженерный вестник Дона, 2023, № 7. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n7y2023/8569> (дата обращения: 12.04.2024).
8. Митин В.А., Соколов Д.Ю., Савчиц А.В. Обзор и сравнение двух разрабатываемых стендов по направлению обучения работы с ПЛК как двух разных подходов (методов) обучения // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 5. С. 68-71. EDN: IUNJBZ.
9. Корзин В.В., Силаева Е.Ю., Еремина Е.Л. Сравнительный анализ виртуальных и физических лабораторных стендов по электротехнике // Постулат. 2019. № 4. URL: <https://e-postulat.ru/index.php/Postulat/article/view/2586> (дата обращения: 12.04.2024).
10. Кислицын Н.А., Акчурин Д.Ш., Баширов М.Г. Лабораторный комплекс на основе микропроцессорных средств компании «ОВЕН» // Южно-Сибирский научный вестник. 2021. № 2. С. 109-114. DOI: 10.25699/SSSB.2021.36.2.016. EDN: KLQMVA.
11. Кизуров А.С., Козлов А.В. Учебный стенд по обучению автоматизации насосных установок для АПК // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 2. С. 137-140. EDN: SCVAXJ.
12. Кудинова С.Г. Анализ потенциала и перспектив социально-экономического развития муниципального образования // Вестник ГГУ. 2022. № 1. С. 52-65. EDN: QSLOUI.
13. Официальный сайт Администрации городского округа Егорьевск. URL: <https://egoradmin.ru/> (дата обращения: 12.04.2024).
14. Официальный сайт Министерства экономики и финансов Московской области. URL: <https://mef.mosreg.ru/> (дата обращения: 12.04.2024).
15. Герасимов А.В. Программируемые логические контроллеры. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2008. 169 с. EDN: ZGARUL.
16. Минаев И.Г., Самойленко В.В, Ушкур Д.Г., Федоренко И.В. Свободно программируемые устройства в автоматизированных системах управления. Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2016. 168 с. ISBN: 978-5-9596-1222-1.
17. Устройство управляющее многофункциональное ПР200. Руководство по эксплуатации. М.: Овен, 2017. 92 с. URL: [http://www.owen.ru/uploads/re\\_pr200\\_2099.pdf](http://www.owen.ru/uploads/re_pr200_2099.pdf) (дата обращения: 12.04.2024).
18. Модуль расширения аналоговых входов и дискретных выходов ПРМ-Х.2. Руководство по эксплуатации. М.: Овен, 2021. 36 с. URL: [https://owen.ru/downloads/re\\_prm-2.pdf](https://owen.ru/downloads/re_prm-2.pdf) (дата обращения: 12.04.2024).
19. Петин В.А. 77 проектов для Arduino. М.: ДМК Пресс. 2020. 356 с. ISBN: 978-5-97060-697-1.
20. ГОСТ Р 50571.1-2009. Электроустановки низковольтные. Часть 1. Основные положения, оценка общих характеристик, термины и определения. М.: Стандартинформ. 2010. 55 с.

## References

1. *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 20.05.2023 N 1315-r «Ob utverzhdenii Kontseptsii tekhnologicheskogo razvitiya na period do 2030 goda»* [Order of the Government of the Russian Federation dated May 20, 2023 N 1315-r «On Approval of the Concept of Technological Development for the Period up to 2030»]. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_447895/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_447895/) (accessed 12.04.2024). [in Russian].

2. Semenova V.V., Sekerin V.D., Gorokhova A.E. Osobennosti razvitiya innovatsionnoi infrastruktury v usloviyakh tsifrovoi ekonomiki [Features of the Development of Innovative Infrastructure in the Conditions of the Digital Economy]. *Sbornik dokladov regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Razvitie ekonomiki Rossiiskoi Federatsii v usloviyakh formirovaniya tekhnologicheskogo suvereniteta: aktual'nye voprosy teorii i praktiki»* [Collection of Reports of the Regional Scientific and Practical Conference «Development of the Economy of the Russian Federation in the Conditions of the Formation of Technological Sovereignty: Current Issues of Theory and Practice»], 2023, pp. 279-282. EDN: GBAEZW. [in Russian].
3. Afanas'ev A.A. Tekhnologicheskii suverenitet: osnovnye napravleniya politiki po ego dostizheniyu v sovremennoi Rossii [Technological Sovereignty: the Main Policies to Achieve It in Modern Russia]. *Voprosy innovatsionnoi ekonomiki — Russian Journal of Innovation Economics*, 2022, Vol. 12, No. 4, pp. 2193-2212. DOI: 10.18334/vinec.12.4.116433. EDN: GK KYMJ. [in Russian].
4. Selevtsov L.I. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov* [Automation of Technological Processes]. Moscow, Akademiya Publ., 2014. 352 p. [in Russian].
5. Loeva Ya.A., Gol'tsova P.A. Tekhnologicheskaya bezrabotitsa [Technological Unemployment]. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii — Modern Trends in the Development of Science and Technology*, 2016, No. 10-1, pp. 82-84. EDN: XAFOZR. [in Russian].
6. Abdulin D.R., Abramov N.A., Gusel'man G.A., Karavaev M.A., Milovanov K.Yu. Programmi-ruemoe rele [Programmable Relay]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii — Modern Scientific Research and Innovation*, 2021, No. 9. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2021/09/96550>. EDN: WWWNLC (accessed 12.04.2024). [in Russian].
7. Dolidze A.N. Sravnitel'nyi analiz klyuchevykh osobennostei kontrollerov Siemens LOGO! i OVEN PR200, s tsel'yu vzaimozameshcheniya v uchebnom protsesse [Comparative Analysis of Key Features of Controllers PR200 by OWEN and Controllers LOGO! by Siemens for the Purpose of Mutual Substitution in the Educational Process]. *Inzhenernyi vestnik Dona — Engineering Bulletin of the Don*, 2023, No. 7. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n7y2023/8569> (accessed 12.04.2024). [in Russian].
8. Mitin V.A., Sokolov D.Yu., Savchits A.V. Obzor i sravnenie dvukh razrabatyvaemykh stendov po napravleniyu obucheniya raboty s PLK kak dvukh raznykh podkhodov (metodov) obucheniya [Review and Comparison of Two Stands under Development in the Field of Training in Working with PLC, as Two Different Training Approaches (Methods)]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya — Scientific-Technical Bulletin of the Volga Region*, 2020, No. 5, pp. 68-71. EDN: IUNJBZ. [in Russian].
9. Korzin V.V., Silaeva E.Yu., Eremina E.L. Sravnitel'nyi analiz virtual'nykh i fizicheskikh laboratornykh stendov po elektrotekhnike [Comparative Analysis of Virtual and Physical Laboratory Stands in Electrical Engineering]. *Postulat — Postulat*, 2019, No. 4. URL: <https://e-postulat.ru/index.php/Postulat/article/view/2586> (accessed 12.04.2024). [in Russian].
10. Kislitsyn N.A., Akchurin D.Sh., Bashirov M.G. Laboratornyi kompleks na osnove mikroprotsessornykh sredstv kompanii «OVEN» [Laboratory Complex Based on Microprocessor Facilities of «OWEN» Company]. *Yuzhno-Sibirskii nauchnyi vestnik — South-Siberian Scientific Bulletin*, 2021, No. 2, pp. 109-114. DOI: 10.25699/SSSB.2021.36.2.016. EDN: KLQMVА. [in Russian].
11. Kizurov A.S., Kozlov A.V. Uchebnyi stend po obucheniyu avtomatizatsii nasosnykh ustanovok dlya APK [The Training Stand to Instruct the Automatic Operation of Pumping Units for the Agroindustrial Complex]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta — Bulletin of the Orenburg State Agrarian University*, 2019, No. 2, pp. 137-140. EDN: SCVAXJ. [in Russian].
12. Kudinova S.G. Analiz potentsiala i perspektiv sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya munitsipal'nogo obrazovaniya [Analysis of the Potential and Prospects for the Socio-Economic Development of the Municipality]. *Vestnik GGU — VESTNIK GSU*, 2022, No. 1, pp. 52-65. EDN: QSLOUI. [in Russian].
13. *Ofitsial'nyi sait Administratsii gorodskogo okruga Egor'evsk* [Official Website of the Administration of the Yegoryevsk Urban District]. URL: <https://egoradmin.ru/> (accessed 12.04.2024). [in Russian].
14. *Ofitsial'nyi sait Ministerstva ekonomiki i finansov Moskovskoi oblasti* [Official Website of the Ministry of Economy and Finance of the Moscow Region]. URL: <https://mef.mosreg.ru/> (accessed 12.04.2024). [in Russian].
15. Gerasimov A.V. *Programmiruemye logicheskie kontrollery* [Programmable Logic Controllers]. Kazan', Kazanskii natsional'nyi issledovatel'skii tekhnologicheskii universitet. 2008. 169 p. EDN: ZGARUL. [in Russian].

16. Minaev I.G., Samoilenko V.V, Ushkur D.G., Fedorenko I.V. *Svobodno programmiruemye ustroystva v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya* [Freely Programmable Devices in Automated Control Systems]. Stavropol', Stavropol'skii gosudarstvennyi agrarnyi universitet, 2016. 168 p. ISBN: 978-5-9596-1222-1. [in Russian].

17. *Ustroystvo upravlyayushchee mnogofunktional'noe PR200. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Multifunctional Control Device PR200. Manual]. Moscow, Owen Publ., 2017. 92 p. URL: [http://www.owen.ru/uploads/re\\_pr200\\_2099.pdf](http://www.owen.ru/uploads/re_pr200_2099.pdf) (accessed 12.04.2024).

18. *Modul' rasshireniya analogovykh vkhodov i diskretnykh vykhodov PRM-Kh.2. Ruko-vodstvo po ekspluatatsii* [Expansion Module for Analog

Inputs and Discrete Outputs PRM-X.2. Manual]. Moscow, Owen Publ., 2021. 36 p. URL: [https://owen.ru/downloads/re\\_prm-2.pdf](https://owen.ru/downloads/re_prm-2.pdf) (accessed 12.04.2024). [in Russian].

19. Petin V.A. *77 proektov dlya Arduino* [77 Projects for Arduino]. Moscow, DMK Press Publ., 2020. 356 p. ISBN: 978-5-97060-697-1. [in Russian].

20. *GOST R 50571.1-2009. Elektroustanovki nizkovol'tnye. Chast' 1. Osnovnye polozheniya, otsenka obshchikh kharakteristik, terminy i opredeleniya* [State Standard R 50571.1-2009. Low-Voltage Electrical Installations. Part 1: Fundamental Principles, Assessment of General Characteristics and Definitions]. Moscow, Standartinform Publ. 2010. 55 p. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 15.04.2024; одобрена после рецензирования 17.04.2024; принята к публикации 24.04.2024.*

*The article was submitted 15.04.2024; approved after reviewing 17.04.2024; accepted for publication 24.04.2024.*

Научная статья

УДК 502.3

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-2-115-122

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

*Екатерина Сергеевна Кулакова**Ekaterina S. Kulakova**кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Стерлитамаке), Стерлитамак, Россия**Асель Марсовна Батыркаева**Asel M. Baturkaeva**ассистент кафедры «Прикладная экология», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия*

### Актуальность

Работа представляет собой описание разработки системы экологического мониторинга атмосферы с возможностью использования искусственной нейронной сети для составления прогноза концентраций веществ на различной высоте. В исследовании рассматриваются основные принципы функционирования нейронных сетей и их интеграция в систему экологического мониторинга.

### Цель исследования

Рассмотреть создание системы контроля состояния атмосферы с использованием прогностических возможностей нейронной сети. В рамках исследования будет рассмотрено, какие проблемы можно решить с помощью нейронных сетей, какие данные необходимы для обучения модели, а также какие преимущества и недостатки имеет такой подход.

### Методы исследования

В этапах разработки системы экологического мониторинга рассматриваются выбор системы сбора, обработки и отображения данных в режиме реального времени (SCADA-система), сбор обучающих данных, выбор среды разработки нейронной сети, определение её архитектуры, оценка работоспособности, а также интеграция SCADA-системы с нейронной сетью через платформу системы управления базой данных.

### Результаты

Описан процесс сбора данных о состоянии атмосферного воздуха, отображения их в системе, а также продемонстрирована работа ней-

### Ключевые слова

мониторинг атмосферного воздуха, искусственная нейронная сеть, системы экологического мониторинга, SCADA-система, интегрированная среда PyCharm

ронной сети для прогнозирования уровня загрязнения атмосферы на заданной оператором высоте над уровнем моря. В статье подчеркивается эффективность использования нейронной сети в экологическом мониторинге благодаря ее способности к обработке больших объемов данных и выявлению сложных зависимостей. Представленные результаты исследования подтверждают значимость использования современных технологий, таких как нейронные сети, для повышения точности и эффективности систем экологического мониторинга.

**Для цитирования:** Кулакова Е. С., Батыркаева А. М. Разработка системы экологического мониторинга атмосферы с использованием возможностей нейронной сети // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2024. № 2. Т. 20. С. 115-122. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-115-122>.

Original article

## DEVELOPMENT OF THE SYSTEM OF ECOLOGICAL MONITORING OF THE ATMOSPHERE USING NEURAL NETWORK CAPABILITIES

### Relevance

The work is a description of the development of a system of environmental monitoring of the atmosphere with the possibility of using an artificial neural network to make predictions of concentrations of substances at different altitudes. The study considers the basic principles of neural networks functioning and their integration into the environmental monitoring system.

### Aim of research

Aim of research is to consider the creation of a system for controlling the state of the atmosphere using the predictive capabilities of a neural network. The study will consider what problems can be solved using neural networks, what data are needed to train the model, and what advantages and disadvantages this approach has.

### Research methods

The stages of environmental monitoring system development include the selection of real-time data acquisition, processing and display system (SCADA-system), collection of training data, selection of neural network development environment, determination of its architecture, performance evaluation, and integration of SCADA-system with neural network through database management system platform.

### Results

The process of collecting data on the state of atmospheric air, displaying them in the system is described, and the work of neural network for predicting the level of atmospheric pollution at the height above sea level set by the operator is demonstrated. The article emphasizes the effectiveness of using neural network in environmental monitoring due to its ability to process large amounts of data and identify complex dependencies. The presented research results confirm the significance of using modern technologies, such as neural networks, to improve the accuracy and efficiency of environmental monitoring systems.

### Keywords

atmospheric air monitoring, artificial neural network, environmental monitoring systems, SCADA-system, PyCharm integrated environment

**For citation:** Kulakova E. S., Batyркаева А. М. Razrabotka sistemy ekologicheskogo monitoringa atmosfery s ispol'zovaniem vozmozhnostei neironnoi seti [Development of the System of Ecological Monitoring of the Atmosphere Using Neural Network Capabilities]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — Electrical and Data Processing Facilities and Systems, 2024, No. 2, Vol. 20, pp. 115-122 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-115-122>.

## Введение

В современном мире проблема охраны окружающей среды становится все более актуальной и требует разработки и модернизации различных систем контроля за состоянием всей экологической системы. Особенно важно контролировать качество атмосферы, так как загрязнение воздуха негативно влияет на здоровье людей и окружающую среду. Для эффективного решения этой проблемы разработка усовершенствованной системы экологического мониторинга становится все более востребованной.

Одним из перспективных направлений в этой области является использование возможностей нейронных сетей. Нейронные сети — это математические модели, которые имитируют работу человеческого мозга и способны обучаться на больших объемах данных [1]. Их применение в системах мониторинга позволяет повысить точность и эффективность анализа информации о состоянии окружающей среды.

Целью исследования является создание системы контроля состояния атмосферы с использованием прогностических возможностей нейронной сети. В рамках исследования будет рассмотрено, какие проблемы можно решить с помощью нейронных сетей, какие данные необходимы для обучения модели, а также какие преимущества и недостатки имеет такой подход.

Исследование представляет собой описание этапов разработки системы экологического мониторинга, а также применение этой системы на практике. Акцент будет сделан на том, как использование нейронной сети может повысить информативность о состоянии воздушной среды.

В этапах разработки системы экологического мониторинга расписываются выбор системы сбора [2, 3], обработки и отображения данных в режиме реального времени (SCADA-система), сбор обучающих данных, выбор среды разработки нейронной сети, определение её архитектуры, оценка работоспособности, а также интеграция SCADA-системы с нейронной сетью через платформу системы управления базой данных (СУБД).

## Нейронная сеть

### Сбор данных

Первым этапом разработки нейронной сети является сбор обучающих данных. Для этого были сняты показания метеорологических параметров (атмосферное давление, температура окружающей среды, влажность воздуха, скорость и направление ветра) и значений концентрации загрязнителей ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ ) в разную погоду и на разных высотах [4, 5].

Измерения проводились в пределах высот от 116,8 до 136,8 м над уровнем моря, что соответствует диапазону от 0 до 20 м от поверхности земли. Для загрязнителей были установлены следующие значения концентрации:

- диоксид азота ( $\text{NO}_2$ ) от 0 до 1,28 мг/м<sup>3</sup>;
- диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ) от 0 до 0,04 мг/м<sup>3</sup>;
- бензол ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) от 0 до 0,22 мг/м<sup>3</sup>.

Во время наблюдения были установлены следующие погодные условия:

- атмосферное давление 749,46–758,15 мм рт. ст.;
- влажность воздуха 30,1–50,8 %;
- температура окружающей среды 16,08–27,42 °С;
- направление ветра 1,42 – 358,85°;
- скорость ветра 0,01–2,65 м/с.

### Среда разработки

Для разработки нейронной сети использовалась интегрированная среда PyCharm на языке Python. Python — высокоуровневый язык программирования общего назначения с ориентацией на удобство разработчика и качество кода [6]. Для создания нейронных сетей часто используются библиотеки и фреймворки, такие как Keras.

Keras — популярный фреймворк для создания нейронных сетей, который обеспечивает простой интерфейс для создания и обучения моделей глубокого обучения [7]. При разработке нейросети в Python также используются другие библиотеки, такие как numpy, pandas и matplotlib.

Модель нейронной сети представляет собой последовательность слоев, которые создаются с помощью класса Sequential. После создания модель необходимо скопи-

лизовать, указав функцию потерь, оптимизатор и метрики для оценки производительности. Затем модель обучается на тренировочных данных и оценивается на тестовых данных. После этого модель можно использовать для предсказаний на новых данных.

#### Архитектура нейронной сети

Определение архитектуры нейронной сети — это важный этап в ее разработке и обучении. Архитектура (рисунок 1) определяет структуру и организацию сети, включая количество слоев, количество нейронов в каждом слое и типы активационных функций [8].

Входной слой получает данные о погоде, а выходной определяет концентрацию загрязнителей. Оба слоя используют функ-

цию активации — сигмоиду. Для обучения применяется метод градиентного спуска. После обучения модель тестируется на новых данных для оценки её работоспособности.

#### Оценка производительности

После завершения процесса обучения необходимо построить графики зависимостей значения функции потерь (рисунок 2) и средней абсолютной ошибки (рисунок 3) для обучающего и валидационного наборов данных. По рисунку 2 видно, что значения функции потерь плавно снижаются к нулю в течение 200 эпох без скачков или помех.

Аналогично, на рисунке 3 значения средней абсолютной ошибки также равномерно уменьшаются на протяжении обучения.

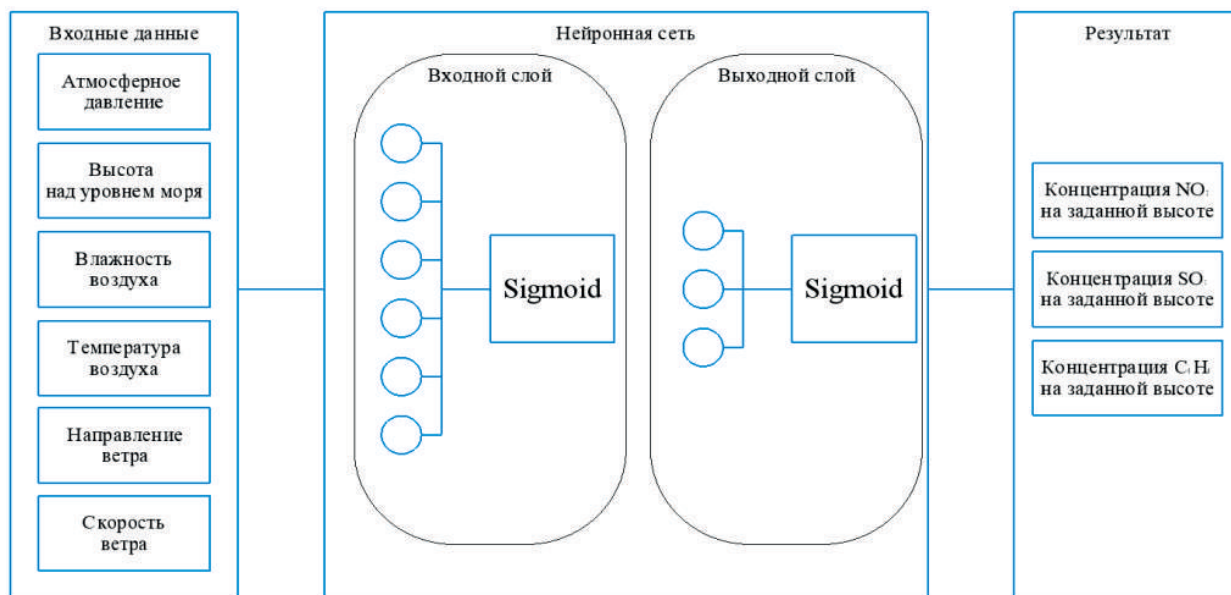


Рисунок 1. Архитектура нейронной сети

Figure 1. Neural network architecture

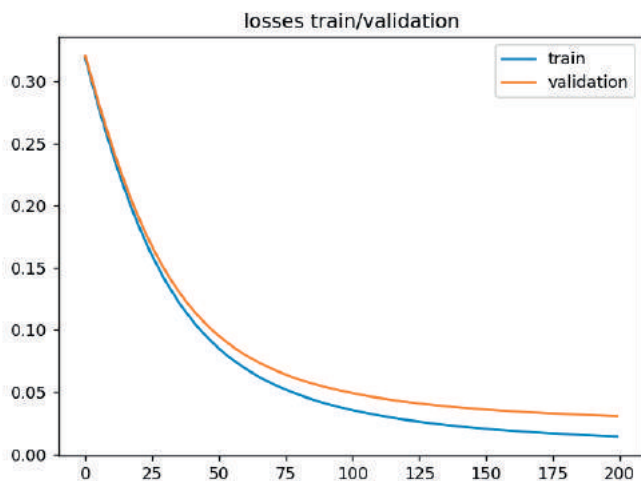
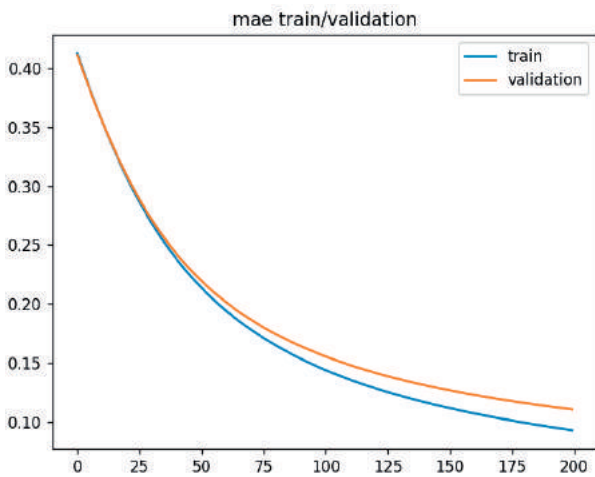


Рисунок 2. Графики зависимости значения функции потерь для обучающего и валидационного наборов данных в течение 200 эпох

Figure 2. Loss function value dependence plots for training and validation datasets over 200 epochs



**Рисунок 3.** Графики зависимости значения средней абсолютной ошибки для обучающего и валидационного наборов данных в течение 200 эпох

**Figure 3.** mean absolute error value dependence plots for training and validation datasets over 200 epochs

Таким образом, результаты построенных графиков зависимостей свидетельствуют о том, что разработанная нейронная сеть является работоспособной для составления прогнозов концентрации загрязнителей на заданной высоте.

