

Подписной индекс: 91824 в каталоге «Пресса России»

Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 2, т. 17, 2021

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

- 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты (технические науки),
- 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки),
- 05.09.12 – Силовая электроника (технические науки),
- 05.11.01 – Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки),
- 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (технические науки),
- 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям) (технические науки),
- 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (технические науки),
- 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки)



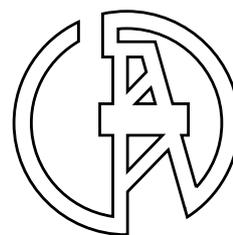
Electrical and data processing facilities and systems

№ 2, т. 17, 2021



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



УГНТУ

№ 2, т. 17, 2021

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

Учредитель

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

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

Международный стандартный сериальный номер ISSN 1999-5458.

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

Главный редактор:
М.И. Хакимьянов — д-р техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»
(г. Уфа, Российская Федерация)

Члены редакционной коллегии:

К. Лингфей — Ph. D, профессор
«Нанкинский университет авиации и аэронавтики»
(г. Нанкин, Китай)



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



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



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



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



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



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



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



В.Г. Кушнир — д-р техн. наук, профессор
Костанайского регионального университета имени Ахмета Байтурсынова (г. Костанай, Казахстан)



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



Зам. главного редактора:

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

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



Р.Р. Сафин — д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»
(г. Уфа, Российская Федерация)



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



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



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



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



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



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



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



Р.Р. Саттаров — д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Ответственный секретарь: А. Г. Саенко
Технический редактор: С. В. Халитова

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Доступ и подписка на электронную версию журнала — на сайте www.ugues.ru
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-67387 от 05.10.2016 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

© Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2021.

Адрес редакции и издательства: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1
Тел.: (347) 243-16-19, ies.rusoil.net

Цена свободная. 12+

Подписано в печать 23.12.2021 г. Формат 60×84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13.6.
Тираж 1 000 экз. Заказ № 206.

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.

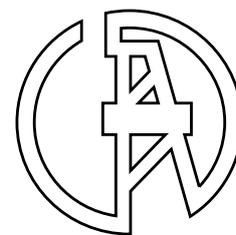
Материалы приводятся в авторской редакции.

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

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE PETROLEUM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY



USPTU

№ 2, v. 17, 2021

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

Founder

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

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

International standard serial number ISSN 1999-5458.

Editorial board:

Editor-in-chief:

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

Members of an editorial board:

X. Lingfei — Ph. D., Professor of Nanjing University
of Aeronautics and Astronautics
(Nanjing, China)

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

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

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

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

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

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

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

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

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



Deputy editor-in-chief:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

R.R. Sattarov — Dr. Sci. Tech., Professor
of FSBEI HE «Ufa State Aviation Technical University»
(Ufa, Russian Federation)

Assistant editor: A. G. Saenko

Technical editor: S. V. Khalitova



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

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

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

© Ufa State Petroleum Technological University, 2021.

Address of Editors office and Founder: 450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.

Tel. (347) 243–16–19, ies.rusoil.net

Price is free. **12+**

Publishing authorized on 23.12.2021 Paper format 60×84/8. Offset printing. 13.6 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 206.

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 «Electrical and data processing facilities and systems».

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Иванов М.Д., Хазиева Р.Т.</i> Моделирование генератора переменного напряжения для создания импульсного электромагнитного поля	5
<i>Ле Суан Хонг.</i> Разработка модели асинхронного двигателя электроподвижного состава метрополитена с векторным управлением в среде Matlab	15
<i>Мартынов Б.А., Хазиева Р.Т., Мухаметшин А.В.</i> Защита схемы измерения тока резонансной испытательной установки	26
<i>Сафиуллин Р.А., Янгиров И.Ф.</i> Исследование вибрации асинхронного электродвигателя	41
<i>Белов А.В., Мартынов Б.А., Хазиева Р.Т., Мухаметшин А.В.</i> Методика калибровки резонансной испытательной установки переменного тока	55
<i>Яшин А.Н., Гильманов Э.А., Хакимьянов М.И.</i> Моделирование механических характеристик асинхронного двигателя в пакете Matlab Simulink	67
<i>Антропова В.Р., Сухачев И.С., Сушков В.В., Мартьянов А.С.</i> Разработка вероятностной модели кратковременных нарушений электроснабжения	76

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Бухаров Д.С.</i> Об алгоритме вычисления эллиптической области срабатывания дистанционной защиты	86
<i>Родионов А.С., Жаринов Ю.А., Старцева Е.В., Суслов Н.С., Шишкина О.Ю.</i> Программный комплекс обучения на основе технологий дополненной реальности	92
<i>Холодидин И.Ю., Хрюкин Д.Ю., Григорьев М.А.</i> Система контроля геометрии полуцилиндров трубы Стана 1020	100
Об авторах	110

Content

ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Ivanov M.D., Khazieva R.T.</i> Modeling an AC voltage generator to create a pulse electromagnetic field	5
<i>Le Xuan Hong.</i> Development of the asynchronous motor model of metro train with vector control in the Matlab	15
<i>Martynov B.A., Khazieva R.T., Mukhametshin A.V.</i> Protection of the current measuring circuit of a resonance testing installation	26
<i>Safiullin R.A., Yangirov I.F.</i> Investigation of induction electromotor vibration	41
<i>Belov A.B., Martynov B.A., Khazieva R.T., Mukhametshin A.V.</i> Calibration technique for a resonant AC test installation	55
<i>Yashin A.N., Gilmanov E.A., Khakimyanov M.I.</i> Simulation of mechanical characteristics of an induction motor in Matlab Simulink	67
<i>Antropova V.R., Sukhachev I.S., Sushkov V.V., Martyanov A.S.</i> Development of probabilistic model of short-term power supply interruptions	76

DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Bukharov D.S.</i> On algorithm for computing of elliptic operation region of distance protection devices	86
<i>Rodionov A.S., Zharinov Yu.A., Startseva E.V., Suslov N.S., Shishkina O.Yu.</i> Software complex of training based on augmented reality technologies	92
<i>Kholodilin I.Yu., Khriukin D.Yu., Grigorev M.A.</i> Mill 1020 tube half-cylinder geometry control system	100
About the Authors	110



Максим Дмитриевич Иванов
Maksim D. Ivanov

*студент кафедры
«Электротехника и
электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
Уфа, Россия*



Регина Тагировна Хазиева
Regina T. Khazieva

*кандидат технических наук, доцент
кафедры «Электротехника
и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
Уфа, Россия*

УДК 621.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-5-14

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Актуальность

Обводнение нефти приводит к различным негативным последствиям, но, пожалуй, самыми значимыми среди них можно назвать высокую стоимость транспортирования обводненной нефти и отрицательное воздействие воды и содержащихся в ней солей на качество получаемых нефтепродуктов после переработки. Существуют различные методы разрушения водонефтяных эмульсий: термические, химические, электрические и другие. Среди электрических методов также можно выделить использование постоянных электрических полей, постоянных магнитных и переменных электромагнитных полей, воздействие которых различными способами на эмульсию приводит к ее разрушению. Однако любой из этих методов и технических решений не лишен своих недостатков: в одних используют достаточно дорогие деэмульгаторы, другие требуют значительного времени для деэмульсации нефти или обладают низкой эффективностью. В предыдущих статьях авторами данной работы был предложен метод обезвоживания водонефтяных эмульсий, основанный на комплексном применении постоянного магнитного поля и высокочастотных импульсных электромагнитных полей, а также были выбраны оптимальные параметры и электрическая схема питания устройства, предназначенного для генерации постоянного магнитного поля.

Цель исследования

В данной статье рассматриваются параметры устройства для обработки водонефтяной эмульсии в переменном импульсном электромагнитном поле. Основными задачами являются приведение электрической схемы преобразований формы, амплитуды и частоты напряжения к требуемым, согласно технологическому процессу, значениям, которые бы обеспечили наивысшую эффективность процесса обезвоживания эмульсии, а также моделирование работы такого устройства.

Методы исследования

В данном исследовании были использованы следующие методы: патентный обзор, изучение научной литературы, математический анализ и моделирование.

Результаты

Определены основные требования, предъявляемые к устройству, предназначенному для генерации импульсных электромагнитных полей для обезвоживания водонефтяных эмульсий, изучены переходные процессы, протекающие при подаче управляющих импульсов на полупроводниковые коммутационные аппараты, разработана математическая модель устройства и проведен анализ его работы. Полученные результаты необходимы для создания лабораторной установки для проведения натуральных экспериментов, разработки системы управления тиристорами. В дальнейшем планируется проведение экспериментов, направленных на изучение эффективности применения импульсного электромагнитного поля для обезвоживания водонефтяных эмульсий.

Ключевые слова: импульсное электромагнитное поле, обезвоживание водонефтяных эмульсий, оптимизация технологического процесса, полупроводниковые элементы, повышенная энергетическая эффективность

MODELING AN AC VOLTAGE GENERATOR TO CREATE A PULSE ELECTROMAGNETIC FIELD

Relevance

Watering oil leads to various negative consequences, but perhaps the most significant among them are the high cost of transporting water-cut oil and the negative impact of water and the salts it contains on the quality of the resulting oil products after refining. There are various methods of destruction of water-oil emulsions: thermal, chemical, electrical and others. Among the electrical methods, one can also highlight the use of constant electric fields, constant magnetic and alternating electromagnetic fields, the effect of which in various ways on the emulsion leads to its destruction. However, any of these methods and technical solutions is not without its drawbacks: in some, rather expensive demulsifiers are used, while others require a significant time to demulsify oil or have low efficiency. In previous articles, the authors of this work proposed a method for dehydration of oil-water emulsions, based on the complex application of a constant magnetic field and high-frequency pulsed electromagnetic fields, and also selected the optimal parameters and an electrical circuit for powering a device designed to generate a constant magnetic field.

Aim of research

This article discusses the parameters of a device for processing an oil-water emulsion in an alternating pulsed electromagnetic field. The main task is to determine the electrical circuit for converting the shape, amplitude and frequency of the voltage to the values required, according to the technological process, that would provide the highest efficiency of the emulsion dehydration process, as well as modeling the operation of such a device.

Methods

In this study, the following methods were used: patent review, study of scientific literature, mathematical analysis and modeling.

Results

The basic requirements for a device designed to generate pulsed electromagnetic fields for dehydration of water-oil emulsions were determined, transient processes occurring when control impulses were applied to semiconductor switching devices were studied, a mathematical model of the device was developed and its operation was analyzed. The results obtained are necessary for the creation of a laboratory setup for carrying out field experiments, the development of a thyristor control system. In the future, it is planned to conduct experiments aimed at studying the effectiveness of using a pulsed electromagnetic field for dehydrating oil-water emulsions.

Keywords: pulsed electromagnetic field, dehydration of oil-water emulsions, optimization of the technological process, semiconductor elements, increased energy efficiency

Обводнение нефти приводит к различным негативным последствиям, но, пожалуй, самыми значимыми среди них можно назвать высокую стоимость транспортирования обводненной нефти и отрицательное воздействие воды и содержащихся в ней солей на качество получаемых нефтепродуктов после переработки. Существуют различные методы разрушения водонефтяных эмульсий: термические, химические, электрические и другие [1]. Среди электрических методов также можно выделить использование постоянных электрических полей, постоянных магнитных и переменных электромагнитных полей, воздействие которых различными способами на эмульсию приводит к ее разрушению. Однако любые из этих методов и технических решений не лишены своих недостатков: в одних используют достаточно дорогие деэмульгаторы, другие требуют значительного времени для деэмульсации нефти или обладают низкой эффективностью [2].

В предыдущих статьях авторами данной работы был предложен метод обезвоживания водонефтяных эмульсий, основанный на комплексном применении постоянного магнитного поля и высокочастотных импульсных электромагнитных полей [3], а также были выбраны оптимальные параметры и электрическая схема питания устройства, предназначенного для генерации постоянного магнитного поля [4].

В данной статье рассматриваются параметры устройства для обработки водонефтяной эмульсии в переменном импульсном электромагнитном поле. Основными задачами являются определение электрической схемы преобразования формы, амплитуды и частоты напряжения к требу-

емым, согласно технологическому процессу, значениям, которые бы обеспечили наивысшую эффективность процесса обезвоживания эмульсии, а также моделирование работы такого устройства.