**SCADA-система**

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) — это система управления и сбора данных, которая используется для мониторинга и контроля процессов в реальном времени [9]. SCADA-системы обычно включают в себя программное обеспечение,

которое позволяет операторам мониторить процессы, собирать данные, анализировать информацию и управлять оборудованием на удаленных объектах.

*Структура проекта*

В качестве среды разработки SCADA-системы использовалась Trace Mode 7. В ней были созданы такие как мнемосхема (рисунок 4) и прогноза (рисунок 5).

На мнемосхеме отображаются текущие значения метеорологических параметров и концентрации на обеих высотах.



**Рисунок 4.** Окно мнемосхемы системы экологического мониторинга атмосферы

**Figure 4.** Atmosphere environmental monitoring system mnemonic scheme window



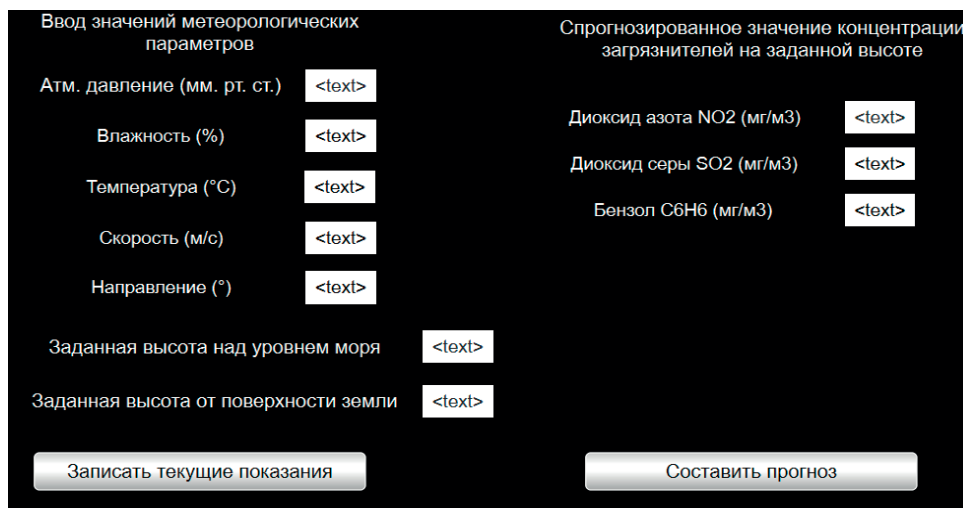


Рисунок 5. Окно прогноза

Figure 5. Forecast window

Окно прогноза позволяет составить прогноз изменения содержания вредных веществ в воздухе на различной высоте с помощью нейросети.

*Интеграция с нейронной сетью*

Для интеграции SCADA-системы с нейронной сетью была проведена реализация данной привязки при помощи платформы СУБД MS SQL Server.

Связь нейронной сети и SCADA-системы с СУБД представлена в виде схемы-алгоритма (рисунок 6).

**Результаты работы разработанной системы**

Результат отображения в системе расчетных концентрации загрязнителей на заданной высоте при определенных погодных условиях представлен на рисунке 7.

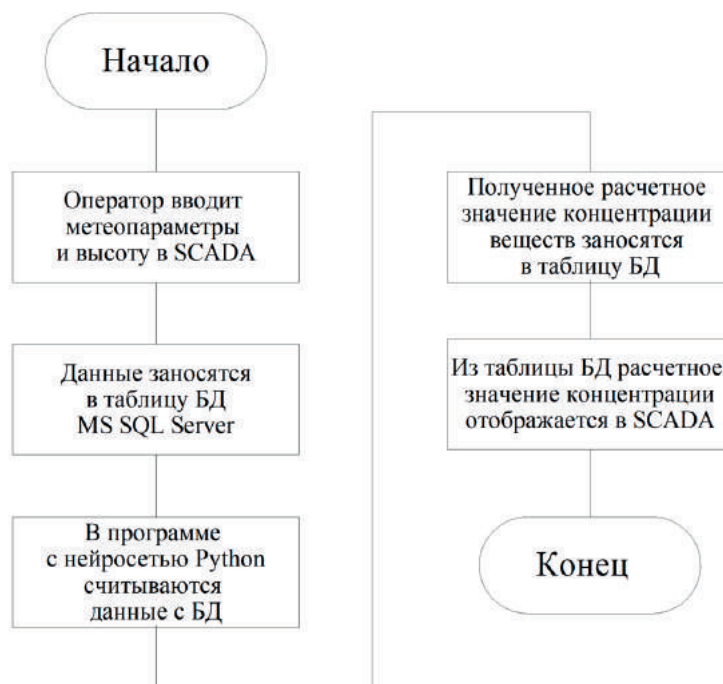


Рисунок 6. Схема-алгоритм связей СУБД со SCADA и нейросетью

Figure 6. Scheme-algorithm of DBMS links with SCADA and neural network

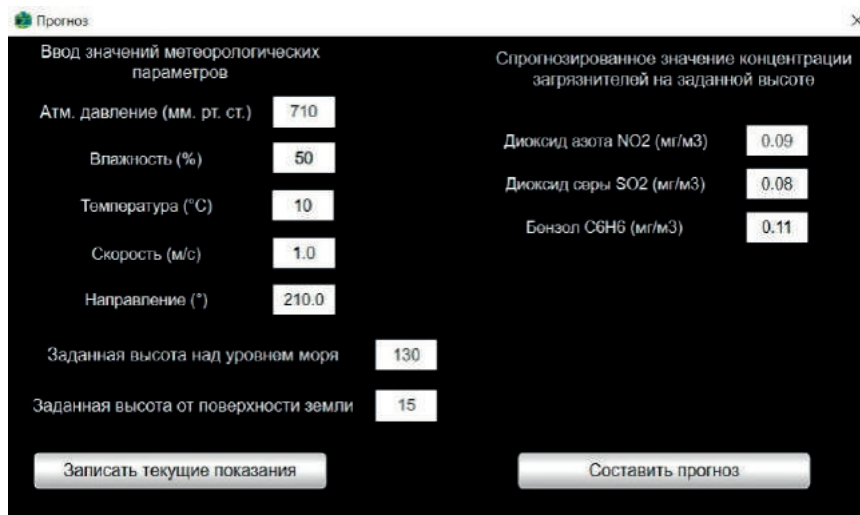


Рисунок 7. Результат прогноза

Figure 7. Prediction result

### Вывод

Таким образом, результат работы разработанной системы экологического мониторинга показывает, что использование возможностей нейронной сети в этой системе

### Список источников

1. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: Пер. с англ. 2-е изд. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с. ISBN: 5-8459-0890-6.
2. Kulakova E.S., Safarov A.M. Automated Control and Control System of Emissions into the Atmospheric Air of Thermoelectric-Power Industries // Journal of Physics: Conference Series: III International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III-2022). Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2022. P. 82001. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/8/082001.
3. Кулакова Е.С., Сафаров А.М., Сафарова В.И. Система автоматизированного отбора пробы атмосферного воздуха // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28, № 3. С. 16-21. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-3-16-21. EDN: RSAYLK.
4. Кулакова Е.С. Бензол и его гомологи в атмосферном воздухе города Бельской мегавпадины Предуральяского прогиба Восточно-Европейской равнины // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2022. № 4. С. 115-124. DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.20.31.013. EDN: ENDASU.
5. Kulakova E.S., Safarov A.M., Kantor E.A. The Influence of the Wind Regime on the Methanol Concentration Change in the Atmospheric Air of

позволяет получить больше информации об изменении состояния атмосферного воздуха с учетом погодных условий и географических особенностей местности (заданное значение высоты над уровнем моря).

the City Residential Area // International Scientific and Practical Conference “Ensuring Sustainable Development in the Context of Agriculture, Green Energy, Ecology and Earth Science” 25 January 2021, Smolensk, Russian Federation. London: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 042048. DOI: 10.1088/1755-1315/723/4/042048. EDN: SNDZSF.

6. Комзалов Е.А. Автоматизация процесса предприятия используя язык программирования Python // Внедрение передового опыта и практическое применение результатов инновационных исследований: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (05 июня 2021 г., г. Новосибирск). Уфа: Аэтерна, 2021. С. 68-71. EDN: XQRRBS.

7. Коул А., Ганджу С., Казам М. Искусственный интеллект и компьютерное зрение. Реальные проекты на Python, Keras и TensorFlow. СПб.: Питер, 2023. 624 с. ISBN: 978-5-4461-1840-3.

8. Полуянович Н.К. Прогнозирование ресурса электроизоляционных материалов силовых кабелей с использованием метода искусственных нейронных сетей. Ростов н/Д–Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2022. 116 с.

9. Кангин В.В., Кангин М.В., Ямолдинов Д.Н. Разработка SCADA-систем. М.–Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 564 с. ISBN: 978-5-9729-1658-0.

## References

1. Khaikin S. *Neironnye seti: polnyi kurs: Per. s angl.* [Neural Networks. A Comprehensive Foundation: Transl. from Engl.]. 2-e izd. Moscow, Izdatel'skii dom «Vil'yams», 2006. 1104 p. ISBN: 5-8459-0890-6. [in Russian].
2. Kulakova E.S., Safarov A.M. Automated Control and Control System of Emissions into the Atmospheric Air of Thermoelectric-Power Industries. *Journal of Physics: Conference Series: III International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III-2022)*. Krasnoyarsk, IOP Publishing Ltd, 2022, pp. 82001. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/8/082001. [in Russian].
3. Kulakova E.S., Safarov A.M., Safarova V.I. Sistema avtomatizirovannogo otbora proby atmosfernogo vozdukha [Automated Air Sampling System]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii — Ecology and Industry of Russia*, 2024, Vol. 28, No. 3, pp. 16-21. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-3-16-21. EDN: RSAYLK. [in Russian].
4. Kulakova E.S. Benzol i ego gomologi v atmosfernom vozduke goroda Bel'skoi megavpadiny Predural'skogo progiba Vostochno-Evropeiskoi ravniny [Benzene and Its Homologs in the Atmospheric Air of the City of Belskoy Megavpadina of the Pre-Ural Trough of the East European Plain]. *Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoi i ekologicheskoi bezopasnosti — Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety*, 2022, No. 4, pp. 115-124. DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.20.31.013. EDN: ENDASU. [in Russian].
5. Kulakova E.S., Safarov A.M., Kantor E.A. The Influence of the Wind Regime on the Methanol Concentration Change in the Atmospheric Air of the City Residential Area. *International Scientific and Practical Conference «Ensuring Sustainable Development in the Context of Agriculture, Green Energy, Ecology and Earth Science»*, 25 January 2021, Smolensk, Russian Federation. London, IOP Publishing Ltd, 2021, pp. 042048. DOI: 10.1088/1755-1315/723/4/042048. EDN: SNDZSF.
6. Komzalov E.A. Avtomatizatsiya protsessa predpriyatiya ispol'zuya yazyk programmirovaniya Python [Enterprise Process Automation Using the Python Programming Language]. *Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Vnedrenie peredovogo opyta i prakticheskoe primenenie rezultatov innovatsionnykh issledovaniy» (05 iyunya 2021 g., g. Novosibirsk)* [Collection of Articles of the International Scientific and Practical Conference «Introduction of Best Practices and Practical Application of Innovative Research Results» (05 June 2021, Novosibirsk)]. Ufa, Aeterna Publ., 2021, pp. 68-71. EDN: XQRRBS. [in Russian].
7. Koul A., Gandzhu S., Kazam M. *Iskusstvennyi intellekt i komp'yuternoe zrenie. Real'nye proekty na Python, Keras i TensorFlow* [Practical Deep Learning for Cloud, Mobile, and Edge. Real-World AI and Computer-Vision Projects Using Python, Keras, and TensorFlow]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2023. 624 p. ISBN: 978-5-4461-1840-3. [in Russian].
8. Poluyanovich N.K. *Prognozirovanie resursa elektroizolyatsionnykh materialov silovykh kabelei s ispol'zovaniem metoda iskusstvennykh neironnykh setei* [Forecasting the Resource of Electrical Insulating Materials of Power Cables Using the Method of Artificial Neural Networks]. Rostov-na-Donu–Taganrog, Izdatel'stvo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2022. 116 p. [in Russian].
9. Kangin V.V., Kangin M.V., Yamoldinov D.N. *Razrabotka SCADA-sistem* [Development of SCADA-Systems]. Moscow–Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2019. 564 p. ISBN: 978-5-9729-1658-0. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 15.06.2024; одобрена после рецензирования 21.06.2024; принята к публикации 26.06.2024.

The article was submitted 15.06.2024; approved after reviewing 21.06.2024; accepted for publication 26.06.2024.

Научная статья

УДК 519.71

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-2-123-128

## СИНТЕЗ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯМИ ВЕРТОЛЕТА В УСЛОВИЯХ СТРУКТУРНОЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

**Алина Александровна Зайцева****Alina A. Zaitseva**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

**Матвей Владимирович Белявцев****Matvey V. Belyavtsev**

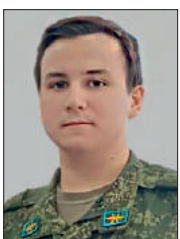
студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

**Евгений Артемович Зайцев****Evgeny A. Zaitsev**

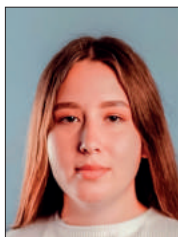
студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

**Дмитрий Константинович Кильмаков****Dmitriy K. Kilmakov**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

**Дим Ринатович Култаев****Dim R. Kultaev**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия



**Залия Раилевна Сайфутдинова**

**Zaliya R. Sayfutdinova**

*студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия*

### **Актуальность**

Рассматривается задача синтеза алгоритма управления двигателем вертолета в условиях структурной и параметрической неопределенности, возникающей при переходе на ручной режим управления и при последующем возврате на исходный автоматический режим.

Актуальность данного исследования заключается в разработке метода синтеза многорежимной системы управления каждым из двигателей силовой установки вертолета на основе принципа нечеткой стабилизации в условиях структурной и параметрической неопределенности, обеспечивающего желаемое поведение всего ансамбля управляемых переменных при переходе на ручной режим управления с последующим возвратом на исходный автоматический режим.

### **Цель исследования**

Цель исследования состоит в повышении эффективности системы управления силовой установкой вертолета за счет согласования режимов работы двигателей при одновременном поддержании в заданных пределах требуемых значений основных газодинамических параметров.

Задача исследования заключается в разработке метода синтеза алгоритма управления двигателями вертолета на основе принципа нечеткой стабилизации в условиях структурной и параметрической неопределенности, возникающей при переходе на ручной режим управления с последующим возвратом на исходный автоматический режим.

### **Методы исследования**

Поставленная задача решалась с использованием методов системного анализа, теории систем автоматического управления, линейной алгебры, функционального анализа, нечетких множеств, компьютерного моделирования.

### **Результаты**

Разработан метод синтеза многорежимной системы управления каждым из двигателей силовой установки вертолета на основе принципа нечеткой стабилизации в условиях структурной и параметрической неопределенности, обеспечивающий желаемое поведение всего ансамбля управляемых переменных при переходе на ручной режим управления с последующим возвратом на исходный автоматический режим.

### **Ключевые слова**

синтез, алгоритм, структурная неопределенность, параметрическая неопределенность, силовая установка, вертолет

**Для цитирования:** Зайцева А. А., Белявцев М. В., Зайцев Е. А., Кильмаков Д. К., Култаев Д. Р., Сайфутдинова З. Р. Синтез алгоритма управления двигателями вертолета в условиях структурной и параметрической неопределенности // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 2. Т. 20. С. 123-128. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-123-128>.

Original article

## SYNTHESIS OF A HELICOPTER ENGINE CONTROL ALGORITHM UNDER CONDITIONS OF STRUCTURAL AND PARAMETRIC UNCERTAINTY

### Relevance

The problem of synthesizing an algorithm for controlling helicopter engines under conditions of structural and parametric uncertainty arising during the transition to manual control mode and subsequent return to the initial automatic mode is considered.

The relevance of this study lies in the development of a method for synthesizing a multimode control system for each of the helicopter powerplant engines based on the principle of fuzzy stabilization under conditions of structural and parametric uncertainty, which ensures the desired behavior of the entire ensemble of controlled variables when switching to manual control mode followed by a return to the initial automatic mode.

### Aim of research

Aim of research is to increase the efficiency of the helicopter power plant control system by coordinating the engine operating modes while maintaining the required values of the main gas dynamic parameters within the specified limits.

The objective of the study is to develop a method for synthesizing an algorithm for controlling helicopter engines based on the principle of fuzzy stabilization in conditions of structural and parametric uncertainty that occurs when switching to manual control mode with subsequent return to the initial automatic mode.

### Research method

The objective was solved using methods of system analysis, theory of automatic control systems, linear algebra, functional analysis, fuzzy sets, computer modeling.

### Results

A method has been developed for synthesizing a multi-mode control system for each of the helicopter powerplant engines based on the principle of fuzzy stabilization under conditions of structural and parametric uncertainty, providing the desired behavior of the entire ensemble of controlled variables when switching to manual control mode followed by a return to the initial automatic mode.

### Keywords

synthesis, algorithm, structural uncertainty, parametric uncertainty, power plant, helicopter

**For citation:** Zaitseva A. A., Belyavtsev M. V., Zaitsev E. A., Kilmakov D. K., Kul'taev D. R., Sayfutdinova Z. R. Sintez algoritma upravleniya dvigatelyami vertoleta v usloviyakh strukturnoi i parametricheskoi neopredelennosti [Synthesis of a Helicopter Engine Control Algorithm under Conditions of Structural and Parametric Uncertainty]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 2, Vol. 20, pp. 123-128 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-123-128>.

Необходимость перехода на ручной режим связана с тем, что в процессе эксплуатации двигателя могут возникнуть условия, требующие ограничения величины частоты вращения турбокомпрессора с целью защиты главного редуктора от превышения крутящего момента или двигателя от перегрева. Регулирование в ручном режиме продолжается до полного устранения причины, вызвавшей необходимость перехода

на ручной режим, после чего осуществляется обратное переключение на автоматическое регулирование частоты вращения силовой турбины [1]. При этом многорежимная система управления двигателем должна обеспечивать устойчивость и качество управления при разнообразных переходах с одного режима на другой, чтобы устранить несогласованность состояний процесса управления в моменты переключения [2]. В связи с

этим возникает необходимость описать поведение всего ансамбля выходных реакций системы для множества ее возможных состояний с помощью некоторой обобщенной характеристики [3]. Решение этой задачи усложняется тем, что в реальных условиях существует дефицит достоверной информации об условиях и ожидаемых моментах переключения, а также о возможных длительностях каждого из режимов. В качестве подобной характеристики в работе предлагается использовать нечеткое ожидание [4, 5] выходных реакций системы  $y(t)$ :

$$E(y(t)) = \sum_{k=0}^2 \bar{y}_{l(k)}(t) = \sum_{k=0}^2 \int_{\theta_k} y(t, \tau_{l(k)}) f_k(\tau) d\tau. \quad (1)$$

Здесь  $\bar{y}_{l(k)}(t)$  — частные нечеткие ожидания, соответствующие следующим режимам:  $k = 0$  — исходный автоматический режим,  $k = 1$  — режим ручного управления,  $k = 2$  — возвращение к исходному автоматическому режиму;  $\theta_k$  — временная область, соответствующая каждому режиму;  $f_k(\tau)$  — функция принадлежности системы к соответствующему режиму;  $y(t, \tau_{l(k)})$  — выходная реакция системы в этом же режиме.

Аналитическое описание функций принадлежности  $f_k(\tau)$  находится в рамках их вероятностной трактовки с использованием формализма Джейнса, согласно которому наиболее непредвзятыми характеристиками нечетких множеств являются экстремали функционалов размытости.

В качестве критерия синтеза многорежимной системы управления двигателем вертолета предлагается использовать условие нечеткой стабилизируемости:

$$E\{y(k)\} \leq b \{E\{y(t_0)\} \exp[-a(t-t_0)] + ch(1 - \exp[-a(t-t_0)])\}, \quad (2)$$

для всех  $t_0$  и  $t \geq t_0$ , где  $a > 0$ ,  $b > 0$ ,  $c > 0$  — заданные постоянные.

Требование нечеткой стабилизируемости (2) накладывает ограничения на корни характеристического полинома нечеткого ожидания. С этой целью в работе получены аналитические выражения для отдельных слагаемых изображения по Лапласу  $L\{E(y(t))\}$  применительно к каждому из перечисленных режимов:

$k = 0$  — исходный автоматический режим; временная область, соответствующая этому

режиму  $\theta_0: \{0 \leq t \leq \tau_1\}$ , функция принадлежности:  $f_0(\tau_1) = \lambda e^{-\lambda\tau_1}$ ;  $y(t, \tau_{l(0)}) = y_0(t)$  — выходная реакция в исходном автоматическом режиме, удовлетворяющая дифференциальному уравнению вида  $P_0(D)y_0(t) = Q_0(D)x(t)$ :

$$\bar{y}_{l(0)}(t) = \int_t^\infty y_0(\tau) \lambda e^{-\lambda(\tau-t)} d\tau = y_0(t) e^{-\lambda t}.$$

Отсюда

$$L\{\bar{y}_{l(0)}(t)\} = L\{y_0(t) e^{-\lambda t}\} = Y_0(s + \lambda) = \frac{Q_0(s + \lambda)}{P_0(s + \lambda)} \cdot X(s + \lambda). \quad (3)$$

$k = 1$  — режим ручного управления; временная область, соответствующая этому режиму:  $\theta_1: \{0 \leq \tau_1 \leq t \leq \tau_2\}$ , функция принадлежности:  $f_1(\tau) = \mu e^{-\mu(\tau_2 - \tau_1)}$ ;  $y(t, \tau_{l(1)}) = y(t, \tau_1)$ , где  $y(t, \tau_1)$  удовлетворяет уравнению  $P_1(D)y(t, \tau_1) = Q_1(D)x(t)$ :

$$\bar{y}_{l(1)}(t) = \int_t^\infty \mu e^{-\mu(\tau_2 - t)} \cdot \int_0^{\tau_2} y(t, \tau_1) \lambda e^{-\lambda\tau_1} d\tau_1 d\tau_2 = \lambda e^{-\mu t} \int_0^t y(t, \tau_1) e^{-\gamma\tau_1} d\tau_1.$$

Отсюда

$$L\{\bar{y}_{l(1)}(t)\} = \frac{\lambda}{\gamma} [Y_1(s + \mu) - Y_1(s + \lambda)] + \frac{\lambda}{\gamma} [Y_0(s + \lambda) - Y_1(s + \lambda)] \frac{P_1(s + \lambda)}{P_1(s + \mu)}. \quad (4)$$

$k = 2$  — возвращение к исходному автоматическому режиму; временная область, соответствующая этому режиму:  $\theta_2: \{0 \leq \tau_1 \leq \tau_2 \leq t\}$ , функция принадлежности:  $f_2(\tau) = \lambda e^{-\lambda\tau_1} \mu e^{-\mu(\tau_2 - \tau_1)} \lambda e^{-\lambda(\tau_3 - \tau_2)}$ ;  $y(t, \tau_{l(2)}) = y(t, \tau_1, \tau_2)$ , где  $y(t, \tau_1, \tau_2)$  является решением уравнения  $P_0(D)y(t, \tau_1, \tau_2) = Q_0(D)x(t)$ :

$$\bar{y}_{l(2)}(t) = \int_t^\infty \int_0^{\tau_2} \int_0^{\tau_1} y(t, \tau_1, \tau_2) f_3(\tau) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 = \lambda \mu e^{-\lambda t} \int_0^t \int_0^{\tau_2} y(t, \tau_1, \tau_2) e^{-\gamma(\tau_1 - \tau_2)} d\tau_1 d\tau_2.$$

Отсюда

$$L\{\bar{y}_{l(2)}(t)\} = \left[ \frac{\lambda \mu}{\gamma} \frac{[Y_1(s + \mu) - Y_0(s + \lambda)] P_1(s + \mu) + [Y_0(s + \lambda) - Y_1(s + \lambda)] P_1(s + \lambda)}{P_0(s + \lambda) P_1(s + \mu)} + \frac{-\lambda \mu}{\gamma} \frac{Y_0(s + \mu)}{P_0(s + \lambda)} \right] \times \frac{1}{\gamma} [P_0(s + \lambda) - P_0(s + \mu)] + \frac{\lambda \mu}{\gamma} \frac{Y_0(s + \lambda)}{P_0(s + \lambda)} \times P_0'(s + \lambda) + \frac{\lambda \mu}{\gamma^2} \left( Y_0(s + \mu) - Y_0(s + \lambda) - \gamma \frac{d}{ds} Y_0(s + \lambda) \right). \quad (5)$$

Искомый характеристический полином для нечеткого ожидания выходной реакции синтезируемой системы является общим знаменателем полученных выражений (3)–(5):

$$P(s) = P_0^2(s + \lambda)P_0(s + \mu)P_1(s + \lambda)P_1(s + \mu). \quad (6)$$

Приближение полинома  $P(s)$  к полиному  $P^*(s)$  с желаемым распределением корней завершает процедуру синтеза.

Поскольку описанные структурные изменения происходят в неизвестных заранее условиях полета, то наряду со структурными возмущениями в многорежимной системе управления двигателем вертолета возникают и параметрические возмущения [6]. Для формализации параметрической неопределенности в работе предлагается использовать нечетко заданные неопределенные параметры  $\delta_r$  ( $r = \overline{1, s}$ ), значения которых лежат в некоторых интервалах  $[\delta_r^I; \delta_r^{II}]$ . В этом случае речь идет о системах с неопределенными структурными и параметрическими возмущениями. Исследования, проведенные в работе, показали, что изображение нечеткого ожидания выходной реакции системы приобретает в этом случае трансцендентный вид:

$$E_r(z) = V_r^I(z) + \frac{V_r^{II}(z)}{\delta_r^{II} - \delta_r^I} \frac{1}{G_0^r(z)} \ln \left[ \frac{G_0^r(z)\delta_r^{II} + G_0(z)}{G_0^r(z)\delta_r^I + G_0(z)} \right], \quad (7)$$

где  $V_r^I(z)$ ,  $V_r^{II}(z)$  — дробно-рациональные, а  $G_0(z)$ ,  $G_0^r(z)$  — полиномиальные составляющие изображения.

#### Список источников

1. Вельдяев А.П., Ефанов В.Н., Зайцева А.А. Интегрированная система синхронизации режимов работы двигателей силовой установки вертолета // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 2. С. 24–32. EDN: WJUIPF.
2. Микрюков С.Г., Ефанов В.Н., Зайцева А.А. Синтез системы синхронизации режимов работы двигателей силовой установки вертолета // Авиакосмическое приборостроение. 2012. № 11. С. 3–9.
3. Ефанов В.Н., Зайцева А.А. Интеллектуальное управление летательным аппаратом в условиях структурной и параметрической неопределенности // Интеллектуальные системы управления / Под ред. С.Н. Васильева. М.: Машиностроение, 2010. С. 135–141.

В работе получены условия, позволяющие распространить требование нечеткой стабилизируемости (2) на системы, функционирующие в условиях структурной и параметрической неопределенности. Эти условия сформулированы в виде следующего утверждения.

**Утверждение.** Для обеспечения желаемого вида нечеткого ожидания выходных реакций исследуемой системы достаточно потребовать выполнения следующих условий:

$$G_0^r(z)/G_0(z) = const, \quad r = \overline{1, s}; \quad G_0(z) = G_0^*(z), \quad (8)$$

где  $G_0^*(z)$  — полином с заданным распределением корней.

При выполнении условий (8) изображение нечеткого ожидания приобретает дробно-рациональный вид с желаемым распределением полюсов, что обеспечивает выполнение требования нечеткой стабилизируемости.

#### Вывод

В данной статье разработан метод синтеза многорежимной системы управления каждым из двигателей силовой установки вертолета [7–10] на основе принципа нечеткой стабилизации в условиях структурной и параметрической неопределенности, обеспечивающий желаемое поведение всего ансамбля управляемых переменных при переходе на ручной режим управления с последующим возвратом на исходный автоматический режим.

4. Аверкин А.Н., Батыршин И.З., Блишун А.Ф. и др. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 311 с.
5. Григорьев В.А., Калабухов Д.С., Радько В.М. Применение методов нейросетевой аппроксимации при обобщении и представлении характеристик лопаточных машин авиационных ГТД // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 1. С. 39–43. EDN: UCUIQD.
6. Гаркушенко В.И., Безбрызгов М.В., Баракос Дж. Синтез корректирующего закона управления для повышения качества стабилизации вертолета // Изв. вузов. Авиационная техника. 2012. № 3. С. 18–21. EDN: PINQBL.
7. Касумов Е.В. Моделирование динамики поведения вертолета под управляющим воздей-



ствием системы стабилизации и управления // Изв. вузов. Авиационная техника. 2013. № 3. С. 11–14. DOI: 10.3103/S1068799813030033. EDN: SLIWZF.

8. Миргород В.Ф. Математическая модель силовой установки вертолета в составе двух турбовальных двигателей с редуктором и двухрядным винтом: анализ алгоритмов синхронизации // Авиационно-космическая техника и технология. 2009. № 7 (64). С. 125–131.

9. Лившиц К.И. Параев Ю.И. Теория управления. Санкт-Петербург: Лань, 2020. 232 с. ISBN: 978-5-8114-4497-7.

10. Чертовской В.Д., Цехановский В.В. Теория автоматизации процедур управления системами. Санкт-Петербург: Лань, 2024. 168 с. ISBN: 978-5-507-48066-1.

### References

1. Vel'dyaev A.P., Efanov V.N., Zaitseva A.A. Integrirovannaya sistema sinkhronizatsii rezhimov raboty dvigatelei silovoi ustanovki vertoleta [An Integrated System of Operation Mode Synchronization for the Helicopter Powerplant Engines]. *Izv. vuzov. Aviatsionnaya tekhnika — Russian Aeronautics*, 2015, No. 2, pp. 24–32. EDN: WJUIPF. [in Russian].

2. Mikryukov S.G., Efanov V.N., Zaitseva A.A. Sintez sistemy sinkhronizatsii rezhimov raboty dvigatelei silovoi ustanovki vertoleta [Synthesis of a System for Synchronizing the Operating Modes of Helicopter Power Plant Engines]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie — Aerospace Instrumentation*, 2012, No. 11, pp. 3–9. [in Russian].

3. Efanov V.N., Zaitseva A.A. Intellektual'noe upravlenie letatel'nykh apparatov v usloviyakh strukturnoi i parametricheskoi neopredelennosti [Intelligent Control of an Aircraft under Conditions of Structural and Parametric Uncertainty]. *Intellektual'nye sistemy upravleniya — Intelligent Control Systems* / Ed. by S.N. Vasil'ev. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010, pp. 135–141. [in Russian].

4. Averkin A.N., Batyrshin I.Z., Blishun A.F. e.a. *Nechetkie mnozhestva v modelyakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta* [Fuzzy Sets in Models of Control and Artificial Intelligence]. Ed. by D.A.

Pospelov. Moscow, Nauka Publ., 1986. 311 p. [in Russian].

5. Grigor'ev V.A., Kalabukhov D.S., Rad'ko V.M. Primenenie metodov neirosetevoi approksimatsii pri obobshchenii i predstavlenii kharakteristik lopatochnykh mashin aviatsionnykh [GTD Application of Neural Network Approximation Methods in the Generalization and Presentation of the Aircraft Gas Turbine Engine Turbomachinery Characteristics]. *Izv. vuzov. Aviatsionnaya tekhnika — Russian Aeronautics*, 2015, No. 1, pp. 39–43. EDN: UCUIQD. [in Russian].

6. Garkushenko V.I., Bezbrayzov M.V., Barakos Dzh. Sintez korrektiruyushchego zakona upravleniya dlya povysheniya kachestva stabilizatsii vertoleta [Synthesis of the Correcting Control Law to Improve the Helicopter Stabilization Quality]. *Izv. vuzov. Aviatsionnaya tekhnika — Russian Aeronautics*, 2012, No. 3, pp. 18–21. EDN: PINQBL. [in Russian].

7. Kasumov E.V. Modelirovanie dinamiki povedeniya vertoleta pod upravlyayushchim vozdeistviem sistemy stabilizatsii i upravleniya [Modeling of Helicopter Behavior Dynamics under the Controlling action of the Stabilization and Control System]. *Izv. vuzov. Aviatsionnaya tekhnika — Russian Aeronautics*, 2013, No. 3, pp. 11–14. DOI: 10.3103/S1068799813030033. EDN: SLIWZF. [in Russian].

8. Mirgorod V.F. Matematicheskaya model' silovoi ustanovki vertoleta v sostave dvukh turboval'nykh dvigatelei s reduktorom i dvukhryadnym vintom: analiz algoritmov sinkhronizatsii [Mathematical Model of a Helicopter Power Plant Consisting of Two Turboshaft Engines with a Gearbox and a Double-Row Propeller: Analysis of Synchronization Algorithms]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya — Aviation and Space Technique and Technology*, 2009, No. 7 (64), pp. 125–131. [in Russian].

9. Livshits K.I. Paraev Yu.I. *Teoriya upravleniya* [Control Theory]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2020. 232 p. ISBN: 978-5-8114-4497-7. [in Russian].

10. Chertovskoi V.D., Tsekhanovskii V.V. *Teoriya avtomatizatsii protsedur upravleniya sistemami* [The Theory of Automation of Systems Management Procedures]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2024. 168 p. ISBN: 978-5-507-48066-1. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 08.04.2024; одобрена после рецензирования 18.04.2024; принята к публикации 03.05.2024.

The article was submitted 08.04.2024; approved after reviewing 18.04.2024; accepted for publication 03.05.2024.

Научная статья

УДК 681.518.5

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-2-129-138

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ВИБРОДИАГНОСТИКИ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ, ОСНОВАННАЯ НА ТЕОРИИ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА

*Тагир Рустамович Хузин**Tagir R. Khuzin**магистрант кафедры автоматизации, телекоммуникации и метрологии,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия**Марина Михайловна Закирничная**Marina M. Zakirnichnaya**доктор технических наук, доцент,  
заведующая кафедрой автоматизации, телекоммуникации и метрологии,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия*

### Актуальность

Настоящее научное исследование посвящено анализу фазовых портретов, основанных на теории детерминированного хаоса, для оценки технического состояния центробежных насосных агрегатов. Предлагается метод, интегрирующий измерение вибропараметров с инструментами искусственного интеллекта. Данное сочетание позволяет как повысить точность постановки «диагноза», так и выявлять неисправности на ранних стадиях их развития.

### Цель исследования

Повышение точности определения технического состояния центробежных насосных агрегатов за счет использования интеллектуальной информационной системы, обученной на фазовых портретах.

### Методы исследования

Для исследований применялись методы математического моделирования, методы компьютерной генерации данных и методы искусственного интеллекта.

### Результаты

Разработана методика построения фазовых портретов, соответствующих основным типам неисправностей центробежных насосных агрегатов, таким как «Дисбаланс», «Расцентровка» и «Потеря жесткости опор», для составления обучающей выборки интеллектуальной информационной системы.

### Ключевые слова

вибродиагностика, насосный агрегат, виброскорость, диагностика неисправностей, интеллектуальная система, обучающая выборка, фазовый портрет, теория детерминированного хаоса

**Для цитирования:** Хузин Т. Р., Закирничная М. М. Интеллектуальная информационная система для вибродиагностики насосных агрегатов, основанная на теории детерминированного хаоса // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 2. Т. 20. С. 129-138. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-129-138>.

Original article

## INTELLIGENT INFORMATION SYSTEM FOR PUMP UNIT VIBRODIAGNOSTICS BASED ON DETERMINED CHAOS THEORY

### Relevance

This scientific research is devoted to the analysis of phase portraits based on deterministic chaos theory to assess the technical condition of centrifugal pump units. A method integrating the measurement of vibration parameters with artificial intelligence tools is proposed. This combination allows both to increase the diagnosis accuracy and to detect faults at early stages of their development.

### Aim of research

The main aim of the research is the increase of accuracy of determination of technical state of centrifugal pump units due to the use of intellectual information system trained on phase portraits.

### Research methods

Methods of mathematical modeling, methods of computer data generation and methods of artificial intelligence were used for research.

### Results

The technique of building phase portraits corresponding to the main types of faults of centrifugal pump units, such as «Unbalance», «Misalignment» and «Loss of support rigidity», for making up a training sample of intelligent information system has been developed.

### Keywords

vibrodiagnostics, pump unit, vibration velocity, faults diagnostics, intelligent system, training sample, phase portrait, determined chaos theory

**For citation:** Khuzin T. R., Zakirnichnaya M. M. *Intellektual'naya informatsionnaya sistema dlya vibrodiagnostiki nasosnykh agregatov, osnovannaya na teorii determinirovannogo khaosa [Intelligent Information System for Pump Unit Vibrodiagnostics Based on Determined Chaos Theory]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 2, Vol. 20, pp. 129-138 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-129-138>.*

В последние годы развитие искусственного интеллекта (ИИ) кардинально изменило многие отрасли промышленности благодаря его способности обрабатывать и анализировать объемные массивы данных с беспрецедентной скоростью [1]. Применение ИИ позволяет повысить эффективность, точность и возможности прогнозирования в сложных процессах принятия решений. Одним из примеров практического применения ИИ является предиктивная аналитика [2], объединяющая статистические алгоритмы и техники машинного обучения для определения вероятности будущих событий на основе исторических данных.

Предиктивная аналитика все чаще становится основой для стратегий предупреждения проблем в различных секторах, в том числе и на предприятиях нефтепереработки и нефтехимии. В данных отраслях промышленности активно используются центробежные насосные агрегаты (ЦНА). Эти машины,

осуществляющие перекачку жидкостей по обширной инфраструктуре, являются важными элементами многих технологических процессов. Однако из-за интенсивного использования ЦНА подвержены процессам разрушения, что может привести к непредвиденным отказам и, соответственно, к простоям. Учитывая высокие затраты на обслуживание и потенциальные потери от простоя производства, способность эффективно диагностировать состояние ЦНА приобретает первостепенное значение.

Вибродиагностика признана одним из самых информативных и распространенных методов для оценки состояния машин роторного типа [3], к которым относятся ЦНА. Данный метод основан на измерении вибрационных сигналов и их анализе с помощью различных способов, самым популярным из которых является спектральный анализ на основе преобразования Фурье. Однако, наряду с множеством достоинств, он обладает

рядом существенных недостатков, подробно описанных в [4].

В [5] исследована возможность применения теории детерминированного хаоса в области анализа вибросигналов. В результате был составлен алгоритм построения реконструированных фазовых портретов (ФП) на основе формы волны виброскорости, который позволяет комплексно зафиксировать динамическое поведение ЦНА, а также разработана специализированная программа IMPROS, выполняющее данное построение ФП по ряду значений виброскорости. С учетом имеющихся технологий в настоящее время возможно разработать информационную систему, позволяющую определять техническое состояние насосных агрегатов по фазовым портретам, что способствует уменьшению количества внеплановых отказов оборудования и простоев.

При разработке интеллектуальных информационных систем для диагностики технического оборудования ключевой задачей является формирование качественной обучающей выборки, основой которой служит разнообразие фазовых портретов, отражающих разные условия работы и состояния агрегатов. Основная цель — минимизация переобучения и повышение устойчивости машинного обучения к изменениям в процессе эксплуатации оборудования, что предполагает сбор данных, по возможности, охватывающих все рабочие аномалии и условия. В то же время реализация такого подхода встречается с трудностями из-за необходимости значительных временных затрат и ограничения доступности данных о реальных режимах работы.

В качестве решения данной проблемы возможно применение метода синтеза фазовых портретов на основе моделирования сигналов, соответствующих основным неисправностям ЦНА. Это позволяет не ожидать реальных отказов агрегатов для сбора данных, сокращая время и повышая эффективность процесса обучения ИИ. Искусственно созданные данные характеризуют различные состояния ЦНА, включая предельные, что расширяет обучающий потенциал систем и повышает точность диагностики, как это показано в [6, 7].

В [8] были определены формулы для генерации искусственных сигналов виброскорости, соответствующих основным типам неисправностей насосных агрегатов, таким как «Дисбаланс», «Расцентровка» и «Потеря жесткости опор», для составления обучающей выборки интеллектуальной системы диагностики.

Однако, как показал анализ различных фазовых портретов, для корректности постановки «диагноза» интеллектуальной системой необходимо определить базовый уровень шума для обучающей выборки и разработать алгоритм очистки вибросигнала от шумовой составляющей до этого базового уровня. Для этого прежде всего необходимо наиболее точно количественно описать изображение фазового портрета с целью выявления зависимостей от степени развития неисправности и амплитуды случайной шумовой составляющей. Для получения более полных данных о портрете необходимо использовать сразу несколько параметров изображения.

В [6] доказано, что одним из критериев, характеризующих степень развития неисправности ЦНА, является площадь фазового портрета. Развитие современных технологий, таких как компьютерное зрение, позволяет точно определять контуры в изображении и значения их площадей. Данные измерения проводились с помощью языка программирования Python и библиотеки OpenCV. Эта библиотека позволяет решать задачи нахождения объектов и контуров на изображении.

В [9] описан опыт успешного применения данной библиотеки для определения формы и размеров объектов нерегулярной формы. Функция FindContours позволяет найти замкнутые контуры на черно-белом изображении и определить иерархию между ними, т.е. порядок вложенности их друг в друга. Она успешно использовалась в данной работе для определения всех контуров на портрете. После этого из них отсекались две группы:

- самые внешние контуры, т.е. те, которые не были вложены ни в какой другой;
- самые вложенные — те, которые не содержали внутри себя других контуров.

Затем в каждой из них находился самый большой по площади контур и принимался за соответственно внешний и внутренний контуры фазового портрета. На рисунке 1 отображены найденные контуры на исходном изображении портрета.

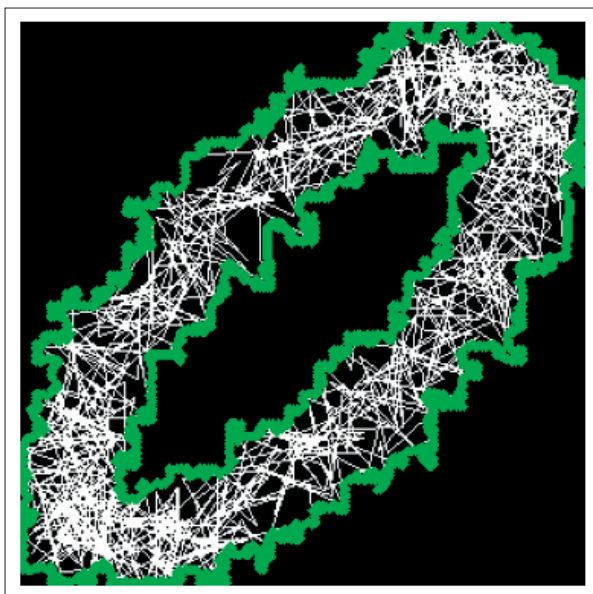
Площадь фазового портрета определялась как разность внешнего и внутреннего контуров.

В качестве факторов, зависящих от состояния агрегата, приняты:

- площадь ФП;
- отношение площади внутреннего контура к площади внешнего;
- контрастность (т.е. отношение числа черных пикселей к белым), зависимость которой от степени развития неисправности выявлена в [6].

Так как для вибродиагностики ЦНА наибольший интерес представляет раннее выявление неисправности, в данной работе исследовались сигналы, соответствующие состояниям агрегата «Отлично», «Хорошо» и «Допустимо», в соответствии с [8]. Среднеквадратичное значение (СКЗ) генерируемых сигналов находилось в диапазоне от 0,5 до 4,6 мм/с.

Для определения базового уровня шума, который необходим для генерации обучаю-



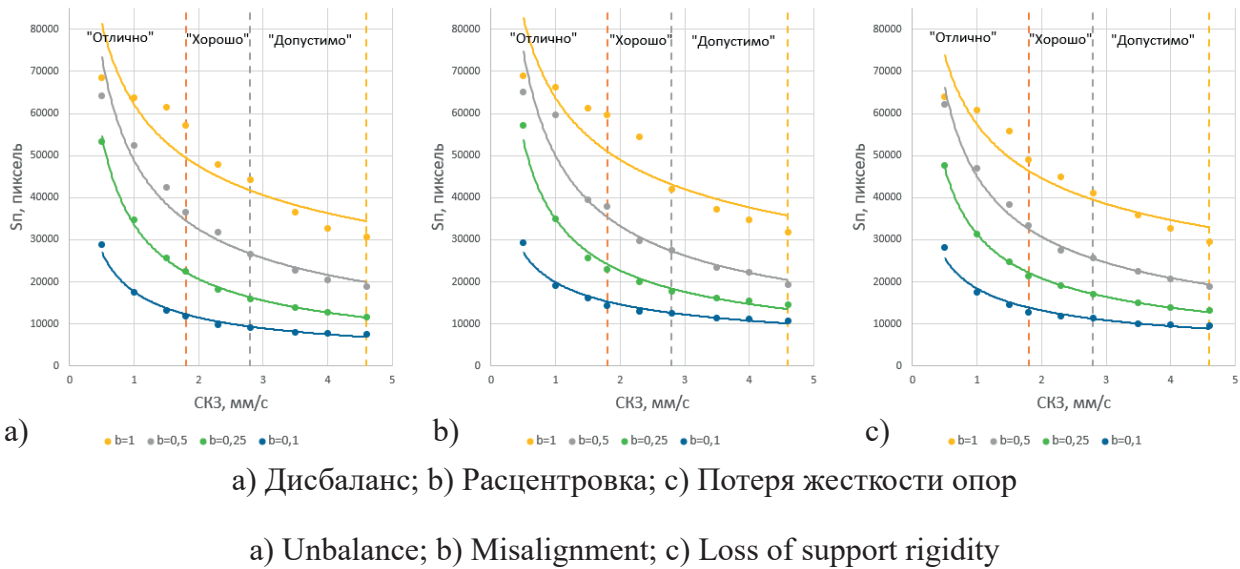
**Рисунок 1.** Пример определения контуров в фазовом портрете с помощью библиотеки OpenCV

**Figure 1.** The example of contour detection in the phase portrait using the OpenCV library

щей выборки, была исследована зависимость параметров ФП от шумовой амплитуды  $b$ . Поскольку при очистке сигнала от шумовой составляющей ее амплитуда уменьшается, за базовое значение принята минимальная амплитуда шумовой составляющей, при которой еще возможно однозначно определить техническое состояние агрегата. На рисунках 2–4 представлены зависимости параметров портрета от степени развития исследуемых неисправностей при различных уровнях  $b$ .