Согласно данным патента 2167692 «Способ обезвоживания водонефтяной эмульсии» [5], при сближении поляризованных капель в электрическом поле из-за проводимости нефти имеет место нейтрализация поляризационных зарядов капель с постоянной времени порядка $\tau = (1-5) \cdot 10^{-4}$ с, которая много меньше полупериода колебаний синусоидального электрического поля (0,01 с). В результате электрическое поле обеспечивает эффективное сближение капель только до расстояний порядка $0,1 \cdot r$.

Длительность переднего фронта импульса напряженности на этапе предварительных расчетов примем в пределах $\tau_{\phi} = (2-5) \cdot 10^{-4}$ с.

Верхний предел определяется постоянной времени τ , а нижний предел определяется тем, что при $\tau_{\phi} < 2 \cdot 10^{-4}$ с эффективность слияния капель уже не повышается, однако удорожается аппаратура, необходимая для реализации способа.

Оптимальное действующее значение напряженности поля будет находиться в пределах (0,2–0,4) кВ/см.

Лабораторная установка рассчитывается на объем 5 л, при этом её диаметр составит 14 см.

В этом случае действующее значение напряжения составит:

$$U_d = d \cdot E_d = 14 \cdot 0,3 = 4,2 \text{ кВ}, \quad (1)$$

где d — диаметр установки, м;

E_d — действующее значение напряженности поля.

В патентах и статьях, посвященных данной тематике, указаны различные значения рекомендуемой частоты перемен-

ного тока, с помощью которого необходимо создавать электрическое поле требуемой напряженности [6–8]. Поэтому в проектируемой экспериментальной установке необходимо будет изменять частоту подаваемого тока для проведения необходимых экспериментов.

Предполагается, что высокочастотные поля обеспечивают коалесценцию более мелких капель воды, менее высокочастотные — средних и более крупных капель. Поэтому обработку водонефтяной эмульсии планируется осуществлять в 3 этапа с использованием импульсных электрических полей различных частот. Частоту для проведения экспериментов будем менять в диапазоне от 5000 Гц для самых мелких капель до 50 Гц — для крупных капель.

Идеализированный выходной сигнал генератора переменного импульсного напряжения представлен на рисунке 1.

Таким образом, к генератору предъявляются следующие требования:

1. обеспечивать выходной сигнал в соответствии с рисунком 1;

2. обеспечивать длительность переднего фронта импульса напряженности в пределах $\tau_{\phi} < 5 \cdot 10^{-4}$ с;

3. обеспечивать действующее значение напряжения $U_{д} = 4,2$ кВ, а, следовательно, амплитудное

$$U_{M} \approx 2\sqrt{2}U_{д} = 2\sqrt{2} \cdot 4,2 = 11,9 \text{ кВ};$$

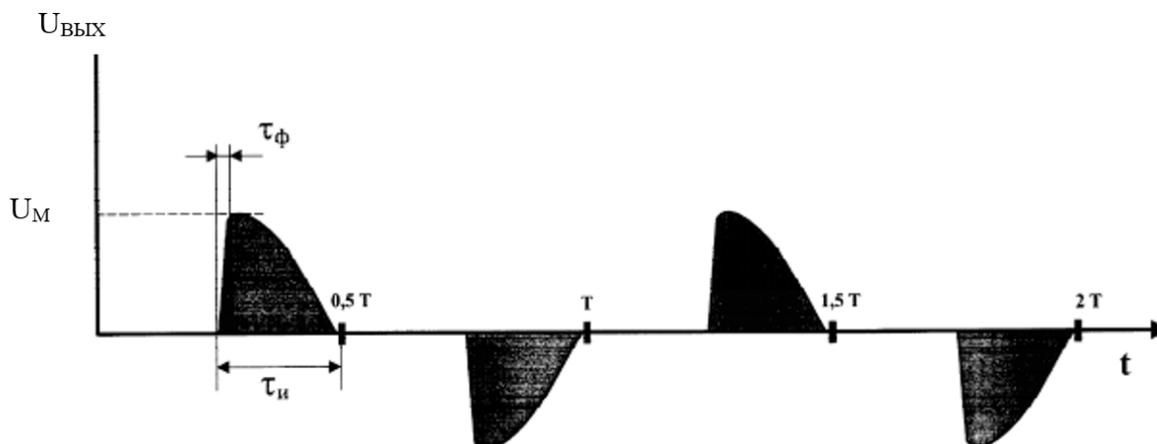


Рисунок 1. Выходное напряжение генератора

Figure 1. Generator output voltage

4. обеспечивать регулирование частоты выходного напряжения в широком диапазоне от 50 до 5000 Гц.

Определим характер нагрузки. Электроды, расположенные внутри электродегидратора, образуют параллельно соединенную емкость C и сопротивление R , которое определяется проводимостью эмульсии в межэлектродном пространстве. Если площадь электродов S , расстояние между ними l , диэлектрическая проницаемость эмульсии ϵ , а её удельное сопротивление ρ , то величины C и R можно приближенно оценить по формулам [9]:

$$R = \rho \frac{l}{S}; \quad C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{l}; \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}. \quad (2)$$

Также учтем сопротивление соединительных элементов, связывающих источник питания и электроды как $r_{л}$. Таким образом, схема замещения нагрузки будет выглядеть согласно рисунку 2.

Таким образом, возникает достаточно сложная техническая задача: необходимо в короткий промежуток времени ($\tau_{\phi} < 5 \cdot 10^{-4}$ с) резко изменить напряжение на конденсаторе от 0 до максимального значения. Определим, при выполнении каких условий это возможно.

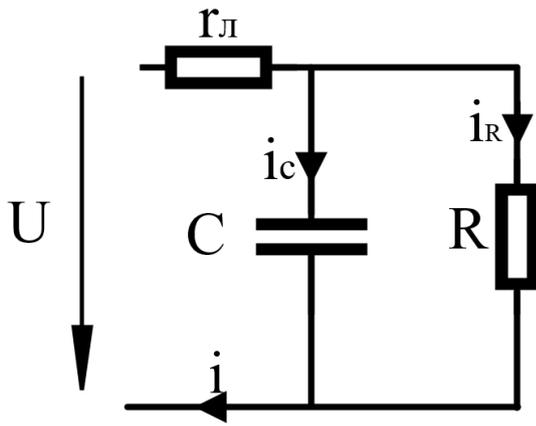


Рисунок 2. Схема замещения электродегидратора

Figure 2. Electric dehydrator replacement circuit

Представим, что в соответствии с рисунком 1 в нужный момент времени на конденсатор подано $U = U_m$.

Проанализируем переходные процессы, возникающие в данной схеме замещения:

$$\begin{cases} u_c = i_R R, \\ i_C = C \frac{dU_c}{dt}, \\ u = u_c + i r_L, \\ i = i_C + i_R, \end{cases} \quad (3)$$

где u_c — мгновенное напряжение на конденсаторе в момент времени t , В;

i_R — мгновенный ток через сопротивление, А;

R — сопротивление, Ом;

i_C — мгновенный ток через конденсатор, А;

C — емкость конденсатора, Ф;

i — суммарный мгновенный ток нагрузки;

r_L — сопротивление соединительных элементов;

u — мгновенное напряжение на нагрузке, В.

Решив данную систему уравнений, найдем постоянную переходного процесса τ :

$$\tau = \frac{CRr_L}{R + r_L}. \quad (4)$$

Для того, чтобы напряжение менялось заданным образом, необходимо, чтобы выполнялось условие $5\tau \leq \tau_\phi$, так как считается, что за 5τ все переходные процессы завершаются практически полностью.

Создавать напряжение заданной формы, как на рисунке 1, можно, используя тиристоры. Если установить угол отпирания тиристоров равным 90° , то несложно добиться подобной эпюры напряжения с помощью следующей схемы (рисунок 3).

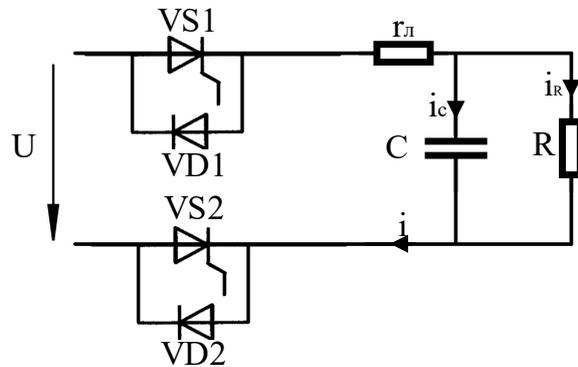


Рисунок 3. Схема преобразования формы напряжения

Figure 3. Voltage waveform conversion circuit

Подробнее опишем работу схемы. Пусть питающее напряжение изменяется по закону

$$U = U_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t),$$

где f — переменная частота, настраиваемая ранее в инвертирующем блоке;

U_m — амплитудное значение подаваемого напряжения.

Оба тиристора VS1 и VS2 открываются в момент времени $\phi = 90^\circ$, ϕ — фаза питающего напряжения.

В промежутке $(0-90)^\circ$ тиристор VS1 закрыт, диод VD1 закрыт, ток в цепи не течет, напряжение на нагрузке равно 0.

При $\varphi = 90^\circ$ на тиристор VS1 подается управляющий сигнал, он отпирается, также открыт диод VD2, по цепи течет ток, напряжение на нагрузке после переходного процесса, описанного ранее, становится равным подаваемому напряжению.

При $\varphi = 180^\circ$ тиристор VS1 запирается, тиристор VS2 закрыт.

В промежутке времени $(180-270)^\circ$ ток в цепи не течет.

При $\varphi = 270^\circ$ на тиристор VS2 подается управляющий сигнал, он отпирается, также открыт диод VD1, по цепи течет ток, напряжение на нагрузке после переходного процесса, описанного ранее, становится равным подаваемому напряжению.

Затем процесс циклически повторяется. Таким образом, полная принципиальная схема установки выглядит согласно рисунку 4.

Генератор питается от напряжения промышленной сети. На повышающем трансформаторе устанавливается необходимое в дальнейшем действующее значение напряжения. Затем устанавливается цепочка выпрямитель — фильтр — инвертор, благодаря которой появляется возможность менять промышленную частоту на необходимую для осуществления технологического процесса. В последнем блоке реализуется преобразование синусоидального напряжения к напряжению необходимой формы.

Существуют различные методы моделирования электромагнитных полей [10]. В данной работе построена модель электрической схемы устройства для преобразования формы входного напряжения (рисунок 5).

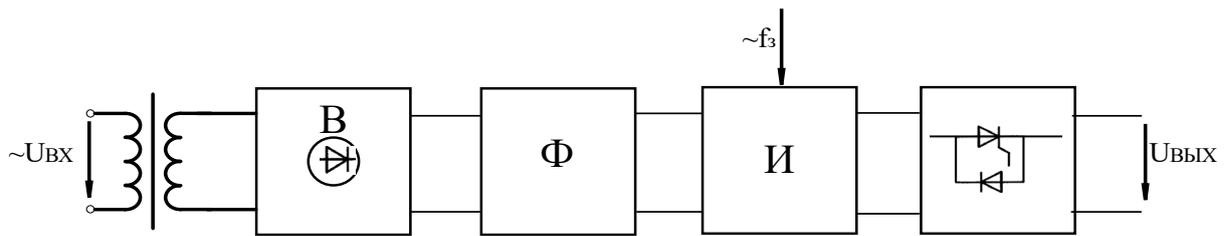


Рисунок 4. Функциональная схема работы генератора

Figure 4. Functional electrical circuit of the generator

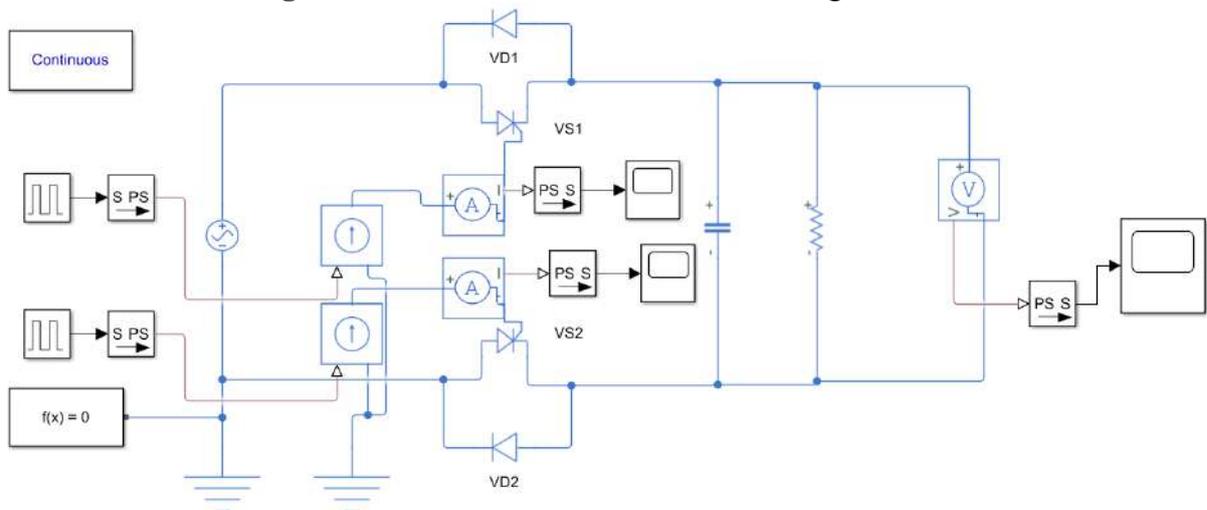


Рисунок 5. Моделирование работы генератора в программе Matlab R2017b Simulink

Figure 5. Simulation of generator operation in the program Matlab R2017b Simulink

Основные технические параметры элементов следующие. Источник переменного напряжения: $U_m = 11800$ В; $f = 50$ Гц; $\varphi = 0$.