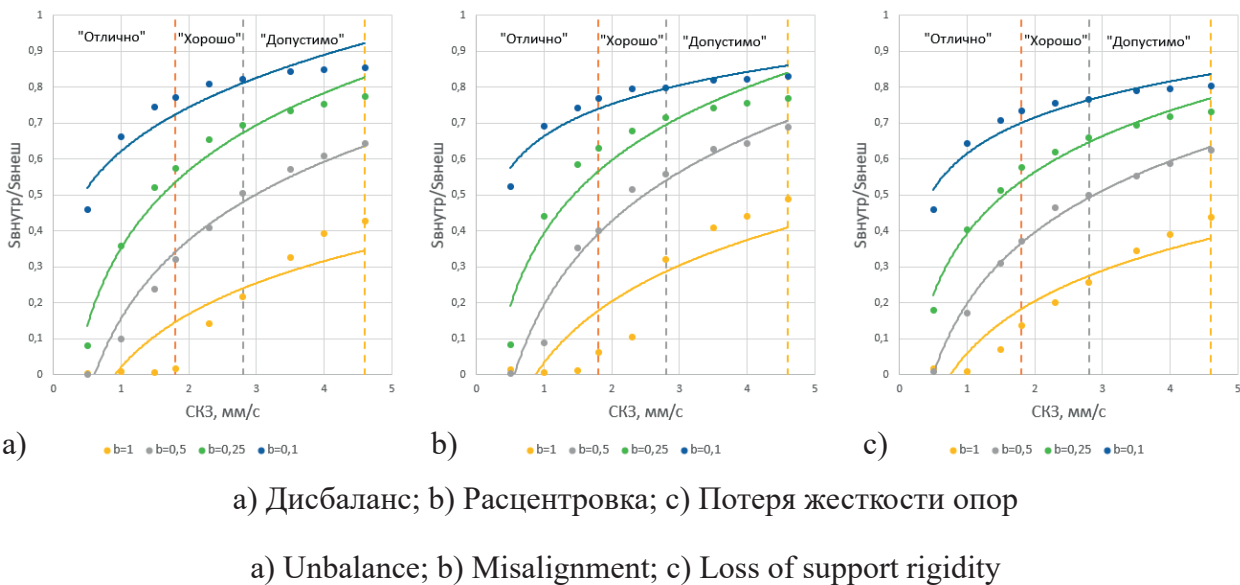
Как видно из анализа рисунка 2, при развитии степени развития всех типов неисправностей площадь ФП нелинейно уменьшается. Причем, при амплитуде шумовой составляющей 0,1 мм, значения площади, соответствующие состоянию «Хорошо», становятся практически неотличимы от значений площади, соответствующих состоянию «Допустимо» (разница на границах диапазонов составила менее 2000 пикселей, при том что при других рассмотренных уровнях шума она составляла не менее 4000 пикселей). При дальнейшем развитии неисправностей значения площадей будут еще более близкими, что приведет к невозможности отличия опасного от безопасного состояния. Данная картина наблюдается при всех трех проанализированных неисправностях, хотя при потере жесткости опор значения площади портрета оказались чуть меньше, чем при двух других типах.

Значения отношения площадей внутреннего и внешнего контуров ФП (рисунок 3), наоборот, нелинейно возрастают по ходу развития всех трех типов неисправностей. Однако при  $b = 1$  мм данный параметр принимает околонулевые значения до тех пор, пока СКЗ не достигнет определенного значения (различные для каждого типа неисправности). При уменьшении амплитуды шумовой составляющей наблюдается картина, аналогичная рисунку 2. При  $b$  меньше, чем 0,25 мм значения отношения площадей, соответствующие состояниям «Хорошо» и «Допустимо» становятся малыми. Значения данного параметра также оказались чуть ниже при неисправности типа «Потеря жесткости опор».



**Рисунок 2.** Зависимости площади фазового портрета от СКЗ виброскорости при различных неисправностях и амплитудах шумовой составляющей  $b$

**Figure 2.** The dependences of the phase portrait area on the RMS of vibration velocity in the case of different fault types and noise component amplitudes  $b$



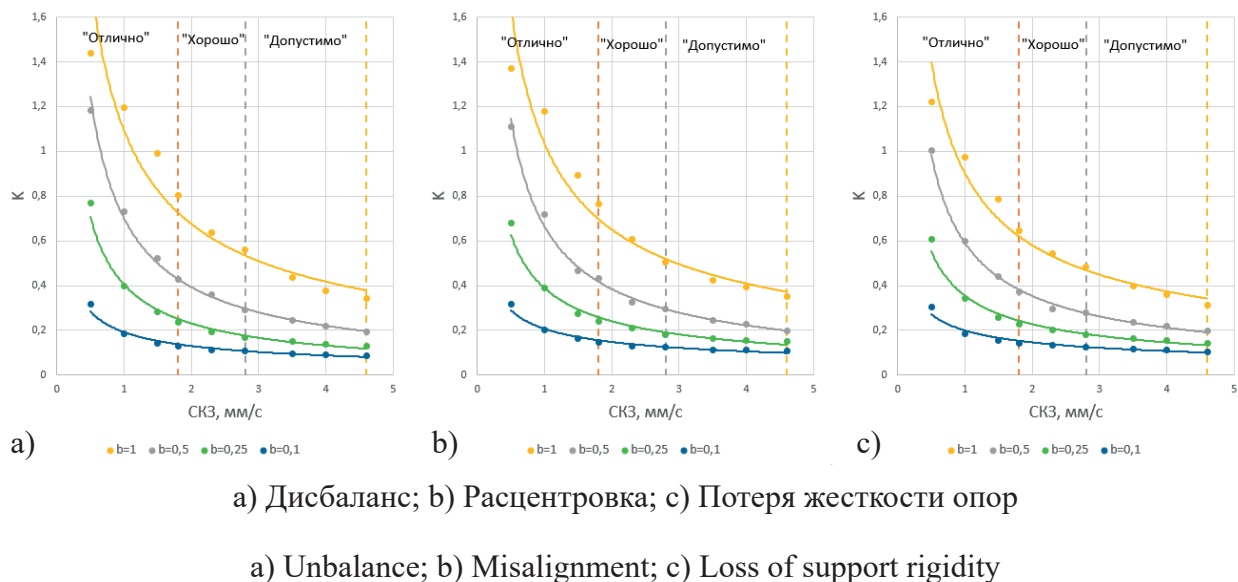
**Рисунок 3.** Зависимости отношения площадей фазового портрета от СКЗ виброскорости при различных неисправностях и амплитудах шумовой составляющей  $b$

**Figure 3.** The dependences of the relation of phase portrait areas on the RMS of vibration velocity in the case of different fault types and noise component amplitudes  $b$

При анализе зависимости значения контрастности от СКЗ виброскорости (рисунок 4) можно обнаружить схожие особенности: характер изменения значений не изменяется на всем диапазоне (в данном случае нелинейно уменьшается); при неисправности типа «Потеря жесткости опор» значения

оказались несколько меньше, чем при двух других типах неисправностей; при амплитуде шумовой составляющей 0,1 мм значения, соответствующие различным состояниям, неотличимо близки.

Таким образом, все три исследуемых параметра при амплитуде шумовой состав-



**Рисунок 4.** Зависимости контрастности фазового портрета от СКЗ виброскорости при различных неисправностях и амплитудах шумовой составляющей  $b$

**Figure 4.** The dependences of the phase portrait contrast on the RMS of vibration velocity in the case of different fault types and noise component amplitudes  $b$

ляющей менее 0,25 мм их значения при состояниях «Хорошо» и «Допустимо» близки друг к другу. При дальнейшем ухудшении состояния эти значения будут еще ближе, что не позволит оперативно отреагировать на приближение к аварийному состоянию. Поэтому за минимальный уровень шума при генерации обучающей выборки для неисправностей типа «Дисбаланс», «Расцентровка» и «Потеря жесткости опор» принято значение  $b$ , равное 0,25 мм.

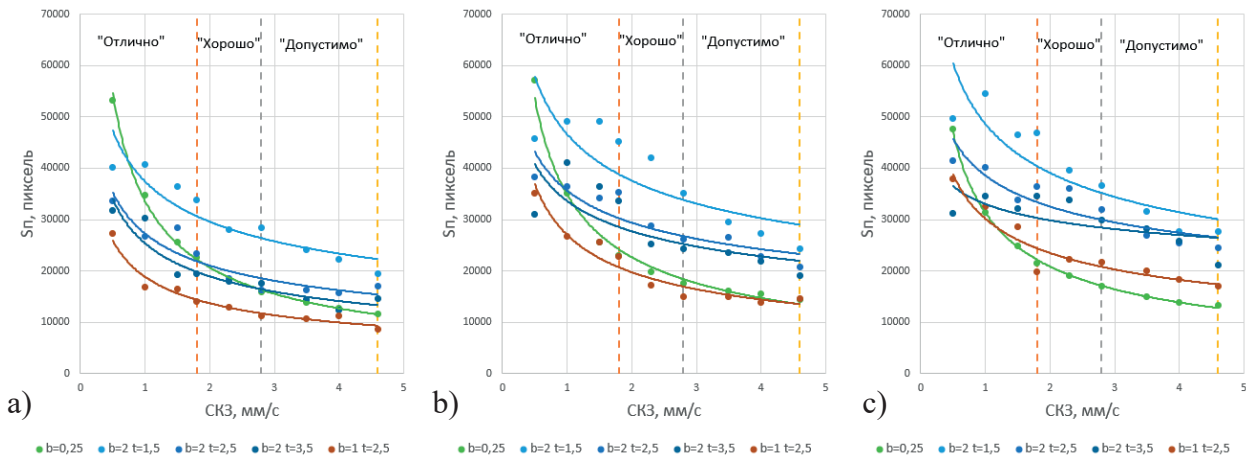
Для очистки сигнала от шумовой составляющей использовался метод, основанный на разложении исходного вибросигнала с помощью дискретного вейвлет-преобразования, пороговой фильтрации коэффициентов детализации и дальнейшего обратного преобразования, возвращающего очищенную последовательность значений вибрационного параметра. Применимость данной методики была доказана в [6, 7].

Как видно по рисункам 2–4, с ростом шумовой амплитуды значения отдаляются от кривой зависимости при базовом уровне шума в 0,25 мм. При очистке сигнала от шумовой составляющей, эти значения, наоборот, приближаются к этой кривой. Причем начиная с определенной степени очистки  $t$  дальнейшее ее увеличение не влияет на зна-

чения параметров. Следовательно, существует максимальный уровень шума, который еще возможно очистить до значений, соответствующих принятому базовому уровню шума.

На рисунках 5–7 представлены зависимости параметров портрета от степени развития неисправностей при различных уровнях  $b$  и степенях очистки  $t$ .

Как видно из анализа рисунков 5–7, при амплитуде шумовой составляющей 2 мм и степени очистки  $t$ , равной 3,5, зависимости параметров ФП все еще недостаточно близки к зависимостям при базовом уровне шума (зеленый цвет). При дальнейшем увеличении степени очистки значения параметров не изменяются, следовательно данная шумовая амплитуда слишком высока и ее невозможно очистить до нужного уровня. При  $b = 1$  мм и  $t = 2,5$  (коричневый цвет) значения приближены к базовым, поэтому данную амплитуду шума возможно обработать таким образом, чтобы параметры построенного фазового портрета подходили для интеллектуальной системы диагностики ЦНА. Поэтому за максимальный уровень шума, при котором возможно определить корректно техническое состояние насосного оборудования с помощью данной системы,

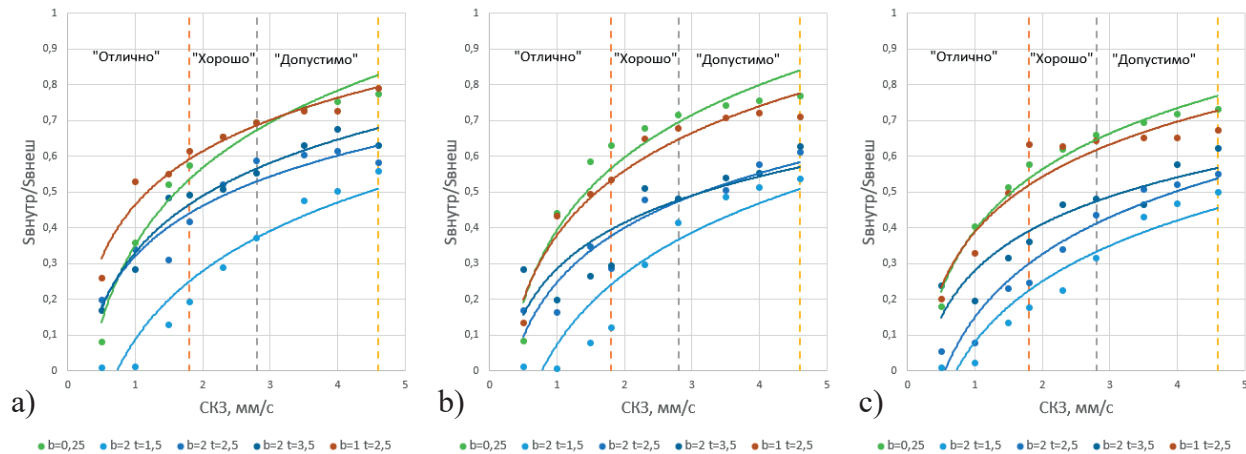


а) Дисбаланс; б) Расцентровка; в) Потеря жесткости опор

a) Unbalance; b) Misalignment; c) Loss of support rigidity

**Рисунок 5.** Зависимости площади фазового портрета от СКЗ виброскорости при различных неисправностях, амплитудах шумовой составляющей  $b$  и степенях очистки  $t$

**Figure 5.** The dependences of the phase portrait area on the RMS of vibration velocity in the case of different fault types, noise component amplitudes  $b$  and filtering degrees  $t$



а) Дисбаланс; б) Расцентровка; в) Потеря жесткости опор

a) Unbalance; b) Misalignment; c) Loss of support rigidity

**Рисунок 6.** Зависимости отношения площадей фазового портрета от СКЗ виброскорости при различных неисправностях, амплитудах шумовой составляющей  $b$  и степенях очистки  $t$

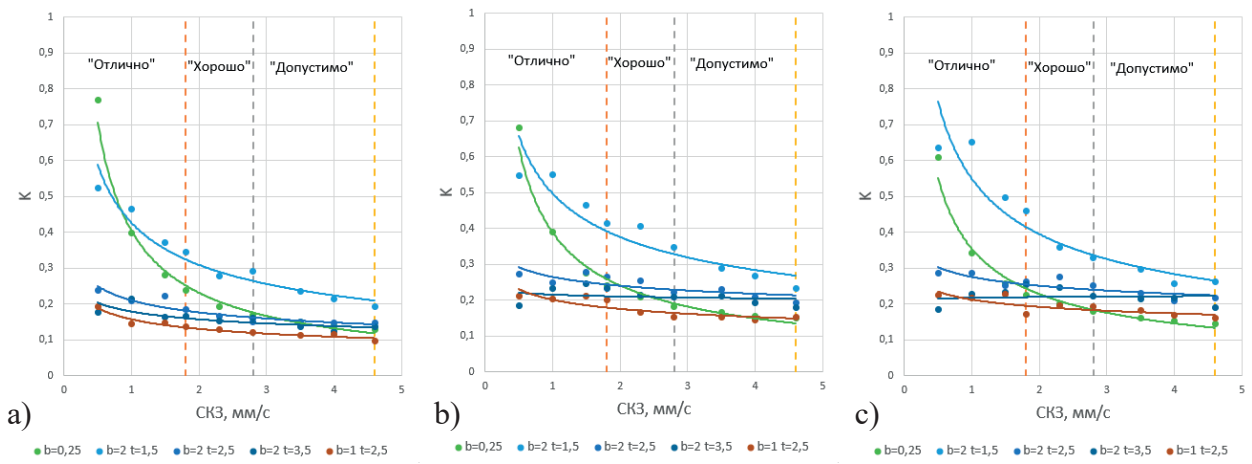
**Figure 6.** The dependences of the relation of phase portrait areas on the RMS of vibration velocity in the case of different fault types, noise component amplitudes  $b$  and filtering degrees  $t$

принято значение амплитуды шумовой составляющей, равное 1 мм.

Таким образом разработана методика построения фазовых портретов для состав-

ления обучающей выборки интеллектуальной информационной системы. Примеры фазовых портретов, построенных на ее основании, представлены в таблицах 1 и 2.





а) Дисбаланс; б) Расцентровка; в) Потеря жесткости опор

a) Unbalance; b) Misalignment; c) Loss of support rigidity

**Рисунок 7.** Зависимости контрастности фазового портрета от СКЗ виброскорости при различных неисправностях, амплитудах шумовой составляющей  $b$  и степенях очистки  $t$

**Figure 7.** The dependences of the phase portrait contrast on the RMS of vibration velocity in the case of different fault types, noise component amplitudes  $b$  and filtering degrees  $t$

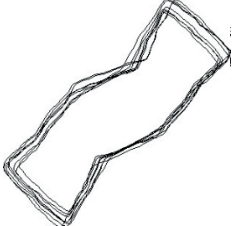



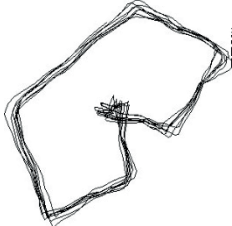
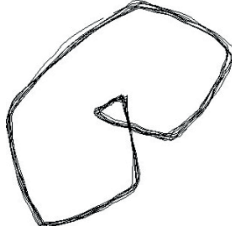


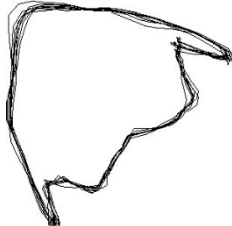
**Таблица 1.** Примеры фазовых портретов для составления обучающей выборки интеллектуальной системы диагностики при  $b = 0,25$  мм и  $t = 0$

**Table 1.** Examples of phase portraits for compiling a training set of an intelligent diagnostic system at  $b = 0.25$  mm and  $t = 0$

Тип неисправности	Состояние «Отлично»	Состояние «Допустимо»	Состояние «Требуется мер»
«Дисбаланс»			
«Расцентровка»			
«Потеря жесткости опор»			

**Таблица 2.** Примеры фазовых портретов для составления обучающей выборки интеллектуальной системы диагностики при  $b = 1$  мм и  $t = 2,5$

**Table 2.** Examples of phase portraits for compiling a training set of an intelligent diagnostic system at  $b = 1$  mm and  $t = 2.5$

Тип неисправности	Состояние «Отлично»	Состояние «Допустимо»	Состояние «Требуется мер»
«Дисбаланс»			
«Расцентровка»			
«Потеря жесткости опор»			

### Выводы

Определено, что при построении фазовых портретов для составления обучающей выборки интеллектуальной системы определения технического состояния ЦНА при неисправностях типа «Дисбаланс», «Расцентровка» и «Потеря жесткости опор» значение минимальной амплитуды шумовой

составляющей необходимо принять равным 0,25 мм, а значение максимальной амплитуды — 1 мм.

Для дальнейшей разработки системы необходимо определить структуру нейросети, на основе которой она будет построена, и объем обучающей выборки.

### Список источников

1. Zeba G. et al. Technology Mining: Artificial Intelligence in Manufacturing // Technological Forecasting and Social Change. 2021. Vol. 171. P. 120971. URL: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120971>.

2. Носырева А.А., Абрамов В.И. Предиктивная аналитика — основа для цифровой трансформации компаний // Актуальные проблемы экономики, учета, аудита и анализа в современных условиях: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (Курск, 28–29 апреля 2021 года). Курск: Курский государственный университет, 2021. С. 179–182. EDN: YXVZUX.

3. Perez R.X. An Introduction to Machinery Monitoring // Condition Monitoring, Troubleshooting and Reliability in Rotating Machinery. 2023. Vol. 3. URL: <https://doi.org/10.1002/9781119631620.ch1>.

4. Закирничная М.М., Солодовников Д.С., Корнишин Д.В., Власов М.И. Применение теории вейвлетов и детерминированного хаоса для анализа технического состояния насосных агрегатов консольного типа. Уфа: УГНТУ, 2002. 95 с. ISBN: 5-7831-0482-5. EDN: UKMQSD.

5. Солодовников Д.С. Вейвлеты и детерминированный хаос при анализе вибросигналов центробежно-компрессорных агрегатов: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2000. 147 с.

6. Булатов Б.Р. Диагностика центробежных насосных агрегатов с использованием метода построения фазовых портретов. Уфа: УГНТУ, 2019. 100 с.

7. Валишин Р.Г. Диагностика основных неисправностей центробежных насосных агрегатов на основе анализа фазовых портретов вибросигналов. Уфа: УГНТУ, 2022. 101 с.

8. Khuzin T.R., Zakirnichnaya M.M. Specificity of Vibration Signal Modeling for Training an Intelligent Pump Equipment Diagnostic System Using Phase Portraits // Materials of International University Scientific Forum UAE–RUSSIA–INDIA. Part 2. 2024. P. 189–199.

9. Бочкарев С.О., Литус И.Б., Кукченко А.А., Говорухин Д.О. Анализ изображения объекта нерегулярной формы // Компьютерный анализ изображений: Интеллектуальные решения в промышленных сетях (CAI-2016): сб. науч. тр. по матер. I Междунар. конф. 5–6 мая 2016 г. / Под общ. ред. А.Г. Тягунова. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2016. С. 35–38. EDN: YABOWN.

### References

1. Zeba G. et al. Technology Mining: Artificial Intelligence in Manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, Vol. 171, pp. 120971. URL: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120971>.

2. Nosyreva A.A., Abramov V.I. Prediktivnaya analitika — osnova dlya tsifrovoi transformatsii kompanii [Predictive Analytics — the Basis for the Digital Transformation of Companies]. *Sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy ekonomiki, ucheta, audita i analiza v sovremennykh usloviyakh» (Kursk, 28–29 aprelya 2021 goda)* [Proceedings of International Scientific and Practical Conference «Current Issues in Economics, Accounting, Auditing, and Analysis in Modern Conditions», Kursk, April 28–29, 2021]. Kursk, Kurskii gosudarstvennyi universitet, 2021, pp. 179–182. EDN: YXVZUX. [in Russian].

3. Perez R.X. An Introduction to Machinery Monitoring. *Condition Monitoring, Troubleshooting and Reliability in Rotating Machinery*, 2023, Vol. 3. URL: <https://doi.org/10.1002/9781119631620.ch1>.

4. Zakirnichnaya M.M., Solodovnikov D.S., Kornishin D.V., Vlasov M.I. *Primenenie teorii veivletov i determinirovannogo khaosa dlya analiza tekhnicheskogo sostoyaniya nasosnykh agregatov konsol'nogo tipa* [Application of Wavelet Theory and Deterministic Chaos for the Analysis of the Technical Condition of Cantilever-Type Pump Units]. Ufa, USPTU Publ., 2002. 95 p. ISBN: 5-7831-0482-5. EDN: UKMQSD.