Параметры управляющего воздействия на тиристор VS1 представлены на рисунке 6.

Параметры управляющего воздействия на тиристор VS2 представлены на рисунке 7.

Параметры нагрузки рассчитаны по (2):

$$C = 0,088 \text{ пФ}; R = 20 \text{ МОм.}$$

Управляющие импульсы на тиристоры подаются в соответствии с принципом работы схемы, изложенным выше. На рисунках 8, 9 представлены осциллограммы управляющих импульсов, подаваемых на тиристоры VS1 и VS2.

В результате между электродами образуется электрическое поле нужной формы и амплитуды (рисунок 10).

Amplitude:	<input type="text" value="3"/>
Period (secs):	<input type="text" value="0.02"/>
Pulse Width (% of period):	<input type="text" value="5"/>
Phase delay (secs):	<input type="text" value="0.0049"/>

Рисунок 6. Управляющее воздействие на тиристор VS1

Figure 6. Thyristor control VS1

Amplitude:	<input type="text" value="3"/>
Period (secs):	<input type="text" value="0.02"/>
Pulse Width (% of period):	<input type="text" value="5"/>
Phase delay (secs):	<input type="text" value="0.0149"/>

Рисунок 7. Управляющее воздействие на тиристор VS2

Figure 7. Thyristor control VS2

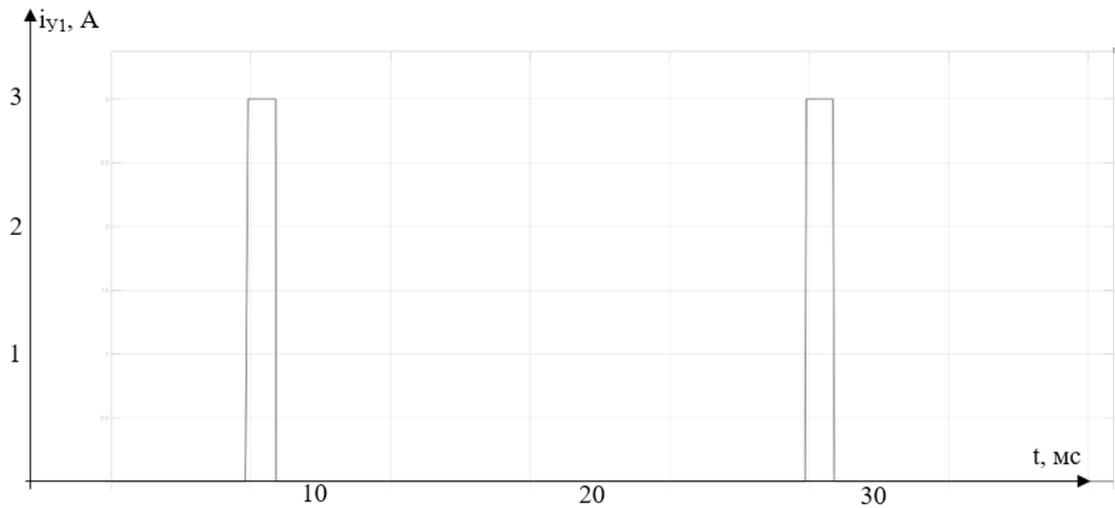


Рисунок 8. Осциллограмма управляющих импульсов тиристора VS1

Figure 8. Oscillogram of thyristor control pulses VS1

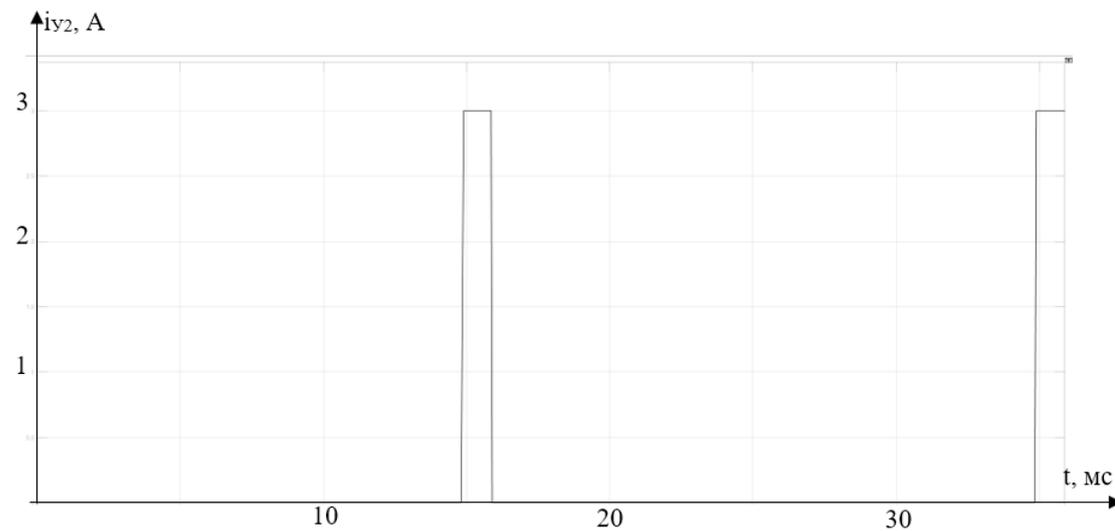


Рисунок 9. Осциллограмма управляющих импульсов тиристора VS2

Figure 9. Oscillogram of thyristor control pulses VS2

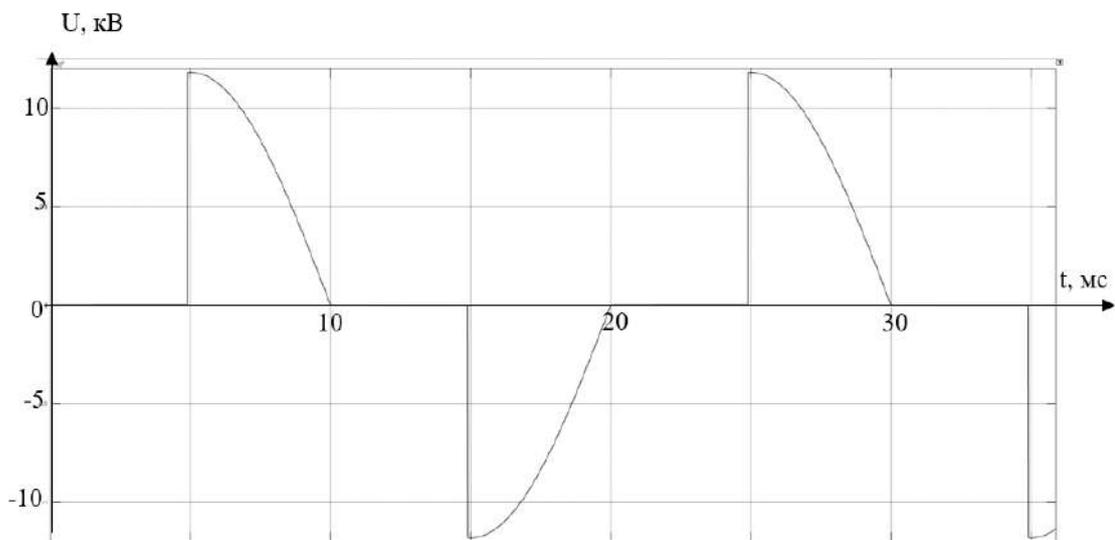


Рисунок 10. Осциллограмма напряжения между электродами устройства

Figure 10. Oscillogram of the voltage between the electrodes of the device

Вывод

Проведенные теоретические исследования, а также моделирование в программе Matlab R2017b Simulink позволили выбрать нужную электрическую схему для преобразования формы напряжения к импульсной, необходимой для создания электромагнитного поля для обезвоживания водонефтяных эмульсий, обладающего заданными параметрами. Данные исследования необходимы для создания лабораторной установки для проведения натурных экспериментов, разработки системы управления тиристорами. В дальнейшем планируется проведение экспериментов, направленных на изучение эффективности применения импульсного электромагнитного поля для обезвоживания водонефтяных эмульсий.

Список источников

1. Мустафин Ф.М., Быков Л.И., Гумеров А.Г. и др. Промысловые трубопроводы и оборудование. М.: Изд-во Недр, 2004. 662 с.
2. Пат. 2429277 РФ, МПК С 10 G 32/02. Способ обезвоживания и обессоливания нефтей / Д.А. Каримов. 20.09.2011.
3. Иванов М.Д., Конесев С.Г. Генератор импульсного электромагнитного поля для обезвоживания водонефтяной эмульсии // Матер. 71-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных УГНТУ. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2020. 572 с.
4. Хазиева Р.Т., Иванов М.Д. Выбор оптимальных параметров устройства для генерации постоянного магнитного поля // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 6. С. 176-187. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-176-187.
5. Пат. 2167692 РФ, МПК В 01 D 17/06. Способ обезвоживания водонефтяной эмульсии / В.С. Генкин, Е.Я. Лапига, Г.З. Мирзабемян, Ю.В. Пушкин, А.В. Семенов, З.Т. Тениешвили. 27.05.2001.
6. Пат. DE1642867 Германия, МПК В 01 D 17/06. Verfahren zur elektrischen

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».

behandlung von dispersionen / Winslow Joseph D. Jun, Lucas Roy N., Wilson Homer M. Petrolite Corp., 31.05.1972.

7. Пат. GB2171031 (А) Великобритания, МПК В 01 D 17/06. Electrostatic Separation of Liquid Dispersions / Bailes Philip Jensen, Larkai Samuel Kojo Larley, Univ Bradford, 20.08.1986.

8. Пат. 6451174 США, МПК С 07 С 1/00; В 01 J 19/08. High Frequency Energy Application to Petroleum Feed Processing / S.M. Burkitbayev. 06.04.2006.

9. Логинов В.И. Обезвоживание и обессоливание нефтей. М.: Химия, 1979. 216 с.

10. Yuan Zh., Ma Q., Liang Z., Yu H. Simulation of Electromagnetic Field of Indirect Electrostatic Discharge Test by Using the FDTD Method // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China, 2011. С. 1-4. DOI: 10.1109/APPEEC.2011.5748901.

References

1. Mustafin F.M., Bykov L.I., Gumerov A.G. e.a. *Promyslovye truboprovody i oborudovanie* [Field Pipelines and Equipment]. Moscow, Nedra Publ., 2004. 662 p. [in Russian].