5. Solodovnikov D.S. *Veivlety i determinirovannyi khaos pri analize vibrosignalov tsentro-bezhno-kompressornykh agregatov: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Wavelets and Deterministic Chaos in the Analysis of Vibration Signals of Centrifugal Compressor Units: Diss. Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, USPTU Publ., 2000. 147 p. [in Russian].

6. Bulatov B.R. *Diagnostika tsentrobezhnykh nasosnykh agregatov s ispol'zovaniem metoda postroeniya fazovykh portretov* [Diagnostics of Centrifugal Pump Units Using the Method of Constructing Phase Portraits]. Ufa, USPTU Publ., 2019. 100 c. [in Russian].

7. Valishin R.G. *Diagnostika osnovnykh neispravnostei tsentrobezhnykh nasosnykh agregatov na osnove analiza fazovykh portretov vibrosignalov* [Diagnostics of Main Faults in Centrifugal Pump Units Based on the Analysis of Phase Portraits of Vibration Signals]. Ufa, USPTU Publ., 2022. 101 c. [in Russian].

8. Khuzin T.R., Zakirnichnaya M.M. Specificity of Vibration Signal Modeling for Training an Intelligent Pump Equipment Diagnostic System Using Phase Portraits. *Materials of International University Scientific Forum UAE–RUSSIA–INDIA*, 2024, Part 2, pp. 189–199. [in Russian].

9. Bochkarev S.O., Litus I.B., Kukchenko A.A., Govorukhin D.O. Analiz izobrazheniya ob'ekta neregulyarnoi formy [Picture Analysis of Irregular Object]. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam I Mezhdunarodnoi konferentsii «Komp'yuternyi analiz izobrazhenii: Intellektual'nye resheniya v promyshlennykh setyakh (CAI-2016)», 5–6 maya 2016 g.* [Collection of Scientific Works Based on the I International Conference «Computer Image Analysis: Intelligent Solutions in Industrial Networks (CAI-2016)», May 5-6, 2016]. Ed. by A.G. Tyagunov. Ekaterinburg, Izd-vo UMTs UPI, 2016, pp. 35–38. EDN: YABOWN. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 03.06.2024; одобрена после рецензирования 10.06.2024; принята к публикации 17.06.2024.*

*The article was submitted 03.06.2024; approved after reviewing 10.06.2024; accepted for publication 17.06.2024.*

Научная статья

УДК 621.3.087.92

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-2-139-151

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ КВАНТОВАНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ СИНУСОИДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

**Иван Александрович Храпкин****Ivan A. Khratkin***магистрант кафедры защиты информации факультета  
автоматики и вычислительной техники,**Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск, Россия***Максим Александрович Савиных****Maxim A. Savinykh***кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации  
факультета автоматки и вычислительной техники,**Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск, Россия***Станислав Владимирович Пономарев****Stanislav V. Ponomarev***аспирант кафедры электроники и электротехники  
факультета радиотехники и электроники,**Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск, Россия*

### Актуальность

В современной электроэнергетике часто используются цифровые измерительные приборы, в основе которых лежит использование аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Производители таких приборов встают перед выбором АЦП, в частности, выбором его ключевой характеристики – количества двоичных разрядов.

В контексте измерительных устройств доля стоимости АЦП является одной из основных в стоимости конечного прибора. При этом производители часто закладывают АЦП с наибольшим количеством двоичных разрядов, получая при этом неоправданно завышенный запас по количеству квантов.

Вопрос выбора разрядности АЦП исходя из погрешности квантования достаточно просто решается при измерении постоянных сигналов, однако в случае с переменными периодическими сигналами эта задача зачастую решается грубой теоретической оценкой, которая приводит к использованию АЦП с большей разрядностью, чем это было бы необходимо.

Актуальность данной работы заключается в разработке собственного метода решения задачи оценки погрешности квантования АЦП,

### Ключевые слова

погрешность, аналого-цифровое преобразование, погрешность квантования, цифровой трансформатор, измерение тока, электроэнергетика

который поможет разработчикам современных цифровых измерителей подбирать АЦП с минимально необходимыми характеристиками для своих устройств в зависимости от заданного диапазона измерений и класса точности.

#### **Цель исследования**

Разработать метод оценки погрешности квантования при измерении среднеквадратических значений синусоидальных сигналов, который включает в себя математическую модель процесса измерений и программный комплекс, позволяющий проводить исследования зависимостей погрешности квантования от характеристик АЦП и формы исследуемого сигнала.

#### **Методы исследования**

Для выполнения данной работы использовался метод математического моделирования с последующей реализацией в виде программного комплекса, написанного на языке LabVIEW. В статье приведена блок-схема, описывающая алгоритм работы программы, а также представлены формулы и параметры, используемые для моделирования процесса измерений и вычисления погрешностей.

#### **Результаты**

Разработана математическая модель процесса измерений, реализованная в программном комплексе на языке LabVIEW. Проведен ряд экспериментов, исследующих зависимость погрешности квантования от числа эффективных двоичных разрядов АЦП.

Основные результаты исследований выражаются в сравнении АЦП с разрядностью 16, 18, 20, 22 и 24 бит в контексте применения для измерения переменного тока промышленной частоты в цифровом трансформаторе. Исследован характер изменения погрешности квантования при изменении величины сигнала. Также получены результаты, доказывающие отсутствие явной зависимости погрешности квантования от типа приближения, используемого в АЦП.

Метод, рассмотренный в данной работе, позволяет провести аналитическую оценку для выбора минимальной эффективной разрядности АЦП. Проведенные исследования актуальны при выборе АЦП для применения в измерительном устройстве.

**Для цитирования:** Храмкин И. А., Савиных М. А., Пономарев С. В. Оценка погрешности квантования при измерении среднеквадратических значений синусоидальных сигналов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 2. Т. 20. С. 139-151. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-139-151>.

Original article

## **ESTIMATION OF QUANTIZATION ERROR IN MEASUREMENT OF ROOT-MEAN-SQUARE VALUES OF SINE SIGNALS**

#### **Relevance**

In modern electric power industry, digital measuring devices are often used, which are based on the use of analog-to-digital converters (ADCs). Manufacturers of such devices face the choice of an ADC, in particular, the choice of its key characteristic – the resolution.

In the context of measuring devices, the share of the cost of the ADC is one of the main ones in the cost of the final device. At the same time, manufacturers often lay down the ADC with the largest number of resolution binary digits, while obtaining an unreasonably high margin in the number of bits.

#### **Keywords**

error, analog-to-digital conversion, quantization error, digital transformer, current measurement, electric power industry

The issue of choosing the resolution of the ADC based on the quantization error is quite simply solved when measuring constant signals, however, in the case of variable periodic signals, this problem is often solved by a rough theoretical estimate, which leads to the use of an ADC with a higher resolution than would be necessary.

The relevance of this work lies in the development of a proprietary method for solving the problem of estimating the error of quantization of ADCs, which will help developers of modern digital meters select ADCs with the minimum necessary characteristics for their devices, depending on the specified measurement range and accuracy class.

#### **Aim of research**

To develop a method for estimating the quantization error when measuring the root-mean-square values of sinusoidal signals, which includes a mathematical model of the measurement process and a software package that allows you to study the dependencies of the quantization error on the characteristics of the ADC and the shape of the signal under study.

#### **Research methods**

To perform this work, a mathematical modeling method was used with subsequent implementation in the form of a software package written in the LabVIEW language. The article presents a flowchart describing the algorithm of the program, as well as formulas and parameters used to simulate the measurement process and calculate errors.

#### **Results**

A mathematical model of the measurement process has been developed, implemented in a software package in the LabVIEW language. A number of experiments have been carried out investigating the dependence of the quantization error on the number of effective binary digits of the ADC.

The main research results are expressed in the comparison of ADCs with a resolution of 16, 18, 20, 22 and 24 bits in the context of application for measuring AC power frequency in a digital transformer. The character of the change in the quantization error with a change in the signal magnitude is investigated. The results also prove the absence of an explicit dependence of the quantization error on the type of approximation used in the ADC.

The method considered in this paper allows for an analytical assessment to select the minimum effective bit depth of the ADC. The conducted research is relevant when choosing an ADC for use in a measuring device.

**For citation:** Khramkin I. A., Savinykh M. A., Ponomarev S. V. Otsenka pogreshnosti kvantovaniya pri izmerenii srednekvadraticheskikh znachenii sinusoidal'nykh signalov [Estimation of Quantization Error in Measurement of Root-Mean-Square Values of Sine Signals]. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 2, Vol. 20, pp. 139-151 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-139-151>.

#### **Введение**

В настоящее время цифровые измерительные приборы являются важной частью построения современных электроэнергетических систем. Такие измерители обеспечивают не только повышение точности и эффективности контроля над энергоснабжением и энергопотреблением по сравнению с аналоговыми приборами, но и повышают уровень безопасности и автоматизации электроэнергетических объектов. Ключевым элементом, обеспечивающим цифровое

представление измеряемых сигналов, является аналого-цифровой преобразователь (АЦП). АЦП преобразует аналоговый сигнал (обычно, напряжение, пропорциональное измеряемой величине), в цифровой вид, который в дальнейшем может быть обработан цифровыми устройствами. При преобразовании аналогового сигнала в цифровой с использованием АЦП помимо всех инструментальных погрешностей возникает погрешность квантования (дискретности), связанная с тем, что аналоговый сигнал раз-

бывается на конечное количество дискретных уровней (квантов). Погрешность квантования зависит от количества двоичных разрядов преобразователя. Известно также, что на точность аналого-цифрового преобразования также влияет частота дискретизации по времени: от нее зависит количество эффективных разрядов преобразователя. Комбинирование таких параметров, как частота дискретизации и количество двоичных разрядов преобразователя позволяют обеспечить точность измерения. Данный вопрос рассмотрен в [1]. Автор работы пришел к выводу, что при выборе между быстродействием (частотой дискретизации) и разрядностью преобразователя предпочтение стоит отдавать частоте дискретизации, так как в ряде задач частота дискретизации задана конкретно, или имеет ограничения, поэтому вопрос о выборе разрядности АЦП для решения конкретной измерительной задачи актуален.

Таким образом, разработчики измерительных приборов постоянно стоят перед выбором разрядности АЦП, удовлетворяющей цели измерения и классу точности проектируемого оборудования. При измерении сигналов постоянного напряжения вычисление погрешности квантования сводится к расчету ширины кванта, которая определяется диапазоном измерений и разрядностью [2–5]. В этом случае максимальная относительная погрешность дискретности будет равна ширине кванта, либо его половине (в зависимости от типа АЦП), деленной на величину опорного напряжения. При измерении же переменных периодических сигналов ситуация несколько сложнее, поскольку для каждого мгновенного значения измеряемого сигнала его погрешность дискретности будет разной. Поэтому определить интегральную погрешность дискретности АЦП, например, за один период входного сигнала напрямую не представляется возможным. Существует множество методов теоретического оценивания погрешности квантования при измерении периодических сигналов [6, 7], но они не всегда применимы в конкретной задаче и позволяют получить только грубую оценку этой погрешности, которая обычно превышает

реальную погрешность квантования. В связи с этим предложен метод точного оценивания погрешности дискретности в зависимости от разрядности и динамического диапазона АЦП, основанный на численном моделировании процесса дискретизации и квантования периодических синусоидальных сигналов. Предпосылкой к проведению этой работы стала проблема выбора АЦП для разработки цифрового измерителя переменного тока промышленной частоты, поэтому все расчеты и примеры применения данного метода приведены в контексте измерителя тока в цепях сетей низкого и среднего классов напряжений. Однако предложенный метод может быть адаптирован и использован для решения подобных задач при измерении любых других переменных сигналов.

#### **Оценка погрешности квантования АЦП теоретическими методами**

При измерении физической величины одним из первых звеньев измерительного тракта всегда является первичный преобразователь, который преобразует измеряемую величину любой природы в пропорциональное ей напряжение. Далее могут следовать масштабный преобразователь и фазосдвигатель, а также вспомогательные звенья (например фильтры). В итоге, на вход АЦП попадет напряжение, связанное с измеряемой величиной некоторой известной функцией преобразования, которую обычно стремятся сделать линейной. Поэтому в таких случаях абсолютная погрешность дискретности АЦП напрямую переходит в погрешность измерения исходной физической величины через эту функцию преобразования. Относительная же погрешность дискретности АЦП будет равна относительной погрешности дискретности измерения. В случае построения измерителя для электрических сетей наибольший интерес с точки зрения рассматриваемой проблемы имеет измерение тока, поскольку он изменяется в широком диапазоне. В связи с этим далее все расчеты погрешностей приведены именно для тока и в единицах измерения тока, подразумевая, что первопричина этих погрешностей — квантование сигнала, про-

порционного измеряемому току внутри АЦП.

Для начала рассмотрим измерение постоянного тока. В этом случае значение относительной погрешности квантования явно зависит только от ширины кванта преобразователя и отношения измеряемого тока и предела измерения. Поскольку сигнал не меняется во времени, каждая точка вносит одинаковый вклад в интегральную погрешность. Если при аналого-цифровом преобразовании округление измеряемого сигнала происходит до ближайшего кванта, абсолютная погрешность дискретности равна:

$$\Delta_{max_{DC}} = \frac{q}{2}, \quad (1)$$

где  $\Delta_{max_{DC}}$  — максимальная абсолютная погрешность дискретности, А;

$q$  — величина кванта АЦП, А.

Относительная погрешность определяется как:

$$\gamma_{max_{DS}} = \frac{\Delta_{max_{DC}}}{I_{DC}}, \quad (2)$$

где  $\gamma_{max_{DS}}$  — максимальная относительная погрешность дискретности, %;

$I_{DC}$  — сила постоянного тока, А.

Здесь  $q$  — величина кванта АЦП, которая определяется максимальным допустимым измеряемым током и разрядностью АЦП ( $k$ ):

$$q = \frac{I_{DC_{max}}}{2^k}, \quad (3)$$

где  $I_{DC_{max}}$  — максимальная сила постоянного тока измеряемая АЦП, А;

$k$  — количество двоичных разрядов АЦП, бит.

В отличие от измерения постоянных сигналов, при измерении переменных сигналов невозможно так же просто определить общую погрешность дискретности, поскольку мгновенное значение постоянно изменяется. Значение относительной погрешности точек вблизи нуля максимально и стремится к бесконечности, в то время как в пике сигнала она минимальна и является конечной. Итоговая же погрешность квантования переменного сигнала некоторым образом складывается из комбинации отдельных погрешностей дискретности измерений мгновенных значений. Более того, в зависимости от фазы сигнала относительно моментов выборки, эти комбинации могут отличаться, поэтому погрешность

дискретности одного и того же сигнала при одном и том же АЦП может отличаться. По итогу задача может быть поставлена так: какое значение разрядности АЦП следует выбрать, чтобы погрешность дискретности была не более заданного значения?

Разные авторы предлагали отличающиеся подходы к решению этой задачи. Например, расчетный метод оценки погрешности квантования при измерении периодических сигналов рассмотрен в работе [8]. Согласно данному методу, выражение для расчета максимальной погрешности квантования (оценки сверху) при измерении синусоидальных сигналов АЦП с округлением к ближайшему кванту в случае соответствия амплитуды сигнала максимальному коду АЦП ( $2^{k-1}$ ) определяется формулой:

$$\gamma_{max} = \frac{1}{\pi \cdot 2^{k-2}} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где  $\gamma_{max}$  — максимальная относительная погрешность квантования АЦП, %.

Следует отметить, что при расчете погрешности квантования преобразователя необходимо учитывать именно эффективную разрядность АЦП. Например, преобразователь AD7791, имеющий разрядность, равную 24 двоичным разрядам, из-за внутренних шумов уже при частоте дискретизации 9,5 Гц будет иметь эффективную разрядность 22 разряда, а при частоте 33,3 кГц — 20 эффективных разрядов [9].

Исходя из того, что максимальный код АЦП равен опорному сигналу  $I_{ref}$ , выражение для максимальной погрешности квантования при измерении любого значения тока  $I_t$  в заданном диапазоне примет вид:

$$\gamma_{max_t} = \gamma_{max} \cdot \frac{I_{ref}}{I_t}, \quad (5)$$

где  $I_{ref}$  — амплитудное значение силы тока опорного сигнала АЦП, А;

$I_t$  — амплитудное значение силы тока измеряемого сигнала, А.

При измерении периодических сигналов, и в частности электрического тока, удобнее оперировать среднеквадратическими значениями (СКЗ), нежели амплитудными. Тогда, если принять, что  $I_{max}$  — максимальное СКЗ измеряемого тока, то опорное значение  $I_{ref}$  с учетом десятипроцентного запаса можно определить следующим образом:



$$I_{ref} = I_{max} \cdot 1,1 \cdot \sqrt{2}. \quad (6)$$

На рисунке 1 приведены результаты оценки максимальной погрешности квантования, полученные теоретическим расчетом по формулам (4) и (5). По оси ординат указывается относительная погрешность квантования, а по оси абсцисс — значение силы тока (СКЗ) относительно максимального. В качестве начала вычисления погрешностей выбран показатель в 0,05 %, что может иметь место для некоторых существующих цифровых измерителей подобного рода.

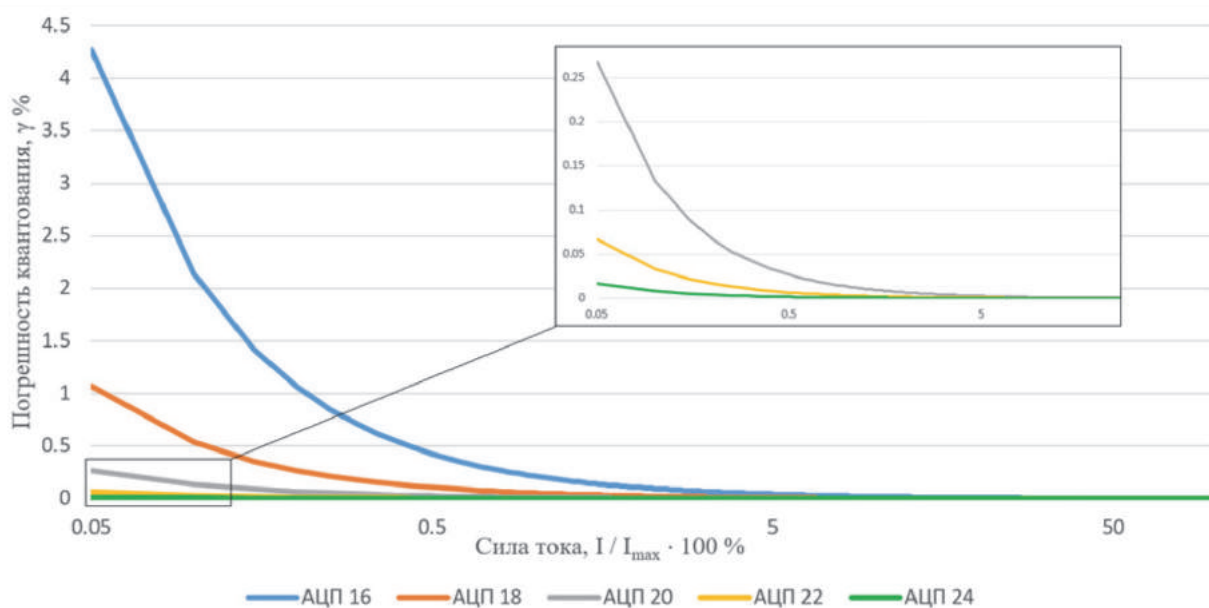
Рассмотренный метод, как уже было сказано, дает завышенное представление о погрешности квантования для выбранной разрядности АЦП, поскольку это лишь оценка сверху. В некоторых случаях такой оценки может быть недостаточно. Например, требуется выбрать АЦП так, чтобы относительная погрешность дискретности при  $\frac{I_t}{I_{max}} \cdot 100 \% = 0,05 \%$  составила бы не более 0,1 %. Согласно рисунку 1, эффективная разрядность АЦП в этом случае должна быть не менее 22. На практике это очень качественный 24-разрядный АЦП с низким уровнем собственного шума. Однако, в действительности, как показали результаты моделирования предложенным методом,

достаточно и меньшей разрядности, поскольку теоретическая оценка завышена.

### Определение зависимости погрешности квантования от числа двоичных разрядов АЦП методом моделирования

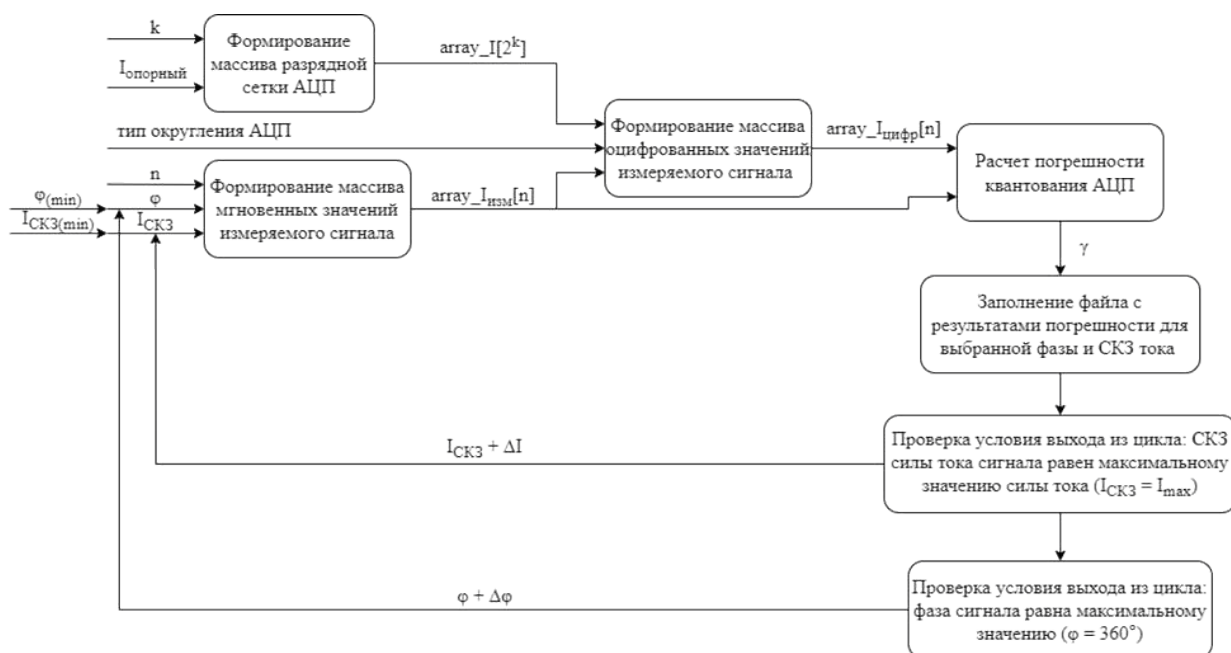
Для получения более точного значения погрешности квантования при измерении переменного тока промышленной частоты была разработана программная модель аналого-цифрового преобразования. Суть её состоит в том, что для каждого значения тока из заданного диапазона формируется массив квантованных значений, по которому вычисляется СКЗ и сравнивается со СКЗ заданного неквантованного сигнала для определения погрешности. Выше было отмечено, что эта погрешность зависит от фазы сигнала относительно начала процесса дискретизации сигнала, поэтому для каждого тока вычисления выполнялись для разного начального фазового сдвига для определения наихудшей комбинации, при которой погрешность квантования максимальна.

Программа написана в среде LabVIEW и ее структурная схема приведена на рисунке 2.