2. Karimov D.A. *Sposob obezvozhivaniya i obessolivaniya neftei* [Method of Oil Dehydration and Desalination]. Patent RF No. 2429277, 2011. [in Russian].
3. Ivanov M.D., Konesev S.G. Generator impul'snogo elektromagnitnogo polya dlya obezvozhivaniya vodonefityanoi emul'sii [Generator of a Pulsed Electromagnetic Field for Dehydration of Water-Oil Emulsion]. *Materialy 71-i nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh UGNTU* [Materials of the 71st Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists of USPTU]. Ufa, UGNTU Publ., 2020. 572 p. [in Russian].
4. Khazieva R.T., Ivanov M.D. Vybor optimal'nykh parametrov ustroystva dlya generatsii postoyannogo magnitnogo polya [Choice of the Optimal Parameters of the Device for Generating a Constant Magnetic Field]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki — News of Higher Educational Institutions. Energy Problems*, 2020, Vol. 22, No. 6, pp. 176-187. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-176-187. [in Russian].
5. Genkin V.S., Lapiga E.Ya., Mirzabekyan G.Z., Pushnin Yu.V., Semenov A.V., Tenieshvili Z.T. *Sposob obezvozhivaniya vodonefityanoi emul'sii* [Method of Dehydration of Water-Oil Emulsion]. Patent RF No. 2167692, 2001. [in Russian].
6. Winslow Joseph D. Jun, Lucas Roy N., Wilson Homer M. *Verfahren zur elektrischen behandlung von dispersionen*. Patent Germany No. DE1642867, 1972.
7. Bailes Philip Jensen, Larkai Samuel Kojo Larley, Univ Bradford. *Electrostatic Separation of Liquid Dispersions*. Patent GB No. GB2171031 (A), 1986.
8. Burkitbayev S.M. *High Frequency Energy Application to Petroleum Feed Processing*. Patent USA No. 6451174, 2006.
9. Loginov V.I. *Obezvozhivanie i obessolivanie neftei* [Dehydration and Desalting of Oils]. Moscow, Khimiya Publ., 1979. 216 p. [in Russian].
10. Yuan Zh., Ma Q., Liang Z., Yu H. Simulation of Electromagnetic Field of Indirect Electrostatic Discharge Test by Using the FDTD Method. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. Wuhan, China, 2011, pp. 1-4. DOI: 10.1109/APPEEC.2011.5748901.



Ле Суан Хонг
Le Xuan Hong

*кандидат технических наук,
заведующий кафедрой «Электрический транспорт»,
Хошиминский университет транспорта,
Хошимин, Социалистическая Республика Вьетнам*

УДК 629.423.31

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-15-25

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ В СРЕДЕ MATLAB

Актуальность

Практически с первых этапов электрификации железных дорог непрерывно ведется создание электроподвижного состава (ЭПС) с асинхронными тяговыми машинами (АТМ). В настоящее время во всем мире широко внедряется ЭПС с бесколлекторными тяговыми машинами, преимущественно АТМ, так как они обладают многими преимуществами. Однако практика и опыт эксплуатации показывают, что тяговый электропривод (ТЭП) с асинхронным двигателем (АД), устанавливаемый на ЭПС метрополитена, имеет ряд недостатков, к которым, в первую очередь, относится принципиальная невозможность обеспечения двух важнейших требований к ТЭП — широкий диапазон регулирования частоты вращения при равенстве моментов двигателей, работающих на общую нагрузку из-за отсутствия применения современного способа управления, называемого «векторным». В результате установленная мощность применяемых АД завышена, а электрическое торможение вагона вплоть до его полной остановки невозможно. Поэтому решение этих проблем представляется актуальной задачей, имеющей практическое значение.

Цель исследования

Основной целью работы является создание схемы (как силовой схемы, так и схемы управления) вагона метрополитена с асинхронным электроприводом (АЭП), лишённой указанных выше недостатков. В частности, при разработке схемы управления акцент сделан на алгоритмы и принципы векторного управления АЭП.

Методы исследования

Для решения вышеизложенных задач были использованы методы построения силовых систем и систем автоматики, а также пакеты программ для математического моделирования.

Результаты

Предложен алгоритм для реализации векторного управления. Разработана блок-схема системы управления, которая смоделирована в среде Simulink пакета Matlab. Получены результирующие графики, демонстрирующие работу модели и принцип векторного управления.

Ключевые слова: релейно-контакторная система, коллекторные тяговые двигатели, тяговый частотно-регулируемый электропривод, асинхронный электродвигатель, широтно-импульсная модуляция (ШИМ), диапазон регулирования частоты вращения, векторное управление АЭП, кривая основного сопротивления движению, канал управления

DEVELOPMENT OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR MODEL OF METRO TRAIN WITH VECTOR CONTROL IN THE MATLAB

Relevance

Almost from the first stages of electrification of railways, the creation of electric rolling stock (ERS) with asynchronous traction machines (ATM) has been continuously carried out. At present, ERS with brushless traction machines, mainly ATM, is widely introduced all over the world, since they have many advantages. However, practice and operating experience show that a traction electric drive (TED) with an asynchronous motor (AM), installed on the ERS of the metro, has a number of disadvantages, which primarily include the fundamental impossibility of meeting the two most important requirements for TED — a wide range of speed control with equal torques of motors operating on a common load due to the lack of the use of a modern method of control, called «vector». As a result, the installed power of the applied AM is overestimated, and electric braking of the car up to its complete stop is impossible. Therefore, the solution of these problems seems to be an urgent task of practical importance.

Aim of research

The main aim of the research is to create a circuit (both a power circuit and a control circuit) with an asynchronous electric drive (AED), devoid of the above disadvantages. In particular, when developing a control scheme, the emphasis is on the algorithms and principles of vector control of the AED.

Research methods

To solve the above problems, methods of constructing power systems and automation systems were used, as well as software packages for mathematical modeling.

Results

An algorithm for the implementation of vector control is proposed. The block diagram of the control system is developed, which is modeled in the Simulink environment of the Matlab package. Resulting graphs demonstrating the operation of the model and the principle of vector control.

Keywords: relay-contactor system, collector traction motors, traction frequency-controlled electric drive, asynchronous electric motor, pulse width modulation (PWM), speed control range, vector control of asynchronous electric drive, main resistance curve, control channel

Введение

В настоящее время существующий на электроподвижных составах (ЭПС) привод постоянного тока с релейно-контактной системой (РКС) управления прост, но неэкономичен по расходу электроэнергии и текущим расходам на содержание. Этот привод по многим параметрам уже перестал удовлетворять современным требованиям. РКС управления требует частого обслуживания и ремонта, связанного с малыми ресурсными возможностями контактных систем, и требует значительных в общем объеме материальных затрат. Кроме того, как показывает опыт

эксплуатации, неквалифицированное обслуживание и ремонт приводят к отказам оборудования на линии, что ведет к сбоям графика движения и, в конечном результате, к материальным убыткам. Анализируя причины отказов, можно сказать, что в большинстве случаев они связаны с нарушением технологии обслуживания и ремонта оборудования привода. Экономичность привода постоянного тока невысока из-за больших потерь энергии на пусковых и тормозных реостатах в режимах разгона и торможения. Коллекторные тяговые двигатели боятся перегрузок и требуют повышенного вни-

мания к обслуживанию щеточно-коллекторных узлов в эксплуатации и сложной высокозатратной технологии ремонта [1]. Однако тяговый частотно-регулируемый электропривод с асинхронным двигателем (АД), устанавливаемый на электроподвижном составе (ЭПС) метрополитена, имеет ряд недостатков:

1) комплект электрооборудования современных поездов представляет собой асинхронный электропривод (АЭП) с автономным инвертором напряжения на IGBT-модулях, питающий одновременно 4 тяговых двигателя. Диапазон регулирования при такой силовой схеме получается ограниченным, а из-за разброса характеристик тяговых машин и различия в диаметрах бандажей возникает неравномерность в распределении нагрузок между осями вагона.

Помимо этого, такая система имеет ограниченную надёжность из-за того, что при выходе из строя инвертора напряжения сразу выходит из строя вся силовая схема вагона, что является значительным недостатком в условиях современной загруженности линий метрополитена в часы пик.

Параллельное включение обмоток статоров 4-х асинхронных двигателей вагона с их питанием от общего преобразователя частоты, низкое отношение частоты ШИМ к частоте основной гармоники напряжения питания двигателя не позволяют применить современный способ управления, называемый «векторным». Из этого следует принципиальная невозможность обеспечения двух важнейших требований к тяговому электроприводу (ТЭП) — широкий диапазон регулирования частоты вращения при равенстве моментов двигателей, работающих на общую нагрузку [2–4]. В результате установленная мощность применяемых АД превышена, а электрическое торможение вагона вплоть до его полной остановки невозможно;

2) ЭПС метрополитена имеет неравномерный график потребления электрической энергии по времени. Потребление энергии особенно значительно в период разгона, менее значительно в периоды их равномерного движения и отсутствует на выбеге, т.е. в периоды движения по инерции. Значительное количество кинетической энергии движущихся поездов в момент начала торможения превращается в электрическую энергию, которая в процессе торможения выделяется в виде тепла в тормозных реостатах (около 35 %) и, как следствие, приводит к дополнительному нагреву тоннелей, тяговых подстанций и станций метро [5, 6].

Вследствие сказанного тяговые подстанции (ТП) метрополитена непрерывно испытывают значительные колебания нагрузки, вызываемые суммированием нагрузок фидеров. При пиковых нагрузках, возникающих при наложении пусковых токов по фидерам друг на друга, снижается напряжение на шинах ТП и в тяговой сети на промежуточных станциях метро, расположенных между двумя соседними ТП. Это замедляет процессы пусков поездов и приводит к дополнительным потерям электрической энергии в тяговой сети. Эффективность рекуперативного торможения, которое применяется на некоторых линиях железных дорог, когда энергия передаётся непосредственно в контактную сеть, в реальных условиях не превышает 8–10 % [6]. Это связано с тем, что энергия, рекуперированная в контактную сеть, своевременно не потребляется другими разгоняющимися электропоездами.

Для решения этих проблем предпринимаются усилия по созданию компактных, эффективных устройств для оперативного аккумулирования и последующего возврата электрической энергии.

Основной целью является создание схемы (как силовой схемы, так и схемы управления) вагона метрополитена с

АЭП, лишённой указанных выше недостатков. В частности, при разработке схемы управления акцент сделан на алгоритмах и принципах векторного управления АЭП.

Блок-схема завершённой системы управления

Моделирование осуществляется на основе блок-схемы (рисунок 1) системы векторного управления асинхронным двигателем ДАТЭ-170-4У2 электроподвижного состава метрополитена.

Алгоритм формирования значений регистров сравнения осуществляет блок под названием «векторное ШИМ» данной блок-схемы. Система векторного управления имеет два контура обратной связи: контур скорости (нижняя часть рисунка) и контур тока (чуть выше контура скорости).

Для упрощения алгоритма расчёта параметров формирования управляющих векторов в схеме присутствует блок преобразования координат и числа фаз. Неотъемлемыми частями схемы управления являются регуляторы скорости и тока. Данные элементы реализуются исключительно программно микропроцессором [7–10]. Кроме того, следует

отметить в данной схеме блок оценки положения, осуществляющий определение сектора работы инвертора. Параметры двигателя ДАТЭ-170-4У2 [11], на основе которых будет производиться моделирование, сведены в таблицу 1.

Построение модели АД с векторным управлением в среде Matlab

Модель асинхронного привода с векторным управлением, построенная в среде моделирования Matlab, представлена на рисунке 2.

Данная модель имеет 2 канала: силовой канал и канал управления. Силовой канал состоит из источника постоянного напряжения (750 В), силового IGBT инвертора и АД мощностью 170 кВт. Силовой канал представлен в верхней части рисунка 2. В нижней части рисунка представлен канал управления.

Электрические характеристики двигателя задаются в параметрах блока АД в соответствии с таблицей 1 и представлены на рисунке 3.

В качестве нагрузки на валу двигателя задаётся кривая момента сопротивления движению в зависимости от радиальной скорости вала двигателя (рисунок 4). Задание производится блоком «f(u)».