**Рисунок 1.** График зависимости погрешности квантования от количества двоичных разрядов АЦП при измерении переменного тока, определенной теоретическим методом

**Figure 1.** Graph of the dependence of the quantization error on the number of binary digits of the ADC when measuring AC current, determined by a theoretical method



**Рисунок 2.** Структурная схема программного обеспечения для вычисления погрешности квантования АЦП

**Figure 2.** Block diagram of the software for calculating the ADC quantization error

Программа состоит из следующих блоков: формирование массива квантов разрядной сетки преобразователя, расчет мгновенных значений исходного сигнала для аналого-цифрового преобразования, дискретизация и квантование измеряемого сигнала, вычисление погрешности квантования.

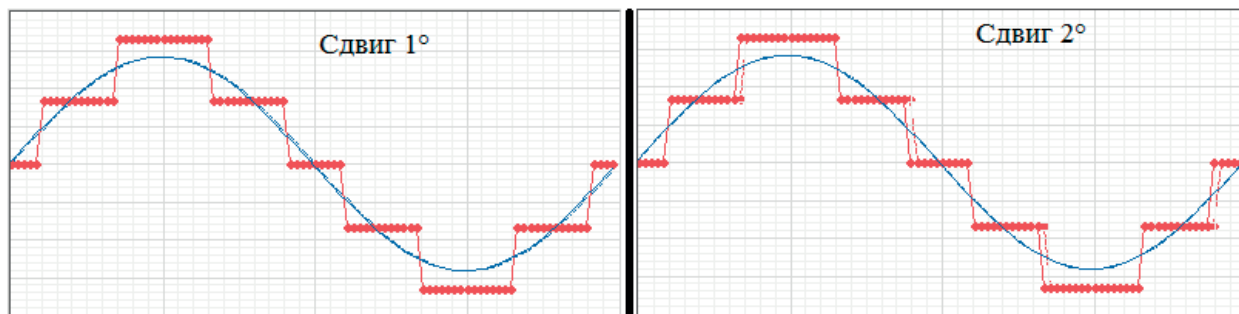
Частота дискретизации была выбрана исходя из контекста исходной задачи. Согласно стандарту МЭК 61850-9-2 [10], для целей релейной защиты и автоматики (РЗА), измерений автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) [11], коммерческого учета требуется 96 выборок за период сетевого напряжения, откуда следует, что для промышленной частоты 50 Гц частота дискретизации равна 4800 Гц.

Очевидно, что количество уровней квантования напрямую зависит от амплитуды сигнала. В связи с этим на малых амплитудах небольшие сдвиги исходного сигнала по фазе не приводят к существенным изменениям погрешности квантования (массив точек на графике красного цвета на рисунке 3), и, соответственно, во всем этом диапазоне фазовых сдвигов погрешность квантования неизменна. При большем сдвиге фазы

цифровые отсчеты перераспределяются по уровням, и погрешность квантования принимает новое значение. Поэтому при всех возможных сдвигах фазы набор возможных погрешностей квантования конечен, и он тем меньше, чем меньше амплитуда тока. Пример на рисунке 3: сдвиг по фазе в пределах  $1^\circ$  исходного сигнала малой амплитуды никак не меняет цифровой сигнал. В то время как больший сдвиг (например на  $2^\circ$ ) изменяет количество точек на каждом уровне, и вычисленные по этому массиву СКЗ будет несколько отличаться.

Таким образом, для каждого выбранного значения тока фаза менялась в диапазоне от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  для поиска наибольшей погрешности, однако для оптимизации вычислений шаг изменения фазы изменялся, в зависимости от выбранного значения тока: чем больше ток, тем меньше шаг.

Значения тока по той же причине изменялись неравномерно. При любом токе в диапазоне от минимального до максимального значения укладывается некоторое фиксированное количество квантов АЦП. В зависимости от фазового сдвига число точек на каждом уровне может изменяться, как было показано выше, однако, значения и количе-



**Рисунок 3.** Результат аналого-цифрового преобразования для исходного сигнала и сдвинутого на  $1^\circ$  (цифровой массив не меняется) и сдвинутого на  $2^\circ$  (точки цифрового массива перераспределились между уровнями)

**Figure 3.** The result of analog-to-digital conversion for the original signal and shifted by  $1^\circ$  (the digital array does not change) and shifted by  $2^\circ$  (the points of the digital array are redistributed between levels)

ство самих квантов неизменны. При постепенном увеличении тока в некотором диапазоне количество квантов не изменяется, поэтому максимальная относительная погрешность дискретности плавно уменьшается. Однако в какой-то момент к имеющемуся набору квантов добавится еще один или два (в зависимости от типа округления), что приведет к новому набору СКЗ квантованного сигнала, и в некоторых случаях приводит к увеличению погрешности. Очевидно, что данный эффект наиболее выражен при малых токах, когда количество уровней квантованного сигнала небольшое. В связи с этим для охвата всех возможных вариантов погрешности дискретности в исследуемом диапазоне и оптимизации вычислений шаг изменения тока увеличивается по мере увеличения тока.

В результате диапазон и шаг изменения параметров моделирования в программе были выбраны следующие:

- СКЗ сигнала от  $5 \cdot 10^{-2} \%$  до  $1,5 \cdot 10^{-1} \%$  с шагом  $5 \cdot 10^{-5} \%$  и сдвигом фазы от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  с шагом  $1 \cdot 10^{-1} \circ$ ;
- СКЗ сигнала от  $1,5 \cdot 10^{-1} \%$  до  $3 \cdot 10^{-1} \%$  с шагом  $5 \cdot 10^{-4} \%$  и сдвигом фазы от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  с шагом  $1 \cdot 10^{-2} \circ$ ;
- СКЗ сигнала от  $3 \cdot 10^{-1} \%$  до  $5 \cdot 10^{-1} \%$  с шагом  $5 \cdot 10^{-3} \%$  и сдвигом фазы от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  с шагом  $1 \cdot 10^{-3} \circ$ ;
- СКЗ сигнала от  $5 \cdot 10^{-1} \%$  до  $15 \%$  с шагом  $5 \cdot 10^{-2} \%$  и сдвигом фазы от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  с шагом  $1 \cdot 10^{-3} \circ$ .

Погрешность была рассчитана для АЦП с количеством двоичных разрядов, равным: 16 бит, 18 бит, 20 бит, 22 бит, 24 бит. И типом округления аналого-цифрового преобразователя: к меньшему кванту разрядной сетки АЦП, к большему кванту, к ближайшему кванту.

Начало выполнения функций программного обеспечения происходит с блока формирования массива квантов разрядной сетки. Количество квантов и их значение зависят от величины опорного сигнала и разрядности АЦП. Значения могут быть вычислены по формуле:

$$I_i = I_{ref} - \frac{I_{ref} \cdot i}{2^{k-1}}, \quad (7)$$

где  $I_i$  — значение  $i$ -го кванта АЦП, А.

Номер индекса последнего (максимального) кванта определяется как:

$$i_{max} = 2^k - 1. \quad (8)$$

Входными параметрами функции являются разрядность преобразователя и значение опорного сигнала. Результатом работы функции является массив квантов для преобразования сигнала.

По завершению формирования массива квантов происходит генерация мгновенных значений измеряемого сигнала, формирование массива исходного сигнала с частотой выборки преобразователя и формирование массива оцифрованного сигнала посредством дискретизации и квантования измеряемого сигнала. Расчет мгновенных значений измеряемого сигнала для каждой итерации

определенной фазы происходит из выбранного среднеквадратического значения измеряемого сигнала  $I_{СКЗ}$  и может быть вычислен по формуле:

$$I_{m_{изм}} = \sqrt{2} \cdot I_{СКЗ} \cdot \sin\left(\frac{360^\circ \cdot m}{n} + \varphi\right), \quad (9)$$

где  $I_{m_{изм}}$  — мгновенное значение измеряемого сигнала, А;

$I_{СКЗ}$  — среднеквадратическое значение сигнала, А;

$n$  — количество выборок преобразователя за период;

$m$  — номер выборки мгновенного значения измеряемого сигнала ( $m_{max} = n - 1$ );

$\varphi$  — фаза измеряемого сигнала, °.

Формирование массива исходного сигнала с частотой выборок преобразователя и формирование массива оцифрованного сигнала происходят в цикле с количеством итераций, равных числу выборок за период. Заполнение массива исходного сигнала происходит значениями, рассчитанными по формуле (9) по завершению каждой итерации цикла. Формирование массива цифровых значений происходит посредством аналого-цифрового преобразования. Преобразование сигнала происходит путем выбора кванта из массива разрядной сетки преобразователя методом бинарного поиска. Выбор кванта происходит в соответствии с типом округления АЦП. Значение кванта заносится в массив цифровых значений после каждой итерации цикла.

В завершении, когда массивы сформированы, программа выполняет расчет погрешности квантования. Расчет погрешности квантования можно выполнить по следующим формулам:

$$I_{СКЗ} = \sqrt{\sum_{m=0}^{n-1} \frac{I_m^2}{n}}; \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{I_{СКЗ_{цифр}} - I_{СКЗ_{изм}}}{I_{СКЗ_{изм}}} \cdot 100 \%, \quad (11)$$

где  $\gamma$  — погрешность квантования аналого-цифрового преобразователя, %;

$I_{СКЗ_{цифр}}$  — СКЗ сигнала, рассчитанное по значениям массива цифровых значений, А;

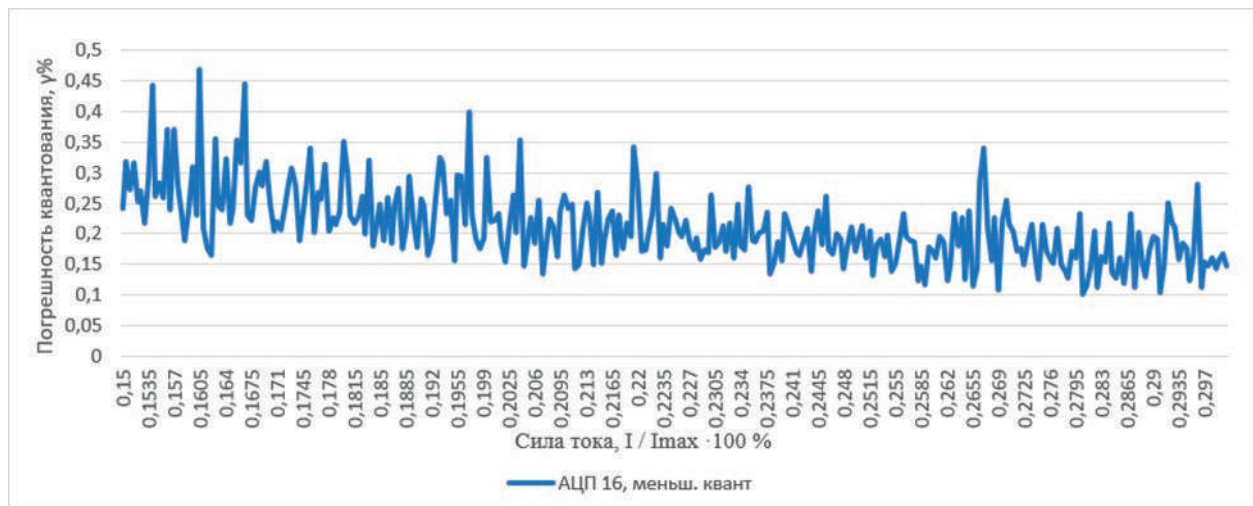
$I_{СКЗ_{изм}}$  — СКЗ сигнала, рассчитанное по значениям массива задаваемого сигнала, А.

После вычисления погрешности данные заносятся в файл измерений для дальнейшей обработки.

В процессе обработки результатов было выявлено, что погрешность квантования, рассчитанная для шага СКЗ измеряемого сигнала, равного  $5 \cdot 10^{-2} \%$ , показала немонотонный характер: погрешность при большем СКЗ сигнала тоже могла оказаться больше. Это связано с описанным выше ступенчато изменяющимся набором квантов в цифровом массиве сигнала. Поэтому вычисление погрешности рассчитывалось с очень маленьким шагом СКЗ сигнала: чтобы обнаружить все возможные «пики» погрешности квантования в исследуемом диапазоне тока. На рисунке 4 представлен график погрешности квантования для диапазона тока от  $1,5 \cdot 10^{-1} \%$  до  $3 \cdot 10^{-1} \%$  от максимального СКЗ тока с шагом по среднеквадратическому значению сигнала, равным  $5 \cdot 10^{-5} \%$  от максимального СКЗ тока. Погрешность, указанная на рисунке 5, является максимальной погрешностью для каждого значения СКЗ сигнала из значений фаз сигнала в диапазоне от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  с шагом  $1 \cdot 10^2$  °.

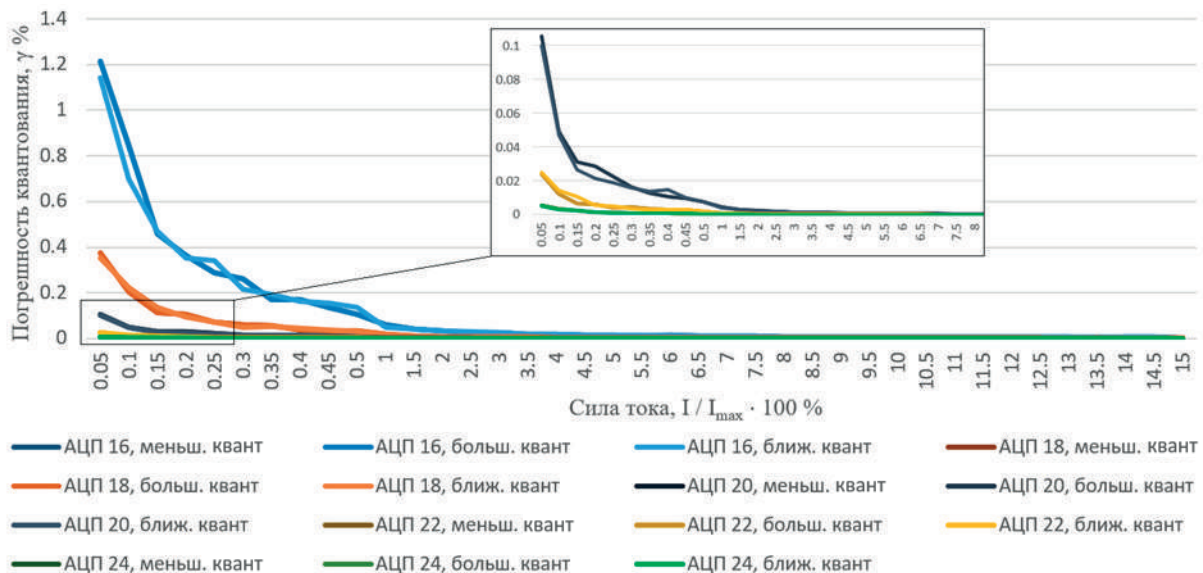
На рисунке 5 приведены обобщенные результаты вычисления максимальной погрешности квантования, полученные разработанным методом моделирования. На графиках показаны максимальные погрешности квантования в диапазоне относительных значений тока от 0,05 % до 15 % с шагом 0,05 %...0,5 %. При этом значение в каждой точке определяется как максимальное из ее окрестности — полного набора значений погрешностей, полученных с малым шагом изменения тока (показанных на рисунке 4).

Проанализировав полученные результаты моделирования погрешности, можно заметить, что тип округления к большему или меньшему кванту при изменении прочих параметров, таких как СКЗ и фаза измеряемого сигнала, не влияет на максимальную погрешность квантования. При округлении до ближайшего кванта погрешность незначительно отличается от полученной при округлении до большего или меньшего кванта либо в большую, либо в меньшую сторону, явной тенденции не выявлено. Из этого следует, что способ округления в процессе квантования практически не влияет на итоговую интегральную погрешность кван-



**Рисунок 4.** График зависимости погрешности квантования от количества двоичных разрядов АЦП при измерении сигнала переменного тока

**Figure 4.** Graph of the dependence of the quantization error on the number of binary bits of the ADC when measuring an alternating current signal



**Рисунок 5.** Графики зависимости погрешности квантования от количества двоичных разрядов АЦП при измерении сигнала переменного тока методом моделирования

**Figure 5.** Graphs of the dependence of the quantization error on the number of binary bits of the ADC when measuring an AC signal using the simulation method

тования при измерении СКЗ переменных сигналов.

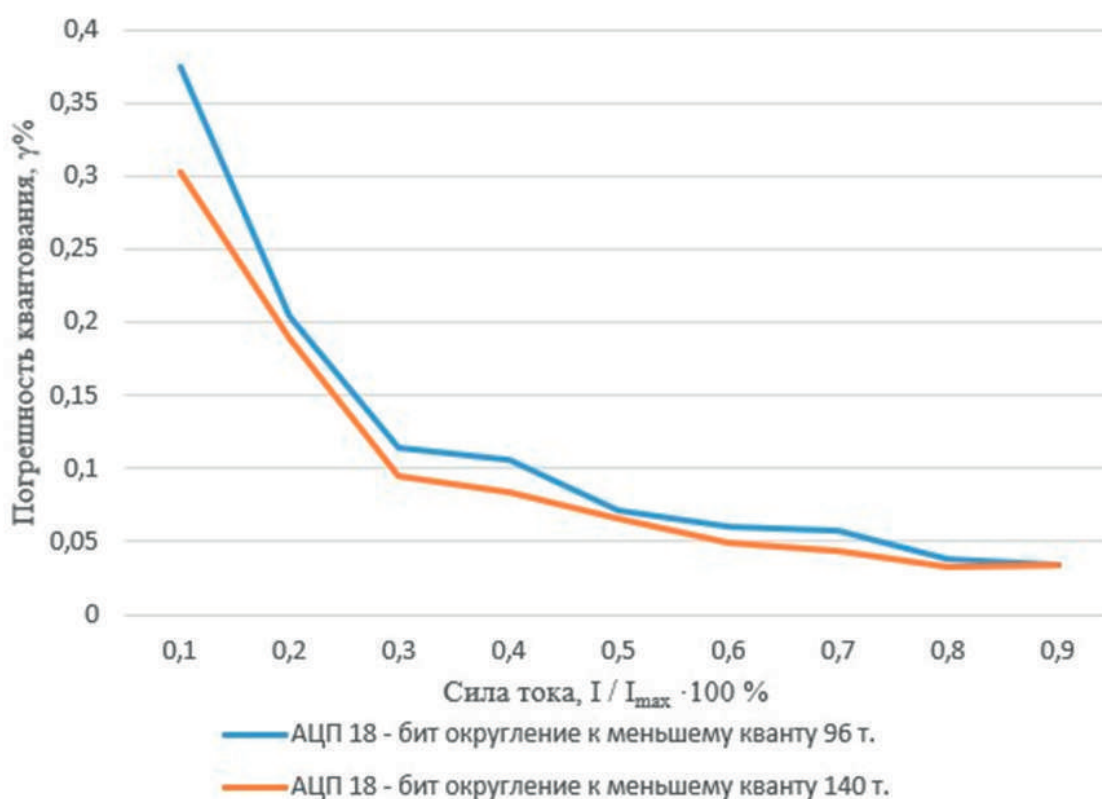
Сравнивая результаты, полученные путем программного моделирования (рисунок 5) с теоретическими оценками сверху (рисунок 1), можно заметить, что погрешность квантования, полученная в результате моделирования, примерно в 3–4 раза меньше теоретической оценки. Ее объективно можно считать более точной. Для рассмо-

тренного в начале статьи примера (допустимая погрешность квантования 0,1 % при токе 0,5 % относительно максимального) составляет 20 бит, а не 22, что значительно снижает требования к характеристикам АЦП.

Как было указано ранее, на точность измерения АЦП помимо разрядности преобразователя также влияет и частота дискретизации сигнала (число точек выборки за

период). Для демонстрации влияния частоты дискретизации по времени на погрешность квантования для сравнения был выполнен расчёт погрешности квантования для частоты 4800 Гц, что составляет 96 выборок за период сигнала и частоты 7000 Гц, что составляет 140 выборок за период. Разрядность АЦП для примера была выбрана равной 16 эффективным разрядам. Расчет погрешности был выполнен для диапазона измерений от 0,05 % до 0,45 % от максимального значения, измеряемого АЦП. Результаты расчёта погрешностей

представлены на рисунке 6. На графиках видно, что при увеличении количества выборок за период с 96 до 140, погрешность дискретизации уменьшится в 1,2 раза. Таким образом, разработанный метод определения погрешности квантования путем моделирования также показал зависимость этой погрешности от частоты дискретизации. При необходимости, с его помощью можно получить зависимость погрешности квантования от относительной величины тока для (условно) любой частоты дискретизации.



**Рисунок 6.** График зависимости погрешности дискретизации от частоты выборки мгновенных значений АЦП при измерении сигнала переменного тока

**Figure 6.** Graph of sampling error versus sampling frequency of instantaneous ADC values when measuring an AC current signal

### Вывод

Проведено исследование зависимости погрешности квантования от числа эффективных двоичных разрядов АЦП при измерении среднеквадратических значений синусоидальных сигналов с методом программного моделирования процесса аналого-цифрового преобразования. Метод, рассмотренный в данной работе, позволяет провести аналитическую оценку для выбора

минимальной эффективной разрядности АЦП. Полученные результаты в общем коррелируют с теоретическими методами оценки погрешности квантования, но являются более точными. Разработанный метод может быть использован при выборе аналого-цифрового преобразователя с оптимальными характеристиками для проектируемого измерительного устройства.

## Список источников

1. Жмудь В.А. Сопоставление вклада погрешностей квантования по времени и по уровню в результат аналогоцифрового преобразования // Автоматика и программная инженерия. 2015. № 3 (13). С. 65-70. EDN: VKPMEH.
2. Muntyanov S.N., Volovich G.I., Yakovlev V.A. AC Digital Voltmeter Error Caused by Amplitude Quantization // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2018. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8729126.
3. Arar S. Understanding Amplitude Quantization Error for ADCs // ALL ABOUT CIRCUITS. 2019. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/understanding-amplitude-quantization-error-analog-digital-converters/> (дата обращения: 25.03.2024).
4. Wasim Shaikh, Srikanth Nittala. Simplifying AC and DC Data Acquisition Signal Chains // Embedded. 2020. URL: <https://www.embedded.com/simplifying-ac-and-dc-data-acquisition-signal-chains/> (дата обращения: 28.03.2024).
5. Эффективная разрядность как критерий выбора АЦП // Время электроники. 2012. URL: <https://russianelectronics.ru/effektivnaya-razryadnost-kak-kriterij-vybora-aczp/> (дата обращения: 11.03.2024).
6. Иванов Ю.М. Анализ влияния погрешности квантования на результат измерения интегральных характеристик гармонических сигналов // Вестник СГТУ. Серия «Технические науки». 2013. Т. 4. № 40. С. 65-70.
7. Волович Г.И., Литвинова Е.В., Мунтянов С.Н., Яковлев В.А. Погрешность цифрового вольтметра переменного тока, обусловленная квантованием по уровню // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2019. Т. 19. № 4. С. 132-138. DOI: 10.14529/power190415.
8. Бабичев М.М., Пасынков Ю.А. Оценки погрешности дискретности при измерении среднеквадратических значений периодических сигналов // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2014): тр. 12 Междунар. конф., Новосибирск, 2-4 окт. 2014 г.: в 7 т. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014, Т. 3, С. 191-194. EDN: TIDNXN.
9. Юрманов В.А., Пискаев К.Ю. Анализ погрешности квантования  $\Sigma\Delta$ -АЦП // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 1 (9). С. 24-29.
10. IEC 61850-9-2(2020). Communication Networks and Systems for Power Utility Automation — Part 9–2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) - Sampled Values over ISO/IEC 8802-3. 38 p.
11. Horalek J., Matyska J., Sobeslav V. Communication Protocols in Substation Automation and IEC 61850 Based Proposal // 2013 IEEE 14th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI). Budapest, Hungary, 2013. DOI: 10.1109/CINTI.2013.6705214.