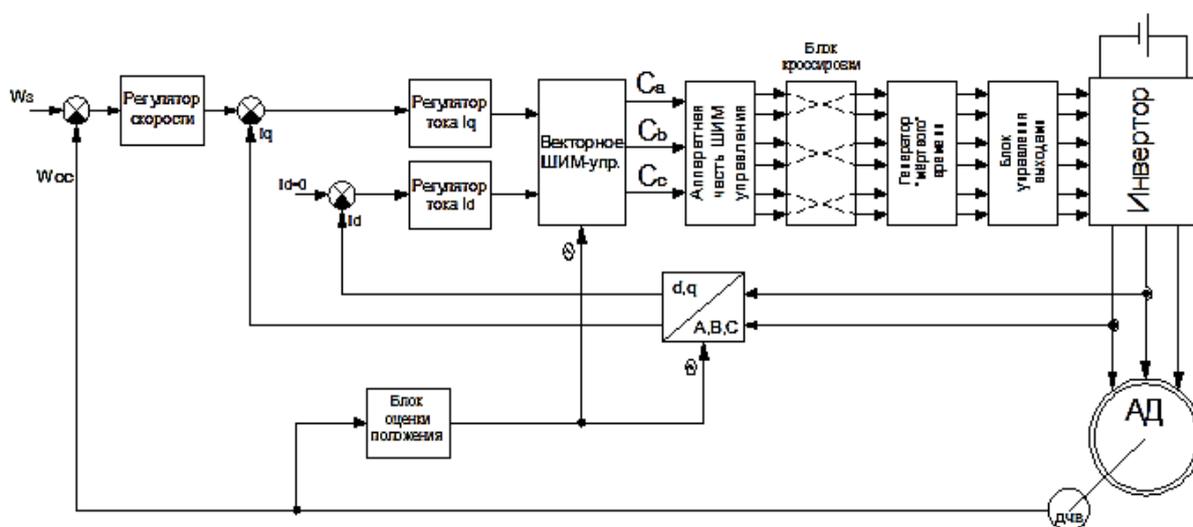


Рисунок 1. Блок-схема завершённой системы управления

Figure 1. Block-diagram of the complete control system

Block Parameters: Asynhron Motor 170kV

[Asynchronous Machine \(mask\) \(link\)](#)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. You can specify initial values for stator and rotor currents or for the stator current only.

Parameters

Preset model: No

Mechanical input: Torque Tm

Show detailed parameters

Rotor type: Squirrel-cage

Reference frame: Stationary

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]:
[170000 550 50]

Stator resistance and inductance [Rs(ohm) Lls(H)]:
[0.0141 0.000303]

Rotor resistance and inductance [Rr(ohm) Llr(H)]:
[0.00903 0.000363]

Mutual inductance Lm (H):
0.011678

Inertia, friction factor and pairs of poles [J(kg.m²) F(N.m.s) p()]:
[2.13 0.05658 2]

Initial conditions
[1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]

Simulate saturation

OK Cancel Help Apply

Рисунок 3. Параметры блока асинхронного двигателя

Figure 3. Block parameters of induction motor

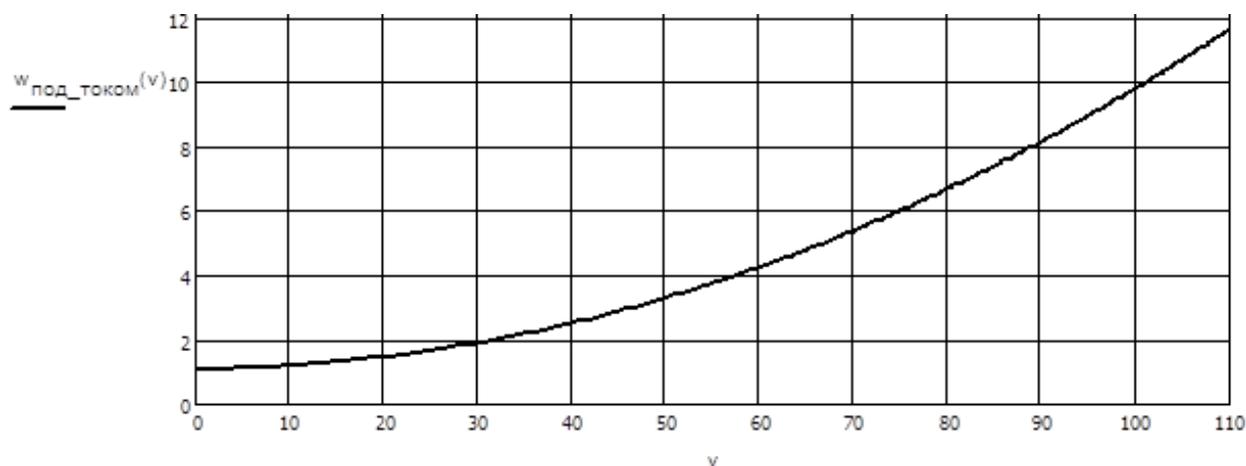


Рисунок 4. Кривая основного сопротивления движению

Figure 4. The curve of the main resistance to movement

Кривые напряжения U_{ab} , токов статора, скорости вала двигателя и электромагнитного момента отображаются в блоке «score».

Алгоритмы и принципы векторного управления асинхронным электроприводом

Канал управления реализует алгоритм векторного управления, подавая сигналы на открытие и закрытие силовых ключей в блок IGBT инвертора [11]. Задание динамики разгона ТЭП осуществляется с помощью блока «Speed control», где задание производится с помощью кривой, таким образом, можно реализовывать различные значения динамики разгона. Значение от датчика скорости сравнивается с сигналом обратной связи по скорости в блоке суммирования. Вычисленная ошибка по скорости пода-

ётся на ПИ-регулятор. Сумматор и ПИ-регулятор реализованы в одном блоке «Speed controller».

Далее сигнал подаётся на блок вычисления тока I_q статора. Ток I_d вычисляется в отдельном блоке. Далее сигналы I_q и I_d подаются на блок преобразования координат «dq to ABC conversion».

Для преобразования координат требуется вычисление угла тета, которое производится в блоке «Teta calculation». Формирование сигналов управления силовыми ключами выполняет блок «Current regulator».

Содержание и структура вышеописанных блоков представлены на рисунках 5–8.

Результирующие графики, демонстрирующие работу модели и принцип векторного управления, показаны на рисунках 9–12.

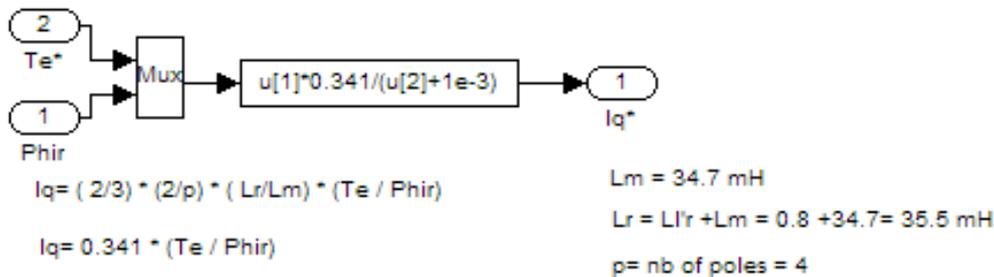


Рисунок 5. Блок вычисления тока I_q

Figure 5. I_q current calculator

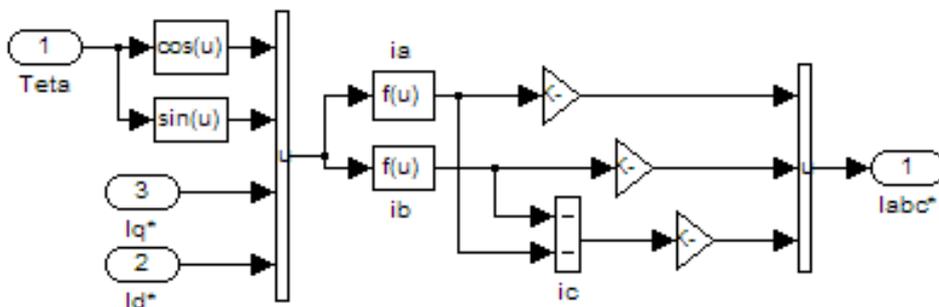


Рисунок 6. Блок преобразования координат «dq to ABC»

Figure 6. Coordinate transformation block «dq to ABC»

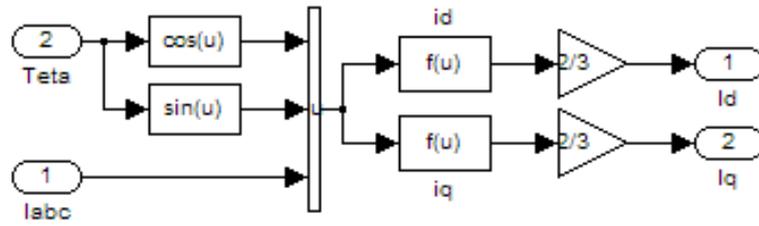


Рисунок 7. Блок преобразования координат «ABC to dq»

Figure 7. Coordinate transformation block «ABC to dq»