## References

1. Zhmud' V.A. Sopostavlenie vklada pogreshnosti kvantovaniya po vremeni i po urovnyu v rezul'tat analogotsifrovogo preobrazovaniya [Comparison of the Contribution of Quantization Errors by Time and Level to the Result of Analog-to-Digital Conversion]. *Avtomatika i programmnaya inzheneriya — Automation and Software Engineering*, 2015, No. 3 (13). pp. 65-70. EDN: VKPMEH. [in Russian].
2. Muntyanov S.N., Volovich G.I., Yakovlev V.A. AC Digital Voltmeter Error Caused by Amplitude Quantization. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2018. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8729126.
3. Arar S. Understanding Amplitude Quantization Error for ADCs. *ALL ABOUT CIRCUITS*. 2019. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/understanding-amplitude-quantization-error-analog-digital-converters/> (accessed 25.03.2024).
4. Wasim Shaikh, Srikanth Nittala. *Simplifying AC and DC Data Acquisition Signal Chains*. Embedded. 2020. URL: <https://www.embedded.com/simplifying-ac-and-dc-data-acquisition-signal-chains/> (accessed 28.03.2024).
5. Effektivnaya razryadnost' kak kriterii vybora ATsP [Effective Bit Depth as a Criterion for Selecting an ADC]. *Vremya elektroniki — Time of Electronics*, 2012. URL: <https://russianelectronics.ru/effektivnaya-razryadnost-kak-kriterij-vybora-aczp/> (accessed 11.03.2024). [in Russian].
6. Ivanov Yu.M. Analiz vliyaniya pogreshnosti kvantovaniya na rezul'tat izmereniya integral'nykh kharakteristik garmonicheskikh signalov [The Analysis of Influence of the Quantization Error on Result of Measurement of Harmonious Signals Integrated Characteristics]. *Vestnik SGTU. Seriya «Tekhnicheskie nauki» — Vestnik SSTU. Series «Technical Sciences»*, 2013, Vol. 4, No. 40, pp. 65-70. [in Russian].
7. Volovich G.I., Litvinova E.V., Munt'yanov S.N., Yakovlev V.A. Pogreshnost' tsifrovogo vol'tmetra peremennogo toka, obuslovlennaya kvantovaniem po urovnyu [Digital AC Voltmeter Error Caused by Level Quantization]. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika» — Bulletin of SUSU*.

*Series «Energy»*, 2019. Т. 19, № 4. С. 132-138. DOI: 10.14529/power190415. [in Russian].

8. Babichev M.M., Pasyukov Yu.A. Otsenki pogreshnosti diskretnosti pri izmerenii srednekvadraticheskikh znachenii periodicheskikh signalov [Estimates of the Discreteness Error When Measuring the Root-Mean-Square Values of Periodic Signals]. *Trudy 12 Mezhdunarodnoi konferentsii «Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya (APEP-2014)»*, Novosibirsk, 2-4 okt. 2014 g.: v 7 t. [Scientific Works of 12 International Conference «Current Problems of Electronic Instrument Making (APEP-2014)»], Novosibirsk, October 2-4. 2014: in 7 vol.]. Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2014, Vol. 3, pp. 191-194. EDN: TIDNXN. [in Russian].

9. Yurmanov V.A., Piskaev K.Yu. Analiz pogreshnosti kvantovaniya  $\Sigma\Delta$ -ATsP [Analysis of Quantization Error of  $\Sigma\Delta$ -ADC]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem — Reliability and Quality of Complex Systems*, 2015, No. 1 (9), pp. 24-29. [in Russian].

10. IEC 61850-9-2(2020). *Communication Networks and Systems for Power Utility Automation - Part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) - Sampled Values over ISO/IEC 8802-3*. 38 p.

11. Horalek J., Matyska J., Sobeslav V. Communication Protocols in Substation Automation and IEC 61850 Based Proposal, *2013 IEEE 14th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)*, Budapest, Hungary, 2013. DOI: 10.1109/CINTI.2013.6705214.

*Статья поступила в редакцию 28.04.2024; одобрена после рецензирования 14.05.2024; принята к публикации 13.06.2024.*

*The article was submitted 28.04.2024; approved after reviewing 14.05.2024; accepted for publication 13.06.2024.*



Научная статья

УДК 53.088

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-2-152-161

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОЖАРООПАСНЫХ ЖИДКОСТЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*Юлия Валерьевна Гашенко**Yuliya V. Gashenko**аспирант, старший преподаватель кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Институт автоматизации и информационных технологий, Самарский государственный технический университет, Самара, Россия*

### Актуальность

Одним из универсальных показателей качества нефти и нефтепродуктов является плотность. Широко используемые в настоящее время измерительные устройства обеспечивают дискретное измерение плотности в лабораторных условиях, что не позволяет проводить своевременный контроль за параметром в непрерывном режиме и требует постоянного отбора проб, а также осложняется высокотемпературными режимами технологических процессов, агрессивностью и пожароопасностью исследуемых сред. По этим причинам наблюдается необходимость разработки средств и способов непрерывного измерения и контроля плотности жидких сред, исключающих приведенные выше недостатки. Однако выпускаемые датчики и системы измерения плотности нефтепродуктов требуют в конструкции изделия дополнительных систем и контуров защиты от случайного проскакивания искры, не всегда имеют точность, удовлетворяющую требованиям технологических процессов, обладают трудоемкостью изготовления и применения, а также имеют высокую стоимость комплектующих. Стоит задача создания систем измерения плотности жидкости, исключающих недостатки существующих средств измерения плотности жидкости, решение которой возможно благодаря применению волоконно-оптических технологий для преобразования различных физических величин.

### Цель исследования

Статья посвящена результатам проведенного метрологического анализа измерительного канала волоконно-оптического преобразователя плотности жидких сред на основе поплавкового датчика плотности в составе волоконно-оптической измерительной системы плотности жидких пожароопасных жидкостей, а также анализу полученных экспериментальных данных разработанного устройства.

### Методы исследования

Среди методов исследований в данной статье можно выделить: моделирование (построение структурных и метрологических моделей измерительного преобразователя), эксперимент (экспериментальные

### Ключевые слова

поплавковый плотномер, волоконно-оптический преобразователь, плотность жидкости, метрологический анализ, погрешность, измерительный канал, сильфоны, оптическая решетка, преобразователь перемещений, метрологическая модель

исследования измерительной системы в различных жидких средах при различных температурах рабочей среды и сравнение с показаниями образцовых ареометров), измерение (получение результата измерения на дисплее датчика или экране персонального компьютера после расчета искомой плотности жидкой среды в зависимости от перемещения поплавка с помощью разработанного программного кода).

Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась с помощью программного пакета Microsoft Office Excel. Преобразование измеренной величины перемещения поплавка производилось с помощью программного кода, написанного на языке C в среде разработки ПО IAR Embedded Workbench.

### Результаты

Приведена конструкция чувствительного элемента и волоконно-оптического преобразователя плотности. Проведен метрологический анализ волоконно-оптической системы измерения плотности пожароопасных жидкостей, построена структурная метрологическая модель измерительного канала. Найдены факторы, оказывающие наибольшее влияние на точность прибора, а также приведены способы их минимизации. Представлены результаты экспериментальных исследований измерительной системы, подтверждающие ее соответствие требуемой точности.

**Для цитирования:** Гашенко Ю. В. Метрологический анализ системы измерения плотности пожароопасных жидкостей с применением волоконно-оптического преобразователя // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 2. Т. 20. С. 152-161. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-152-161>.

Original article

## METROLOGICAL ANALYSIS OF A SYSTEM FOR MEASURING THE DENSITY OF FLAMMABLE LIQUIDS USING A FIBER-OPTIC TRANSDUCER

### Relevance

Density is the one of the universal indicators of the oil and petroleum products quality. In the moment, widely used measuring devices provide discrete measurement of density in laboratories, which does not allow providing real-time monitoring of the parameter and requires constant sampling. Most of all it is also complicated by high-temperature conditions of technological processes, aggressiveness, and fire hazard of the working substance. That is why there is a need to develop methods for continuously measuring and monitoring the density of liquids, eliminating the above disadvantages. However, discovered sensors and systems for measuring the density of petroleum products require additional systems and protection circuits in the product design against accidental sparks do not always have an accuracy that meets the requirements of technological processes, are labor-intensive to manufacture and use, and have a high cost of components. The task is to create systems for measuring liquid density that eliminate the shortcomings of existing means of measuring liquid density, the solution of which is possible using fiber-optic technologies to convert various physical quantities.

### Aim of research

The article is devoted to the results of a metrological analysis of the measuring channel of a fiber-optic density transducer of liquids on a float density sensor as part of a fiber-optic measuring system for the density of

### Keywords

float density meter, fiber optic transducer, liquid density, metrological analysis, accuracy, measuring channel, bellows, optical lattice, displacement transducer, metrological model

liquid flammable liquids, as well as an analysis of the obtained experimental data of the developed device.

### Research methods

Among the research methods in the article we can highlight: modeling (construction of structural and metrological models of the measuring transducer), experiment (experimental studies of the measuring system in various liquid media at different temperatures of the working environment and comparison with standard hydrometers), measurement (obtaining the measurement result on the display sensor or personal computer after calculating the required density of the liquid medium depending on the float movement using the developed program code).

The results of experimental studies were processed using the Microsoft Office Excel. The conversion of the measured value of the float movement was carried out using program code written in C in the IAR Embedded Workbench software development environment.

### Results

The sensor and the fiber-optic density converter are presented. A metrological analysis of a fiber-optic system for measuring the density of flammable liquids was carried out, and a structural metrological model of the measuring channel was built. The factors that have the greatest impact on the accuracy of the device are found, and ways to minimize them are also given. The results of experimental studies of the measuring system are presented, confirming its compliance with the required accuracy.

**For citation:** Gashenko Yu. V. Metrologicheskii analiz sistemy izmereniya plotnosti požaroопасnykh zhidkostei s primeneniem volokonno-opticheskogo preobrazovatelya [Metrological Analysis of a System for Measuring the Density of Flammable Liquids Using a Fiber-Optic Transducer]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 2, Vol. 20, pp. 152-161 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-152-161>.

### Введение

Плотность нефтепродуктов и продуктов нефтехимии является одним из важнейших и универсальных показателей качества нефти и ее производных. В связи с этим возникает потребность в разработке средств непрерывного измерения плотности жидких сред, обеспечивающих необходимую точность и своевременность измерений, стойкость к агрессивным средам и высоким температурам, взрыво- и пожаробезопасность, а также доступность по сравнению с зарубежными средствами измерения. Существующие промышленные датчики и системы измерения плотности нефтепродуктов требуют в конструкции изделия дополнительных систем и контуров защиты от случайного проскакивания искры, а также многие из них обладают недостаточной точностью и имеют ряд особенностей, препятствующих их активному применению.

Была произведена разработка волоконно-оптической системы измерения плотности

пожароопасных жидкостей на основе поплавкового датчика плотности, главными преимуществами которой являются высокая чувствительность и отсутствие риска случайного проскакивания искры за счет исключения электрических элементов во взрывоопасной измерительной среде. В данной статье приводится метрологический анализ полученной измерительной системы, а также результаты лабораторных испытаний измерительной системы, которые подтверждают соответствие требуемой точности измерений.

### Устройство плотномера

Измерительная часть предлагаемого устройства (рисунки 1 и 2) представляет собой поплавок 6, полностью погруженный в измерительную среду. Поплавок закреплен на сильфонах 4, 5, присоединенных к кронштейнам 1, 2 на стенке емкости 3. К поплавку крепится шток-толкатель 7, жестко соединенный с оптической решеткой 8.

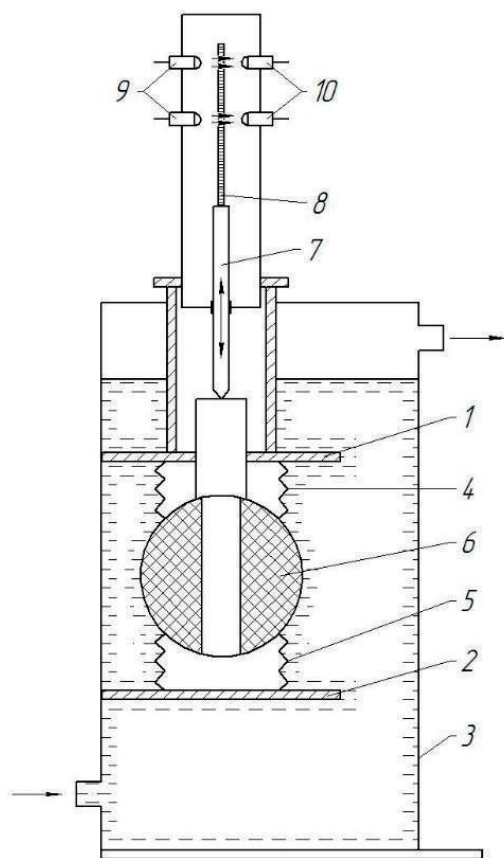
Пропорционально плотности жидкости поплавок перемещается вертикально и через шток-толкатель перемещает оптическую решетку. Оптическая решетка, имеющая чередующиеся темные и светлые области шириной 8 мкм, пересекает излучение от подводящих оптических волокон 9, попеременно затемняя отводящие оптические волокна 10. Таким образом, при каждом смещении решетки на 8 мкм оптический сигнал принимает нулевое значение. Сигналы считываются счетчиком прямого и обратного хода и далее подвергаются обработке и преобразованию [1].

Согласно исследованиям [2], для достижения эффективности преобразования светового потока предполагается очень малое расстояние расположения элементов преобразователя относительно друг друга, что представляет большую сложность при его сборке и калибровке. Поэтому в оптический канал преобразователя вводятся коллима-

торные линзы, которые монтируются на торцах подводящего и отводящего оптических волокон. Выходящее излучение аккумулируется коллиматорной линзой, внутри которой оно преобразуется в направленный параллельный пучок, что минимизирует его расходимость. Таким образом, можно увеличить расстояние между подводящим и отводящим торцами оптоволокон, а также расстояние расположения модулирующего элемента и решетки до размеров, удобных для сборки и настройки измерительного устройства.

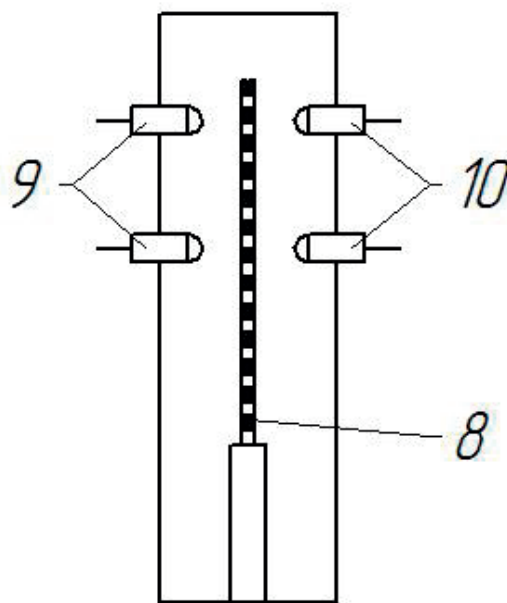
**Метрологический анализ волоконно-оптической системы измерения плотности пожароопасных жидкостей**

Измерение плотности с помощью лабораторных или переносных приборов, таких как ареометры и пикнометры, является наиболее распространённым способом на предприятиях нефтеперерабатывающего комплекса. Обычно их абсолютная погрешность составляет 0,5–1 кг/м³. Согласно рекомендациям [3], пределы допускаемой абсолютной погрешности при измерении плотности нефти, нефтепродуктов и смесей нефти и жидких не нефтяных продуктов



**Рисунок 1.** Измерительная часть устройства измерения плотности с волоконно-оптическим преобразователем

**Figure 1.** Measuring part of a density measuring device with a fiber-optic transducer



**Рисунок 2.** Устройство оптоволоконного преобразователя плотности

**Figure 2.** Fiber optic density transducer construction

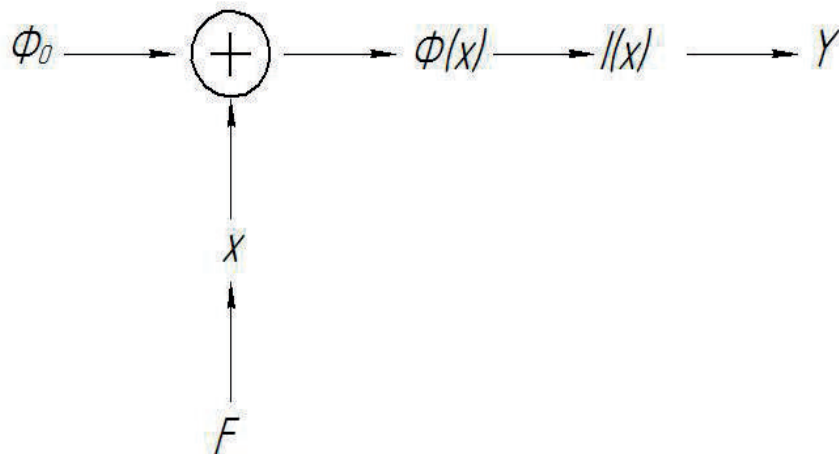
лабораторными методами (ареометрическим, пикнометрическим и вибрационным) не должна превышать  $1,5 \text{ кг/м}^3$ . Соответственно, непрерывное динамическое измерение плотности должно обеспечивать точность, коррелирующую с указанной величиной погрешности. Однако, чем конструктивно сложнее прибор, тем больше факторов воздействует на погрешность измерения и метрологические характеристики.

Метрологический анализ измерительного канала волоконно-оптической системы измерения плотности жидкостей необходим для обнаружения возможных источников погрешностей и определения способов их минимизации [4]. В разрабатываемом устройстве измеряемая плотность жидкости посредством результирующей силы  $F$ , воздействующей на поплавков, преобразуется в перемещение оптической решетки  $x$ . В свою очередь, поступающий световой поток  $\Phi_0$  после прохождения оптической решетки

преобразуется в  $\Phi(x)$ , и далее с помощью устройств преобразования в токовый сигнал  $I(x)$  и в более удобную для дальнейшей обработки некоторую величину  $Y$ . Схемно-аналитическая модель представлена на рисунке 3.

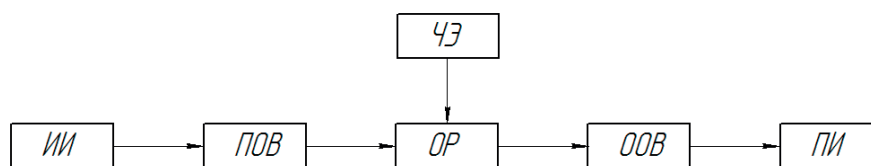
Исходя из приведенной схемно-аналитической модели преобразования оптического сигнала для конкретизации процесса снижения погрешностей при преобразовании сигналов в волоконно-оптическом преобразователе плотности жидкостей построены структурная (рисунок 4) и функциональная (рисунок 5) схемы волоконно-оптического преобразователя соответственно [4].

В структурной схеме волоконно-оптического преобразователя представлены следующие элементы: ИИ — источник излучения; ПОВ — подводящее оптическое волокно; ОР — оптическая решетка; ООВ — отводящее оптическое волокно; ПИ —



**Рисунок 3.** Схемно-аналитическая модель преобразования оптического сигнала в волоконно-оптическом преобразователе плотности

**Figure 3.** Analytical model of optical signal conversion in a fiber-optic density transducer



**Рисунок 4.** Структурная схема волоконно-оптического преобразователя плотности жидкостей

**Figure 4.** Block diagram of a fiber-optic liquid density transducer

приемник излучения; ЧЭ — чувствительный элемент (поплавок).

В функциональной схеме волоконно-оптического преобразователя приняты следующие обозначения:  $U_{\Pi}$  — напряжение питания;  $S_{ЧЭ}$  — чувствительность поплавка (чувствительного элемента);  $S_{ИИ}$  — чувствительность источника излучения;  $K_{ПОВ}$  — коэффициент передачи «источник излучения — подводящее оптическое волокно»;  $K_{ОР}$  — коэффициент передачи оптической решетки;  $K_{ООВ}$  — коэффициент передачи «оптическая решетка — отводящее оптическое волокно»;  $S_{ПИ}$  — чувствительность приемника излучения.

Математическая функция преобразования имеет вид [4]:

$$Y = P_{ИИ} S_{ЧЭ} K_{ПОВ} K_{ОР} K_{ООВ} S_{ПИ} F,$$

где  $Y$  — выходная величина;

$F$  — сила, воздействующая на поплавок.

Для анализа возможных источников погрешностей была построена структурная метрологическая модель измерительного канала волоконно-оптической системы измерения плотности [4], представленная на рисунке 6.

D1 — погрешность юстировки ПОВ относительно источника излучения;

D2, D3 — погрешность из-за неточности начальной установки чувствительного элемента относительно ПОВ и ООВ;

D4 — погрешность из-за неточности юстировки ПОВ и ООВ относительно друг друга;

D5 — погрешность юстировки ООВ относительно ПИ;

D6 — погрешность спектрального согласования ИИ и ПИ;

ДЛ1, ДЛ2 — погрешность, вносимая коллиматорными линзами из-за смещения при установке, дефекта резьбы, неточности изготовления;

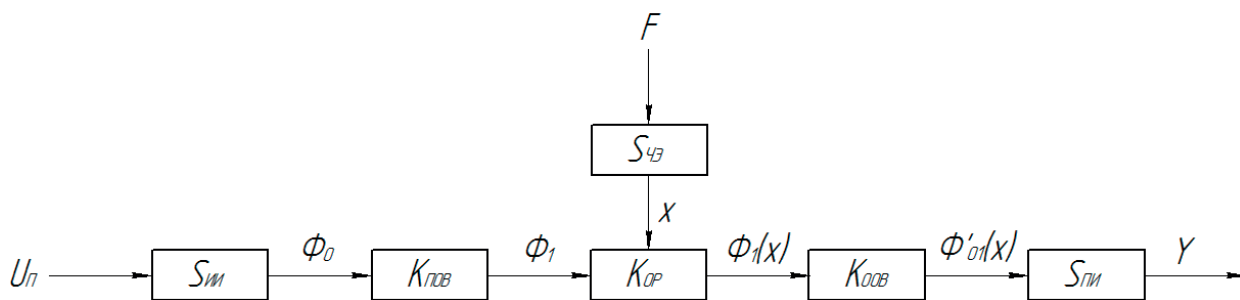


Рисунок 5. Функциональная схема волоконно-оптического преобразователя плотности жидкостей

Figure 5. Functional diagram of a fiber-optic liquid density transducer

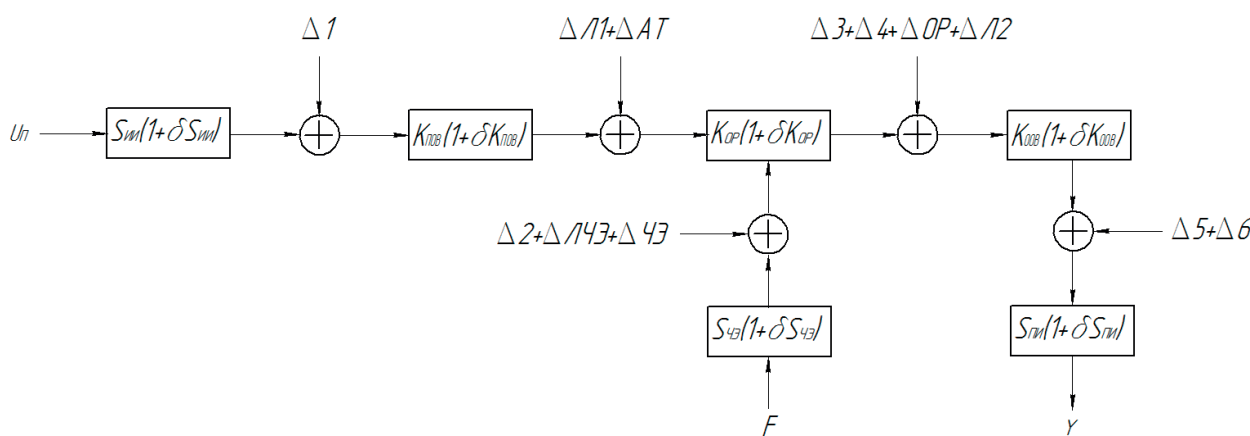


Рисунок 6. Структурная метрологическая модель измерительного канала волоконно-оптической системы измерения плотности

Figure 6. Structural metrological model of the measuring channel of a fiber-optic density measurement system

ΔAT — ΔAT погрешность, вносимая аттенуатором (шторкой) из-за неточности установки и изготовления;

ДЧЭ — погрешность из-за неточности изготовления чувствительного элемента;

DOP — погрешность из-за неточности изготовления оптической решетки;

ДЛЧЭ — погрешность линейности функции преобразования чувствительного элемента;

$dS_{\text{ЧЭ}}$  — погрешность чувствительности поплавка (чувствительного элемента), обусловленная изменением его параметров под воздействием факторов среды;

$dK_{\text{ПОВ}}, dK_{\text{ООВ}}$  — погрешности, обусловленные изменением светопропускания ПОВ и ООВ при механических воздействиях;

$dK_{\text{ОР}}$  — погрешность, обусловленная смещением и изменением размера оптической решетки под действием возмущающих воздействий;

$dS_{\text{ИИ}}$  — погрешность, обусловленная изменением мощности и диаграммы излучения ИИ при изменении условий окружающей среды, напряжения питания и т.п.;

$dS_{\text{ПИ}}$  — погрешность от изменения интегральной токовой чувствительности ПИ из-за изменения температуры окружающей среды или напряжения питания [4].