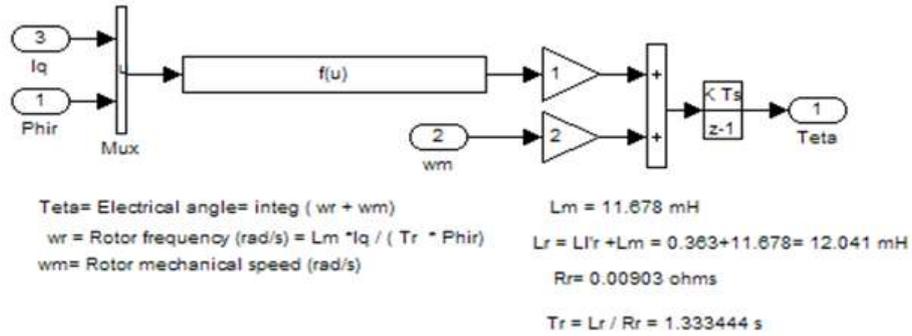


Рисунок 8. Блок вычисления угла тета

Figure 8. Theta angle calculator

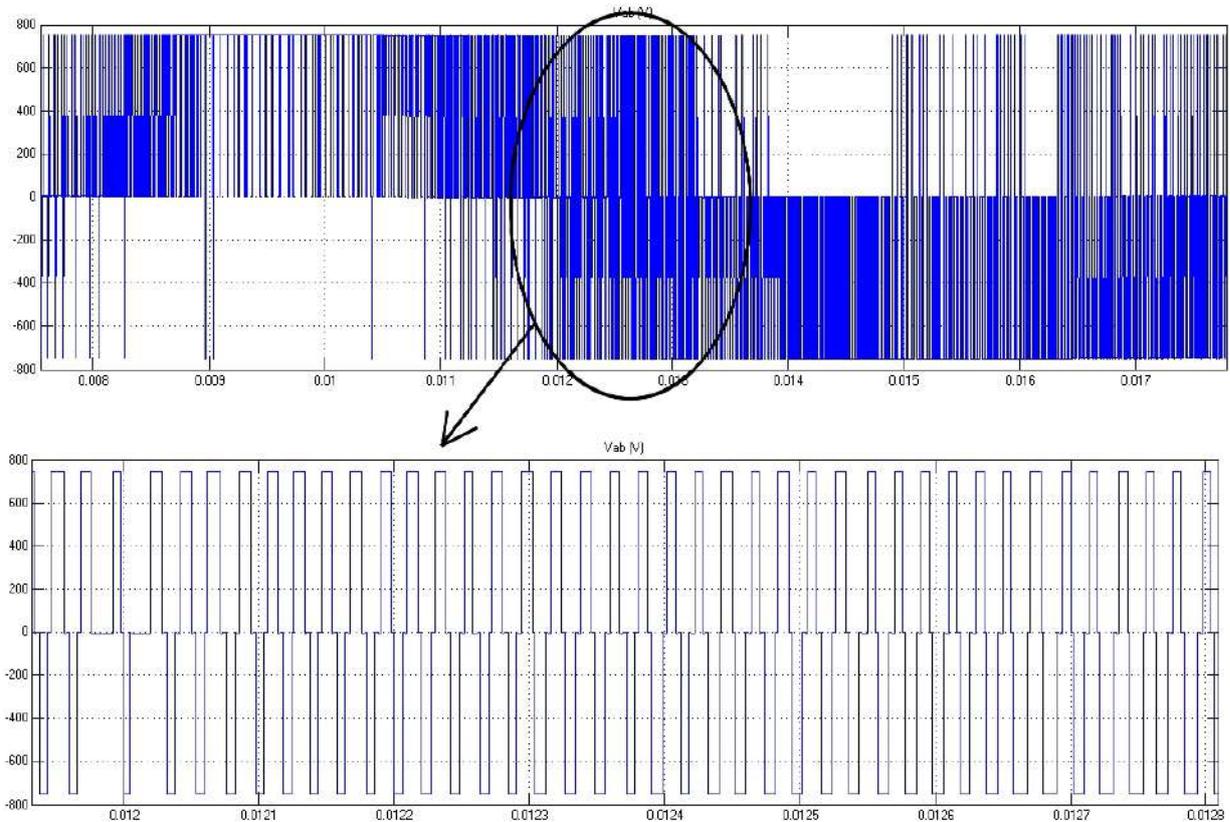


Рисунок 9. Кривые напряжения на выходе инвертора

Figure 9. Inverter output voltage curves

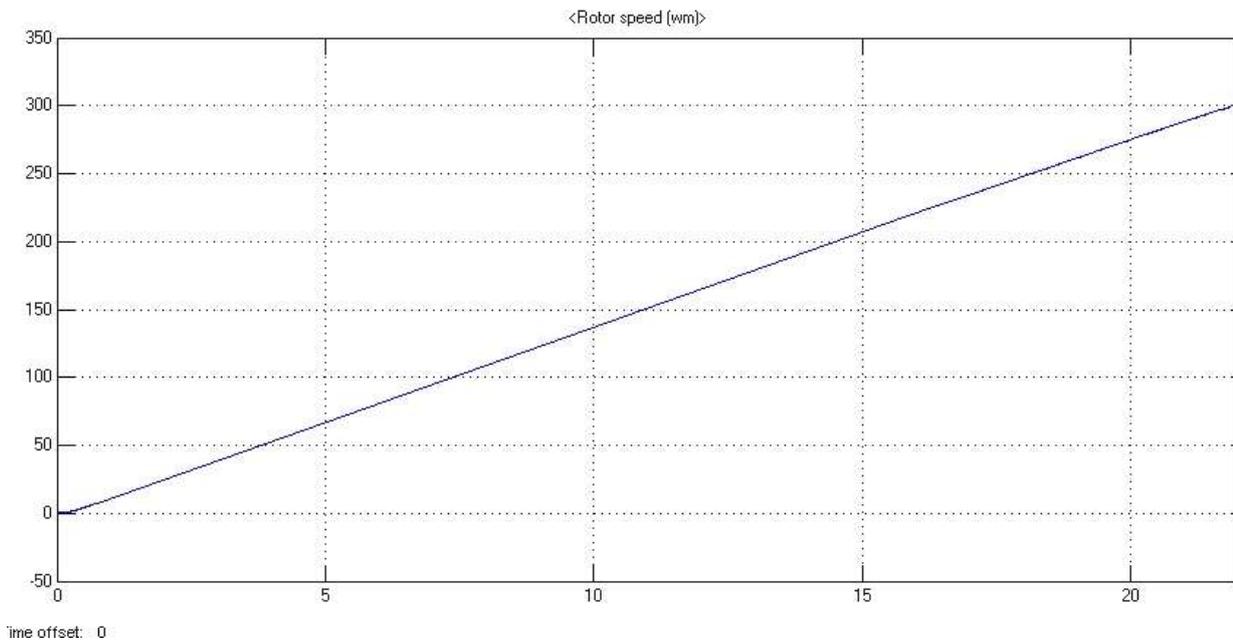


Рисунок 10. Кривая радиальной скорости вала двигателя

Figure 10. Radial speed curve of the motor shaft

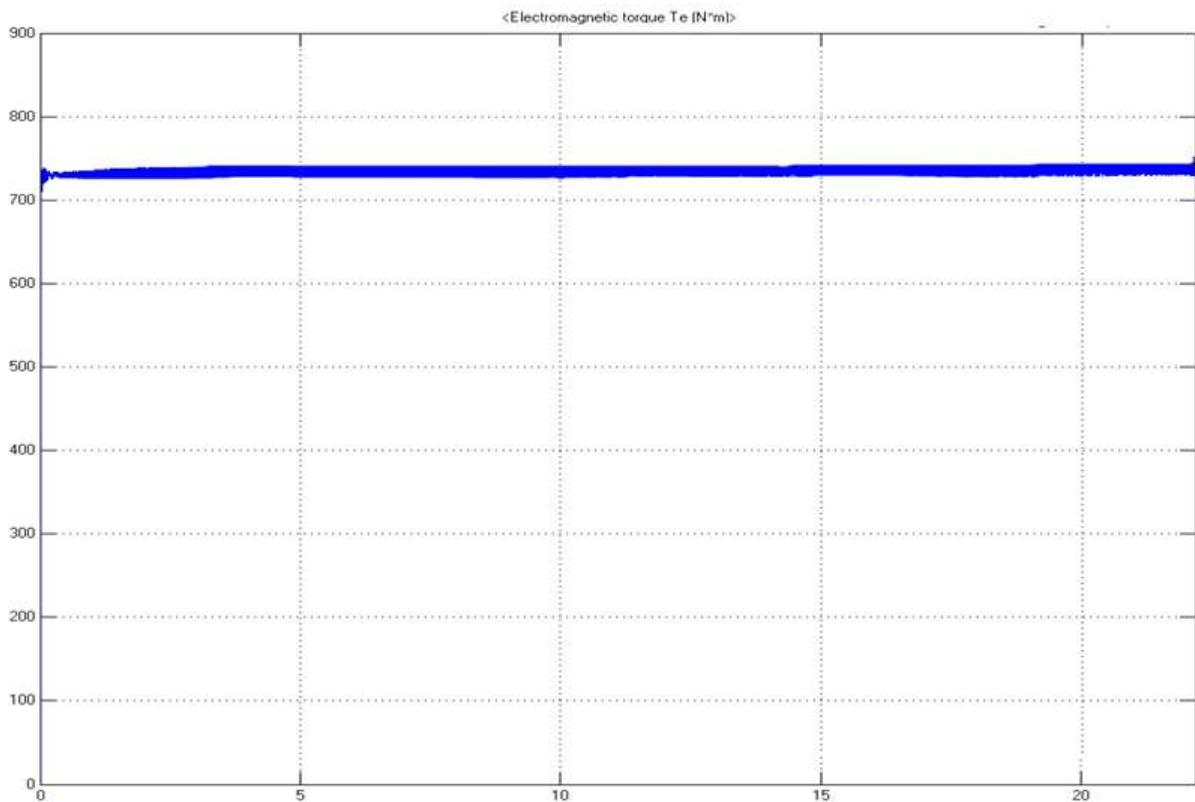


Рисунок 11. Кривая электромагнитного момента

Figure 11. Electromagnetic moment curve

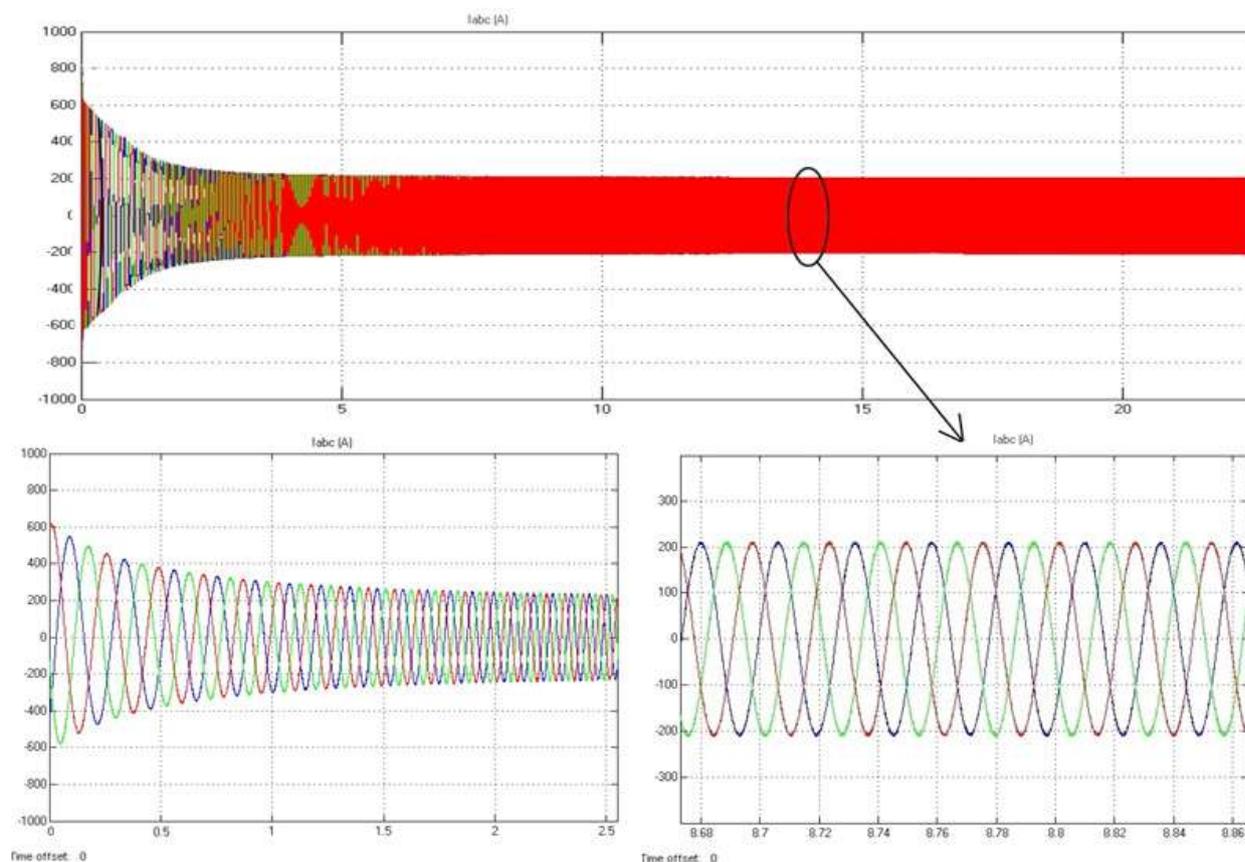


Рисунок 12. Кривые тока статора

Figure 12. Stator current curves

Выводы

Рассмотрена блок-схема завершенной системы векторного управления асинхронным двигателем ДАТЭ-170-4У2.

Разработана модель АД электроподвижного состава метрополитена в среде

Matlab. Адекватность работы модели, демонстрирующей принцип векторного управления, можно оценить с помощью графиков, полученных в ходе моделирования.

Список источников

1. Ракитин А. Будущее — за асинхронным приводом. Технический отдел службы подвижного состава. Петербургский метрополитен № 13 (1318). <http://metroworld.ruz.net/trains/asyn.htm> (дата обращения 23.07.2021).

2. Ротанов Н.А., Курбасов А.С., Быков Ю.Г., Литовченко В.В. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями. М.: Транспорт, 1991. 336 с.

3. Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives // Fundamentals, Types and Applications. 5th Edition. Newnes, UK, 2019. 511 p.

4. Fathy Abouzeid A., Guerrero J.M., Endemaño A., Muniategui I., Ortega D., Larrazabal I., Briz F. Control Strategies for Induction Motors in Railway Traction Applications // Energies. 2020, No. 13 (3). P. 700.

5. Метлицкая О.А. Электрическая тяга. Минск, 2019. 1466 с.

6. Тулупов В.Д. Тяговый электропривод постоянного тока с наилучшими технико-экономическими показателями // Электросила. 2002. Вып. 41. С. 196-210.

7. Djararov N., Milushev H., Bonev M., Grozdev Zh., Djararova Ju. Adaptive Vector Control of Induction Motor Drives by Optimal Adaptive Observer // 7th

International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE). 2020, pp. 1-5.

8. Novotny D.W., Lipo T.A. *Vector Control and Dynamics of AC Drives // Monographs in Electrical and Electronic Engineering*. 1st Edition. Clarendon Press, 1996. 456 p.

9. Syed A.N. *Vector Control of AC Drives*. Routledges, NY, 2017. 256 p.

10. Mukhtar A. *High Performance AC Drives: Modeling Analysis and Control*. Springer Science & Business Media, 2010. 290 p.

11. Двигатель асинхронный тяговый ДАТЭ-170 для вагонов метрополитена. http://www.xn--80addceesnhi0axzh6mb.net/catalog.php?SECTION_ID=130&ELEMENT_ID=436 (дата обращения 25.06.2021).

References

1. Rakitin A. *Budushchee — za asinkhronnym privodom. Tekhnicheskii otdel sluzhby podvizhnogo sostava* [The Future Belongs to the Asynchronous Drive. Technical Department of Rolling Stock Service]. Peterburgskii metropoliten № 13 (1318). <http://metroworld.ruz.net/trains/asyn.htm> (accessed 23.07.2021). [in Russian].

2. Rotanov N.A., Kurbasov A.S., Bykov Yu.G., Litovchenko V.V. *Elektropodvizhnoi sostav s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami* [Electric Rolling Stock with Asynchronous Traction Motors]. Moscow, Transport Publ., 1991. 336 p. [in Russian].

3. Hughes A., Drury B. *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications*. 5th Edition. Newnes, UK, 2019. 511 p.

4. Fathy Abouzeid A., Guerrero J.M., Endemaño A., Muniategui I., Ortega D., Larrazabal I., Briz F. Control Strategies for Induction Motors in Railway Traction Applications. *Energies*, 2020, No. 13 (3), pp. 700.

5. Metlitskaya O.A. *Elektricheskaya tyaga* [Electric Traction]. Minsk, 2019. 1466 p. [in Russian].

6. Tulupov V.D. Tyagovyi elektroprivod postoyannogo toka s nailuchshimi tekhniko-ekonomicheskimi pokazatelyami [DC Traction Electric Drive with the Best Technical and Economic Indicators]. *Elektrosila — Electric Power*, 2002, Issue 41, pp. 196-210. [in Russian].

7. Djagarov N., Milushev H., Bonev M., Grozdev Zh., Djagarova Ju. Adaptive Vector Control of Induction Motor Drives by Optimal Adaptive Observer. *7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*. 2020, pp. 1-5.

8. Novotny D.W., Lipo T.A. *Vector Control and Dynamics of AC Drives. Monographs in Electrical and Electronic Engineering*. 1st edition. Clarendon Press, 1996. 456 p.

9. Syed A.N. *Vector Control of AC Drives*. Routledges, NY, 2017. 256 p.

10. Mukhtar A. *High Performance AC Drives: Modeling Analysis and Control*. Springer Science & Business Media, 2010. 290 p.

11. *Dvigatel' asinkhronnyi tyagovyi DATE-170 dlya vagonov metropolitena* [Asynchronous Traction Motor DATE-170 for Metro]. http://www.xn--80addceesnhi0axzh6mb.net/catalog.php?SECTION_ID=130&ELEMENT_ID=436 (accessed 25.06.2021). [in Russian].



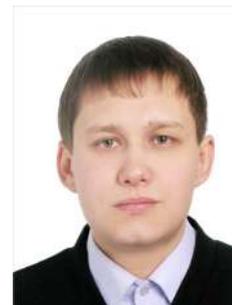
**Борис Анатольевич
Мартынов
Boris A. Martynov**

*инженер
научно-исследовательской
лаборатории,
ООО НИЦ
«Энергодиагностика»,
Уфа, Россия*



**Регина Тагировна
Хазиева
Regina T. Khazieva**

*кандидат технических
наук, доцент кафедры
«Электротехника
и электрооборудование
предприятий»,
Уфимский
государственный
нефтяной технический
университет,
Уфа, Россия*



**Андрей Валерьевич
Мухаметшин
Andrey V. Mukhametshin**

*инженер кафедры
«Электротехника
и электрооборудование
предприятий», Уфимский
государственный
нефтяной технический
университет,
Уфа, Россия*

УДК 621.317.311, 621.396.669

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-26-40

ЗАЩИТА СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА РЕЗОНАНСНОЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Цель исследования

При разработке источников испытательного напряжения на переменном токе для оценки качества изоляции высоковольтного электрооборудования стоит задача защиты схемы измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при пробоях изоляции и полных разрядах.

Методы исследования

При решении поставленной задачи авторами предложено техническое решение защиты схемы измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным напряжением промышленной частоты, в котором используются быстродействующие диоды Шоттки.

Результаты

В статье в ходе исследования стенда защиты схемы измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным напряжением промышленной частоты, создан опытно-промышленный образец, позволяющий защитить схему измерения испытательного тока при пробоях изоляции и полных разрядах. Применение разработанной защиты схемы измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным напряжением промышленной частоты, позволяет ограничить высоко-частотные импульсы амплитудой больше 405 мВ.

Таким образом, внедрение данной схемы позволит на ее базе создавать ряд защитных устройств, позволяющих защитить схемы измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным

напряжением промышленной частоты от 1 до 6 кВ. Полученные результаты могут быть использованы в технике высоких напряжений для исследования защиты схем измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным напряжением промышленной частоты.

Ключевые слова: пробой, испытание изоляции, испытательный ток, диоды, повышенное напряжение, высоковольтная испытательная установка, испытуемый объект, резонанс

PROTECTION OF THE CURRENT MEASURING CIRCUIT OF A RESONANCE TESTING INSTALLATION

Aims of research

When developing alternating current test voltage sources for assessing the insulation quality of high-voltage electrical equipment, the task is to protect the test current measurement circuit flowing through the tested object.

Research methods

When solving the problem, the authors proposed a technical solution to protect the circuit for measuring the test current flowing through the test object when testing insulation with increased voltage of industrial frequency, in which high-speed Schottky diodes are used.

Results

In the article, in the course of researching the protection stand of the test current measurement circuit flowing through the tested object when testing the insulation with increased power frequency voltage, a prototype was created that allows to protect the test current measurement circuit. The use of the developed protection circuit for measuring the test current flowing through the test object when testing the insulation with an increased voltage of industrial frequency makes it possible to limit high-frequency pulses with an amplitude of more than 405 mV.

Thus, the introduction of this circuit will make it possible, on its basis, to create a number of protective devices that make it possible to protect the circuits for measuring the test current flowing through the tested object when testing the insulation with an increased voltage of industrial frequency from 1 to 16 kV. The results obtained can be used in high voltage technology to investigate the protection of circuits for measuring the test current flowing through the test object when testing the insulation with an increased power frequency voltage.

Keywords: insulation test, test current, diodes, overvoltage, high voltage test set, test object, resonance

Введение и литературный обзор

Одним из основных методов оценки качества изоляции высоковольтного электрооборудования согласно ГОСТ Р 55194-2012, ПУЭ, ПТЭЭП и СТО 34.01-23.1-001-2017 является испытание переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты 50 Гц [1]. Данный метод испытания позволяет на ранней стадии выявить дефекты в изоляции высоковольтного электрооборудования. Для испытания переменным синусоидальным напряжением промышленной

частоты 50 Гц, которое прикладывается к изоляции, применяются специальные специализированные установки различных фирм изготовителей [2–9]. Все существующие высоковольтные испытательные установки, предназначенные для испытания изоляции высоковольтного электрооборудования на переменном токе промышленной частоты 50 Гц, состоят из трёх основных блоков (частей):

1. *высоковольтный блок*, в состав которого входят основные элементы, такие как высоковольтный испытательный

трансформатор, высоковольтный испытательный кабель и современные высоковольтные разъемы;

2. *блок управления*, в состав которого входят основные элементы, такие как плата управления на базе микроконтроллера, источники стабилизированного питания, быстродействующие реле и т.д.;

3. *блок измерения*, в состав которого входят основные элементы, такие как плата измерения тока и напряжения на современных микросхемах, высокоомные и емкостные высоковольтные делители напряжения, прецизионные резисторы, датчики тока и т.д.

В процессе многочисленных испытаний на переменном токе промышленной частоты возникают «ненормальные» режимы, такие как пробой изоляции испытуемого объекта, непродолжительные неполные разряды, при которых испытуемый объект шунтируется искровым разрядом, обрыв высоковольтного кабеля под напряжением или замыкание его на заземлённые элементы, обрыв точки низкого потенциала испытательного трансформатора. Все описанные «ненормальные» режимы работы могут повлиять и вывести из строя один из трех блоков испытательной установки, такие как схемы измерения тока и напряжения, схемы индикации, схемы управления высоковольтными установками в процессе испытания изоляции высоковольтного электрооборудования на переменном токе промышленной частоты [10]. Основной задачей данной статьи является *разработка и исследование схемы защиты при непродолжительном полном разряде на заземляющий контур (элемент с нулевым потенциалом) в процессе испытания изоляции высоковольтного электрооборудования на переменном токе промышленной частоты.*

Материалы и методы

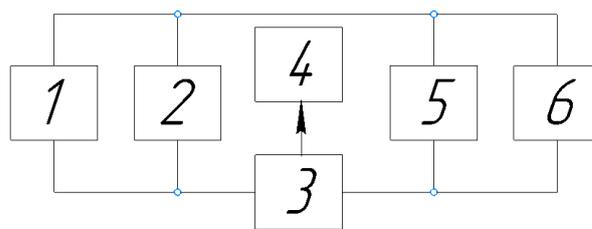
Согласно ГОСТ 1516.2-97 «Электрооборудование и электроустановки пере-

менного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции» вводятся следующие определения:

1) *полный разряд* — электрический разряд, полностью шунтирующий изоляцию между электродами и вызывающий снижение значения напряжения между электродами практически до нуля;

2) *пробой* — полный разряд в твердом диэлектрике.

Для исследования пробоя и моделирования процесса полного пробоя (разряда) использовались следующие приборы и компоненты, предоставленные ООО НИЦ «Энергодиагностика» (г. Уфа) (рисунок 1).



1 — сеть, 220 В, 50 Гц; 2 — высоковольтная испытательная установка; 3 — схема измерения испытательного переменного тока промышленной частоты; 4 — осциллограф; 5 — испытуемый объект (высоковольтная изоляция); 6 — регулируемый шаровой разрядник

1 — power source, 220 V, 50 Hz; 2 — high voltage test facility; 3 — circuit for measuring test alternating current of industrial frequency; 4 — oscilloscope; 5 — test object (high voltage insulation); 6 — adjustable spherical gap

Рисунок 1. Схема воссоздания процесса непродолжительного полного пробоя (разряда)

Figure 1. Scheme of recreation of the process of short complete breakdown (discharge)

В современных приборах для защиты микросхем от электростатического разряда применяют схемы защиты на основе стабилитронов, резисторов, быстродей-

ствующих диодов, специализированные защитные диоды, буферные микросхемы и т.д. [11–20].

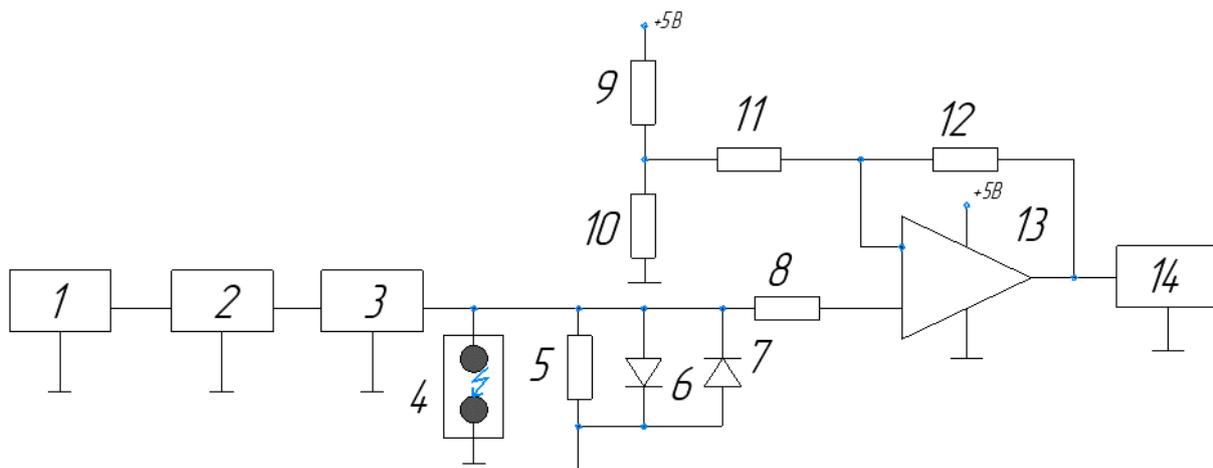
Для исследования защиты схемы измерения переменного испытательного тока используются диоды Шоттки. Преимущества диодов Шоттки заключаются в том, что они имеют меньшую электрическую ёмкость перехода, что обуславливает быстрое действие, они обладают высокой надёжностью и низкой стоимостью.

В качестве источника испытательного напряжения промышленной частоты используется резонансная испытательная установка РИУ-10-М2 (рисунок 2) производства ООО НИЦ «Энергодиагностика». На рисунке 2 шаровой разрядник 4 используется для регулирования напряжения пробоя на испытуемом объекте, прецизионный резистор 5 типа С2-29В отечественного производителя АНО «НПО» «ЭРКОН» применяется для измерения испытательного тока, диоды Шоттки типа MBR0520L 6, 7 в корпусе

DO-41 производства ST Microelectronics используются для защиты схемы измерения при имитации непродолжительных полных пробоев.