Номинальная функция преобразования имеет вид:

$$Y_{\text{Н}} = S_{\text{ЧЭ}} P_{\text{ИИ}} K_{\text{ПОВ}} K_{\text{ОР}} K_{\text{ООВ}} S_{\text{ПИ}} F.$$

Тогда реальная функция преобразования [5]:

$$Y_{\text{Р}} = S_{\text{ЧЭ}} (1 + \delta S_{\text{ЧЭ}}) S_{\text{ИИ}} (1 + \delta S_{\text{ИИ}}) \times [(\Delta 1 + K_{\text{ПОВ}})(1 + \delta K_{\text{ПОВ}})] \times \\ \times [(\Delta 2 + \Delta \text{ЛЧЭ} + \Delta \text{ЧЭ} + \Delta \text{Л1} + \Delta \text{АТ} + K_{\text{ОР}})(1 + \delta K_{\text{ОР}})] \times \\ \times [(\Delta 3 + \Delta 4 + \Delta \text{ОР} + \Delta \text{Л2} + K_{\text{ООВ}})(1 + \delta K_{\text{ООВ}})] \times \\ \times [(\Delta 5 + \Delta 6 + S_{\text{ПИ}})(1 + \delta S_{\text{ПИ}})] \times F.$$

С учетом полученных номинальной и реальной функций преобразования, формула абсолютной погрешности принимает вид:

$$\Delta Y = K_{\text{ПОВ}} \Delta 1 + K_{\text{ОР}} (\Delta \text{Л1} + \Delta \text{АТ} + \Delta 2 + \Delta \text{ЛЧЭ} + \Delta \text{ЧЭ}) + \\ + K_{\text{ООВ}} (\Delta 3 + \Delta 4 + \Delta \text{ОР} + \Delta \text{Л2}) + S_{\text{ПИ}} (\Delta 5 + \Delta 6) + S_{\text{ИИ}} \delta S_{\text{ИИ}} + \\ + (\delta K_{\text{ОР}} + \delta K_{\text{ООВ}} + \delta S_{\text{ПИ}} + \delta S_{\text{ЧЭ}}) F.$$

Рассмотрим влияние каждой составляющей на точность измерений.

D1 и  $dS_{\text{ИИ}}$  сводятся к нулю при условии расположения ПОВ по центру излучающей

площадки светодиода. D5 практически равна нулю согласно литературным источникам [6]. D6 ничтожно мала при корректном подборе источника и приемника излучения.

Влияние DЛ1 и DЛ2 также близко к нулю и может быть уменьшено за счет более высокоточной технологии изготовления и установки коллиматорных линз.

Без учета составляющих погрешности, которыми можно пренебречь, погрешность преобразования имеет вид:

$$\Delta Y = K_{\text{ОР}} (\Delta 2 + \Delta \text{ЧЭ} + \Delta \text{ЛЧЭ}) + \\ + K_{\text{ООВ}} (\Delta 3 + \Delta 4 + \Delta \text{ОР}) + \delta S_{\text{ЧЭ}} F.$$

С учетом того, что в схеме преобразователя используется две пары ПОВ-ООВ, а также присутствуют случайные погрешности, результирующая погрешность преобразования будет иметь вид:

$$\Delta Y = K_{\text{ОР}} (2\Delta 2 + \Delta \text{ЧЭ} + \Delta \text{ЛЧЭ}) + \\ + 2K_{\text{ООВ}} (\Delta 3 + \Delta 4 + \Delta \text{ОР}) + \delta S_{\text{ЧЭ}} F + \Delta c,$$

где  $\Delta c$  — случайная погрешность.

Погрешности D2 и D3 из-за неточности начальной установки чувствительного элемента относительно ПОВ и ООВ могут быть максимально снижены или исключены в процессе настройки благодаря более точной юстировке ЧЭ относительно подводящего и отводящего торцов ОВ. Погрешность D4 незначительна, а благодаря точной настройке ПОВ и ООВ относительно друг друга может быть исключена или сведена к минимуму [4]. Погрешность ДЧЭ возможно минимизировать, используя возможности высокоточного производства чувствительных элементов с применением передовых технологий [7]. Погрешность ДЛЧЭ также возможно снизить путем более точной настройки элементов преобразователя, а также путем варьирования и подбора параметров чувствительного элемента и преобразователя [8]. Погрешность DOP снижается аналогичным образом, а также посредством применения более точной технологии нанесения рисунка на кремниевую пластину. Погрешность  $dS_{\text{ЧЭ}}$  может быть снижена благодаря применению чувствительного элемента и сильфонов из высокостабильных материалов с низким коэффициентом

том температурного расширения. Случайная погрешность, вызванная различными видами помех, в том числе от вибраций оборудования сводится к минимуму благодаря использованию сильфонных компенсаторов [9, 10].

При выполнении всех вышеприведенных условий суммарная абсолютная погрешность прибора составляет не более  $1,5 \text{ кг/м}^3$ .

### Результаты экспериментальных исследований

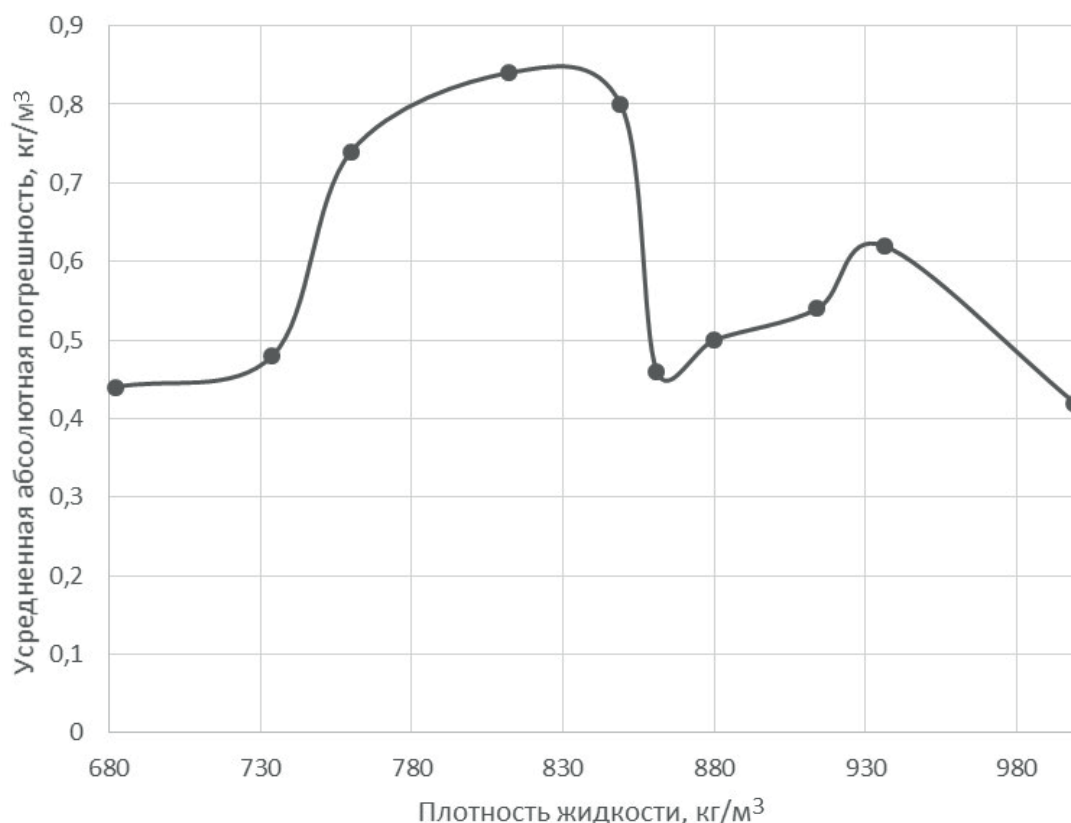
Для подтверждения верности приведенных гипотез были проведены лабораторные испытания разработанной измерительной системы. Испытания проводились при нормальных условиях при температуре окружающей среды  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , а также при повышенных температурах  $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . В качестве среды измерения использовались следующие экспериментальные жидкости: дистиллированная вода, моторное масло, мазут, сырая нефть, дизельное топливо, керосин, этиловый спирт, бензин АИ-92, бензин АИ-98, нефтяной растворитель.

Внутри емкости поочередно заливались жидкости, и снимались показания с устройства управления после стабилизации поплавка и нахождения его в неподвижном состоянии в течение 1 с.

На рисунке 7 приведен график зависимости усредненной абсолютной погрешности измерений от плотности жидкости.

Из графика усредненной абсолютной погрешности проведенных измерений (рисунок 7) видно, что абсолютная погрешность в среднем не превышает  $0,9 \text{ кг/м}^3$ , что соответствует заявленным выше требованиям к системе измерения плотности жидких сред.

Таким образом, проведенные лабораторные испытания подтверждают работоспособность и точность разработанного устройства и алгоритмов обработки информации. Полученные результаты работы системы доказывают ее эффективность и возможность применения для автоматизированного контроля плотности пожароопасных жидкостей.



**Рисунок 7.** Зависимость усредненной погрешности измерения плотности жидкости

**Figure 7.** Dependence of the average error in measuring liquid density



## Вывод

В результате проделанной работы были разработаны структурная и метрологическая структурная модели волоконно-оптической системы измерения плотности, позволяющие на этапе проектирования определять источники погрешностей и уменьшать составляющие погрешностей до минимально возможных значений при использовании разработанных конструктивно-технологических решений и процедур. В резуль-

тате проведенных исследований были получены экспериментальные данные, подтверждающие соответствие измерительной системы предъявляемым требованиям к точности для данного способа измерения плотности, что делает возможным ее применение для измерения плотности пожароопасных жидкостей с достаточно высокой точностью, сопоставимой с показателями лабораторных методов измерения.

## Список источников

1. Пат. RU 206 142 U1, МПК G 01 N 9/12. Оптоэлектронное устройство для измерения плотности жидкости с оптоволоконными линиями связи / В.Н. Астапов, Ю.В. Гашенко (Россия). 2021106837; Заявлено 15.03.2021; Опубл. 25.08.2021, Бюл. 24.
2. Мурашкина Т.И., Бадеева Е.А. Волоконно-оптические приборы и системы: Научные разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета. СПб.: Политехника, 2018. Ч. 1. 187 с. DOI: 10.25960/7325-1132-1. ISBN: 978-5-7325-1132-1. EDN: YRZMRF.
3. Р 50.2.075-2010 ГСИ. Нефть и нефтепродукты. Лабораторные методы измерения плотности, относительной плотности и плотности в градусах API. Применяется с 01.07.2011. 27 с.
4. Коломиец Л.Н., Бадеева Е.А., Мурашкина Т.И., Пивкин А.Г. Функция преобразования дифференциального волоконно-оптического датчика давления отражательного типа // Авиакосмическое приборостроение. 2007. № 8. С. 17–22. EDN: KFANPL.
5. Шлыков Г.П. Теория измерений: уравнения, модели, оценивание точности. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2008. 100 с. EDN: QMFVYB.
6. Вейнберг В.Б., Сатаров Д.К. Оптика световодов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1977. 320 с.
7. Udd E. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. 2006. 492 p. ISBN: 0470068108.
8. Gimu Rajan. Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications. 2015. 576 p.
9. Jones R. Optical Techniques for Inspection and Sensing // Sensor Review. 1984. Vol. 4. No. 3. P. 116-119. DOI: <https://doi.org/10.1108/eb007636/>.
10. Supriya Patil, Arvind Shaligram. Fiber Optic Physical and Chemical Sensors and Their Applications. A Pathway of Designing Fiber Optic

Sensors. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 292 p. ISBN: 9783659586651.

## References

1. Astapov V.N., Gashenko Yu.V. *Optoelektronnoe ustroystvo dlya izmereniya plotnosti zhidkosti s optovolonnyimi liniyami svyazi* [Optoelectronic Device for Measuring Liquid Density with Fiber Optic Communication Lines]. Patent RF, 2021. [in Russian].
2. Murashkina T.I., Badeeva E.A. *Volonno-opticheskie pribory i sistemy: Nauchnye razrabotki NTTs «Nanotekhnologii volokonno-opticheskikh sistem» Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta* [Fiber-Optical Devices and Systems: Scientific Developments of STC Nanotekhnologii Volokonno-Opticheskikh Sistem of the Penza State University]. Saint-Petersburg, Politehnika Publ., 2018. Ch. 1. 187 p. DOI: 10.25960/7325-1132-1. ISBN: 978-5-7325-1132-1. EDN: YRZMRF. [in Russian].
3. R 50.2.075-2010 GSI. *Neft' i nefteprodukty. Laboratornye metody izmereniya plotnosti, otnositel'noi plotnosti i plotnosti v gradusakh API* [State System for Ensuring the Uniformity of Measurements R 50.2.075-2010 GSI. Crude Petroleum and Petroleum Products. Laboratory Methods for Determination of Density, Relative Density and API Gravity]. In use since 01.07.2011. 27 p. [in Russian].
4. Kolomiets L.N., Badeeva E.A., Murashkina T.I., Pivkin A.G. *Funktsiya preobrazovaniya differentsial'nogo volokonno-opticheskogo datchika davleniya otrazhatel'nogo tipa* [Transfer Function of Reflective Differential Fiber-Optic Pressure Transducer]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie — Aerospace Instrumentation*, 2007, No. 8, pp. 17–22. EDN: KFANPL. [in Russian].
5. Shlykov G.P. *Teoriya izmerenii: uravneniya, modeli, otsenivanie tochnosti* [Measurement Theory: Equations, Models, Accuracy Assessment]. Penza, Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2008. 100 p. EDN: QMFVYB. [in Russian].

6. Veinberg V.B., Satarov D.K. *Optika svetovodov* [Light Guide Optics]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningr. otd-nie, 1977. 320 p. [in Russian].
7. Udd E. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. 2006, 492 p. ISBN: 0470068108.
8. Gimu Rajan. *Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications*. 2015, 576 p.
9. Jones R. Optical Techniques for Inspection and Sensing. *Sensor Review*, 1984, Vol. 4, No. 3, pp. 116-119. DOI: <https://doi.org/10.1108/eb007636/>.
10. Supriya Patil, Arvind Shaligram. *Fiber Optic Physical and Chemical Sensors and Their Applications. A Pathway of Designing Fiber Optic Sensors*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 292 p. ISBN: 9783659586651.

Статья поступила в редакцию 02.05.2024; одобрена после рецензирования 14.05.2024; принята к публикации 21.06.2024.

The article was submitted 02.05.2024; approved after reviewing 14.05.2024; accepted for publication 21.06.2024.

---

## ОБ АВТОРАХ

### **Абуталипов Урал Маратович**

кандидат технических наук, начальник отдела новых технологий добычи нефти и газа, ООО «РН-БашНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия

### **Андриянов Алексей Иванович**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы», Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

### **Батыркаева Асель Марсовна**

ассистент кафедры «Прикладная экология», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

### **Белявцев Матвей Владимирович**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

### **Воротников Михаил Юрьевич**

магистрант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

### **Гашенко Юлия Валерьевна**

аспирант, старший преподаватель кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Институт автоматизации и информационных технологий, Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

### **Горбунов Данила Денисович**

старший специалист отдела новых технологий добычи нефти и газа, ООО «РН-БашНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия

### **Зайцев Евгений Артемович**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

### **Зайцева Алина Александровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

### **Закирничная Марина Михайловна**

доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Автоматизация, телекоммуникация и метрология», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

---

**Иванов Артем Викторович**

заместитель начальника отдела новых технологий добычи нефти и газа, ООО «РН-БашНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия

**Игнатъев Алексей Андреевич**

магистрант кафедры инженерной экологии и безопасности жизнедеятельности, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия

**Кантюков Никита Русланович**

аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Кильмаков Дмитрий Константинович**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

**Китабов Андрей Николаевич**

кандидат технических наук, главный специалист отдела новых технологий добычи нефти и газа, ООО «РН-БашНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия

**Корнеев Павел Евгеньевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологий автоматизированного производства, Егорьевский технологический институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Егорьевск, Россия

**Кулакова Екатерина Сергеевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Стерлитамаке), Стерлитамак, Россия

**Култаев Дим Ринатович**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

**Лимарев Александр Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологий, сертификации и сервиса автомобилей, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

---

**Николаев Александр Аркадьевич**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Пономарев Станислав Владимирович**

аспирант кафедры электроники и электротехники факультета радиотехники и электроники, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

**Попов Евгений Игоревич**

ассистент кафедры электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**Савиных Максим Александрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации, факультета автоматики и вычислительной техники, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

**Сайфутдинова Залия Раилевна**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

**Сидоров Сергей Владимирович**

старший преподаватель кафедры электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**Сухачев Илья Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**Ткаченко Михаил Николаевич**

главный специалист отдела новых технологий добычи нефти и газа, ООО «РН-БашНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия

**Хакимьянов Марат Ильгизович**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Хазиева Регина Тагировна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Хмара Гузель Азатовна**

кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

---

**Храмкин Иван Александрович**

магистрант кафедры защиты информации факультета автоматики и вычислительной техники, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

**Хузин Тагир Рустамович**

магистрант кафедры «Автоматизация, телекоммуникация и метрология», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Швецова Алена Алексеевна**

инженер, ООО ВУЭР-КОРПОРАЦИИ АК «ЭСКМ», Курчатов, Россия

**Шеломенцев Владислав Александрович**

ассистент кафедры электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

---

## ABOUT THE AUTHORS

### **Abutalipov Ural M.**

Candidate of Engineering Sciences, Head of New Oil and Gas Production Technologies Department, RN-BashNIPIneft LLC (Company of Rosneft Group), Ufa, Russia

### **Andriyanov Alexey I.**

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of Electronic, Radioelectronic and Electrotechnical Systems Department, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

### **Batyrkaeva Asel M.**

Assistant of the of Applied Ecology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Belyavtsev Matvey V.**

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa University of Science and Technology» in Kumertau, Kumertau, Russia

### **Gashenko Yuliya V.**

Postgraduate Student, Senior Lecturer of Automation of Technological Processes and Production Department, Institute of Automation and Information Technologies, Samara State Technical University, Samara, Russia

### **Gorbunov Danila D.**

Senior Specialist of New Oil and Gas Production Technologies Department, RN-BashNIPIneft LLC (Company of Rosneft Group), Ufa, Russia

### **Ignatyev Alexey A.**

Undergraduate Student of Environmental Engineering and Life Safety Department, Federal State Budgetary Institution of Higher Education «Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

### **Ivanov Artem V.**

Deputy Head of New Oil and Gas Production Technologies Department, RN-BashNIPIneft LLC (Company of Rosneft Group), Ufa, Russia

### **Kantyukov Nikita R.**

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Khakimyanov Marat I.**

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia

### **Khazieva Regina T.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

---

**Khmara Guzel A.**

Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor, Head of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Khramkin Ivan A.**

Undergraduate Student of Information Security Department, Faculty of Automation and Computer Engineering, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

**Khuzin Tagir R.**

Student of Automation, Telecommunications and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Kilmakov Dmitriy K.**

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa University of Science and Technology» in Kumertau, Kumertau, Russia

**Kitabov Andrei N.**

Candidate of Engineering Sciences, Chief Specialist of New Technologies for Oil and Gas Production Department, RN-BashNIPIneft LLC (Company of Rosneft Group), Ufa, Russia

**Korneev Pavel E.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automated Production Technologies Department, Yegoryevsk Institute of Technology (branch) of Federal State Budgetary Institution of Higher Education «Moscow State University of Technology «STANKIN», Yegoryevsk, Russia

**Kulakova Ekaterina S.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automated Technological and Information Systems Department, Institute of Chemical Technologies and Engineering, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Sterlitamak), Sterlitamak, Russia

**Kultaev Dim R.**

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa University of Science and Technology» in Kumertau, Kumertau, Russia

**Lymarev Alexander S.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Technologies, Certification and Car Service Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Nikolaev Alexander A.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Ponomarev Stanislav V.**

Postgraduate Student of Electronics and Electrical Engineering Department, Faculty of Radio Engineering and Electronics, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia



---

**Popov Evgeniy I.**

Assistant of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Savinykh Maxim A.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Information Security Department, Faculty of Automation and Computer Engineering, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

**Sayfutdinova Zaliya R.**

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa University of Science and Technology» in Kumertau, Kumertau, Russia

**Shelomentsev Vladislav A.**

Assistant of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Shvetsova Alena A.**

Engineer, ESKM AK CORPORATION LLC, Kurchatov, Russia

**Sidorov Sergei V.**

Senior Lecturer of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Sukhachev Ilya S.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Tkachenko Mihail N.**

Chief Specialist of New Technologies for Oil and Gas Production Department, RN-BashNIPIneft LLC (Company of Rosneft Group), Ufa, Russia

**Vorotnikov Mikhail Yu.**

Undergraduate Student of Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Zaitsev Evgeny A.**

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa University of Science and Technology» in Kumertau, Kumertau, Russia

---

**Zaitseva Alina A.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa University of Science and Technology» in Kumertau, Kumertau, Russia

**Zakirnichnaya Marina M.**

Doctor of Engineering Sciences, Associated Professor, Head of Automation, Telecommunications and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, 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.**