Прецизионные резисторы 11, 12 типа С2-33Н, представленные на рисунке 2, применяются для задания коэффициента усиления схемы; 8, 11 применяются для уравнивания токов входных каскадов; 9, 10 — делитель для создания напряжения смещения для нормальной работы операционного усилителя в режиме однополярного питания. Операционный усилитель 13 (рисунок 2) типа MCP6002 в корпусе SOIC-8 производителя Microchip Technology применяется для усиления входного сигнала. Осциллограф 14 (рисунок 2) типа АТАКОМ ADS-2061mv применяется для регистрации осциллограмм.

Фотоизображение экспериментального стенда для исследования процесса непродолжительного полного пробоя представлено на рисунке 3, а и б.

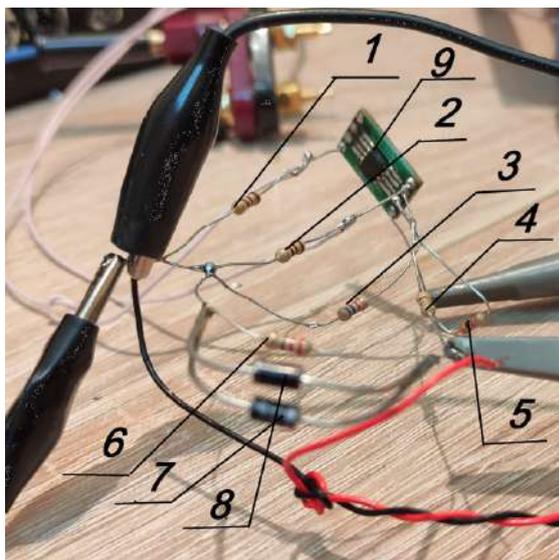


1 — сеть, 220 В, 50 Гц; 2 — высоковольтная испытательная установка; 3 — испытуемый объект (ёмкостной стенд); 4 — шаровой разрядник; 5, 8, 9, 10, 11, 12 — прецизионные резисторы; 6, 7 — диоды Шоттки; 13 — операционный усилитель; 14 — осциллограф

1 — power source, 220 V, 50 Hz; 2 — high voltage test facility; 3 — test object (capacitive stand); 4 — ball spark gap; 5, 8, 9, 10, 11, 12 — precision resistors; 6, 7 — Schottky diodes; 13 — operational amplifier; 14 — oscilloscope

Рисунок 2. Схема исследования процесса непродолжительного полного пробоя

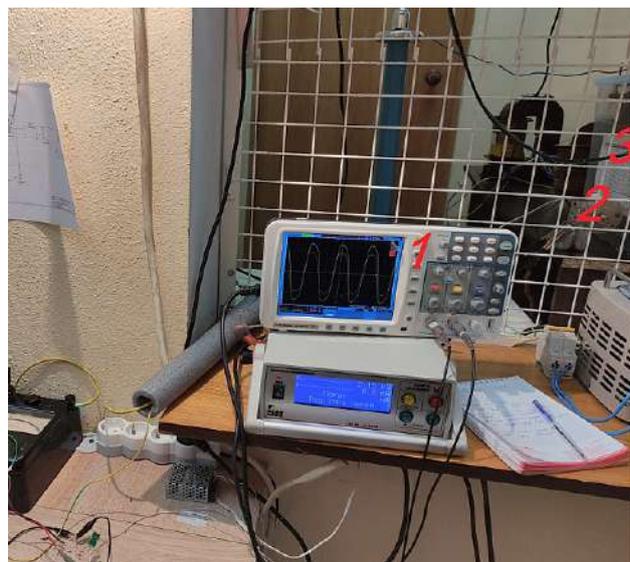
Figure 2. Scheme of research of a short-term process complete breakdown



a)

1, 2, 3, 4, 5, 6 — прецизионные резисторы;
7, 8 — диоды Шоттки;
9 — операционный усилитель

1, 2, 3, 4, 5, 6 — precision resistors;
7, 8 — Schottky diodes;
9 — operational amplifier



b)

1 — осциллограф;
2 — шаровой разрядник;
3 — испытуемый объект

1 — oscilloscope;
2 — ball spark gap;
3 — test object

Рисунок 3. Фотоизображение экспериментального стенда для исследования процесса непродолжительного полного пробоя

Figure 3. Experimental stand photograph for investigating the process of short-term complete breakdown

Рассмотрим режимы работы № 1 и № 2 без непродолжительного полного пробоя.

Режим работы № 1

Напряжение от источника питания 1 подается на вход резонансной испытательной установки 2 (рисунок 2). На выходе резонансной испытательной установки 2 генерируется и подаётся высоковольтное испытательное напряжение промышленной частоты на испытуемый объект 3.

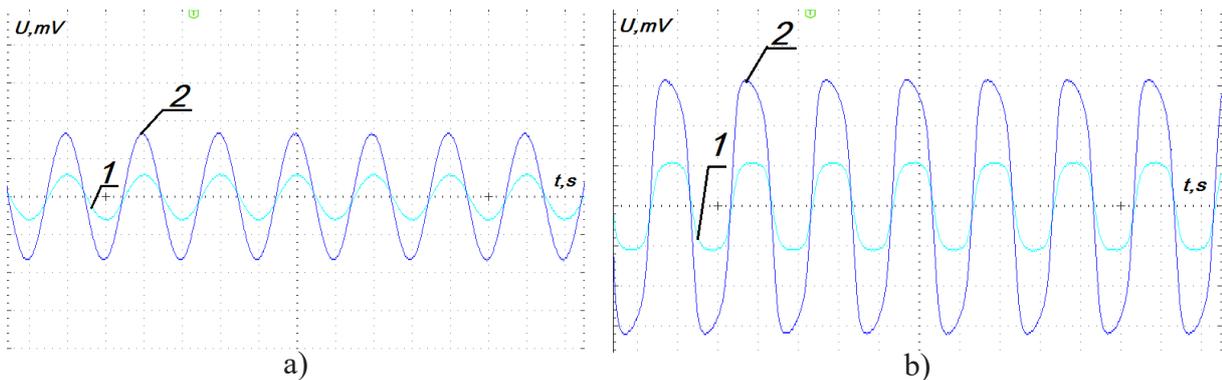
Шаровой разрядник 4 (рисунок 2) не участвует в схеме, т.к. рассматриваемый режим без непродолжительного полного пробоя. Под действием ёмкостной нагрузки 3 ёмкостью, равной 145 нФ, при испытательном напряжении 3 кВ протекает испытательный ток 135 мА по прецизионному резистору 5. На входе и выходе операционного усилителя 13 типа

МСР6002 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений, представленные на рисунке 4, а.

Из рисунка 4, а видно, что при испытательном напряжении промышленной частоты 3 кВ на прецизионном резисторе 5 (рисунок 2) падает напряжение и подается на вход операционного усилителя 13, где происходит усиление в 2,8 раза и регистрация осциллограмм осциллографом 14.

Режим работы № 2

Под действием ёмкостной нагрузки 3 при испытательном напряжении 6 кВ протекает испытательный ток 321 мА по прецизионному резистору 5 (рисунок 2). На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений на входе и выходе операционного усилителя типа МСР6002,



1 — 200 mV/div, 5Ks/s;
2 — 200 mV/div; 5Ks/s

1 — 500 mV/div, 5Ks/s;
2 — 500 mV/div; 5Ks/s

1 — осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя;
2 — осциллограмма напряжения на выходе операционного усилителя

1 — осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя;
2 — осциллограмма напряжения на выходе операционного усилителя

1 — oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier;
2 — oscillogram of the voltage at the output of the operational amplifier

1 — oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier;
2 — oscillogram of the voltage at the output of the operational amplifier

a) режим работы № 1 без непродолжительного полного пробоя
b) режим работы № 2 без непродолжительного полного пробоя

a) operating mode No. 1 without short complete breakdown
b) operating mode No. 2 without short complete breakdown

Рисунок 4. Осциллограммы напряжений на входе и выходе операционного усилителя

Figure 4. Oscillograms of voltages at the input and output of the operational amplifier

представленные на рисунке 4, б. Из осциллограммы напряжения 2 видно, что при амплитудном напряжении больше 405 мВ происходит ограничение (скругление) осциллограммы, защитные диоды Шоттки MBR0520L переходят в проводящий режим, и выходное напряжение ограничивается на уровне 405 мВ при температуре 27,5 °С.

Рассмотрим режим работы при непродолжительном полном пробое 1 кВ, 2 кВ, 4 кВ и 6 кВ.

Напряжение от источника питания 1 подается на вход резонансной испытательной установки 2 (рисунок 2). На выходе резонансной испытательной установки 2 генерируется и подаётся высоковольтное испытательное напряжение от 1 до 6 кВ на испытуемый объект ёмкостью 145 нФ. На каждом уровне напряжения в

шаровом разряднике 4 при подаче испытательного напряжения промышленной частоты регулируем зазор (расстояние) между шаровыми разрядниками.

В определенный момент регулирования расстояния между шаровыми разрядниками происходит непродолжительный полный разряд на точку низкого потенциала. Рассмотрим данные режимы подробнее.

Режим работы № 3

Под действием ёмкостной нагрузки 3, равной 145 нФ, при испытательном напряжении промышленной частоты 1 кВ протекает испытательный ток 75 мА через прецизионной резистор 5 (рисунок 2). На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений, представленные на рисунке 4, а.

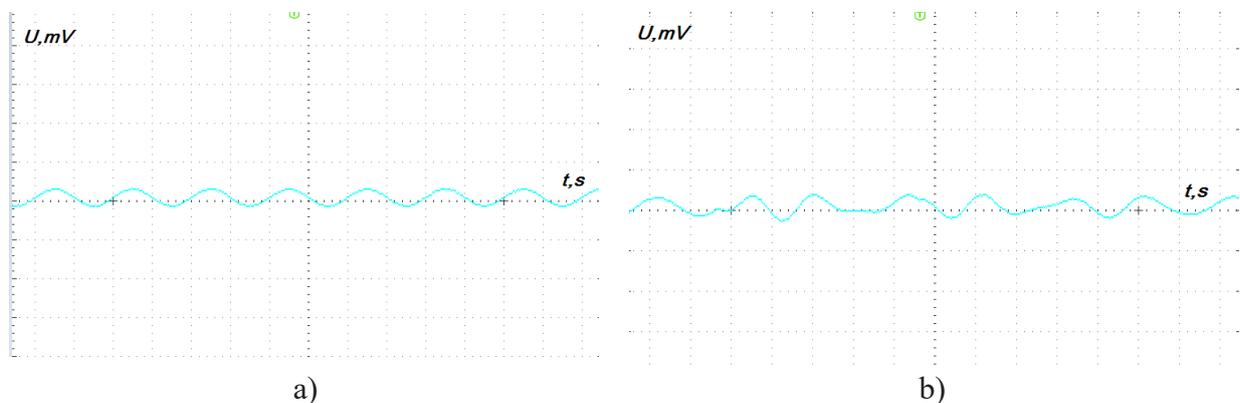
В шаровом разряднике 4 при подаче испытательного напряжения промышленной частоты 1 кВ регулируем зазор (расстояние) между разрядниками, до непродолжительного полного пробоя в точку низкого потенциала. На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений при непродолжительном полном пробое, представленные на рисунке 5, *b*.

Из рисунка 5, *b* видно, что при имитации пробоя шаровым разрядником при напряжении промышленной частоты 1 кВ происходит наложение двух частот: одна связана с частой испытательного напряжения (тока) 50 Гц, а другая форма тока непродолжительного разряда в точку низкого потенциала на прецизионном резисторе, регистрируемая осциллографом до 325 Гц. Всплеск импульсов регистрируемым осциллографом не наблюдается. Защита операционного усилителя при испытаниях на перемен-

ном токе промышленной частоты до 1 кВ не требуется.

Режим работы № 4

Под действием ёмкостной нагрузки 3, равной 145 нФ, при испытательном напряжении промышленной частоты 2 кВ протекает испытательный ток 191 мА по прецизионному резистору 5 (рисунок 2). На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений, представленные на рисунке 6, *a*. В шаровом разряднике 4 при подаче испытательного напряжения промышленной частоты 2 кВ регулируем зазор (расстояние) между разрядниками, до непродолжительного полного пробоя в точку низкого потенциала. На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений при непродолжительном полном пробое, представленные на рисунке 6, *b*.



1 — 200 mV/div, 5Ks/s;
2 — 200 mV/div, 5Ks/s

1 — 200 mV/div, 5Ks/s;
2 — 200 mV/div, 5Ks/s

a) осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя без непродолжительного полного пробоя;

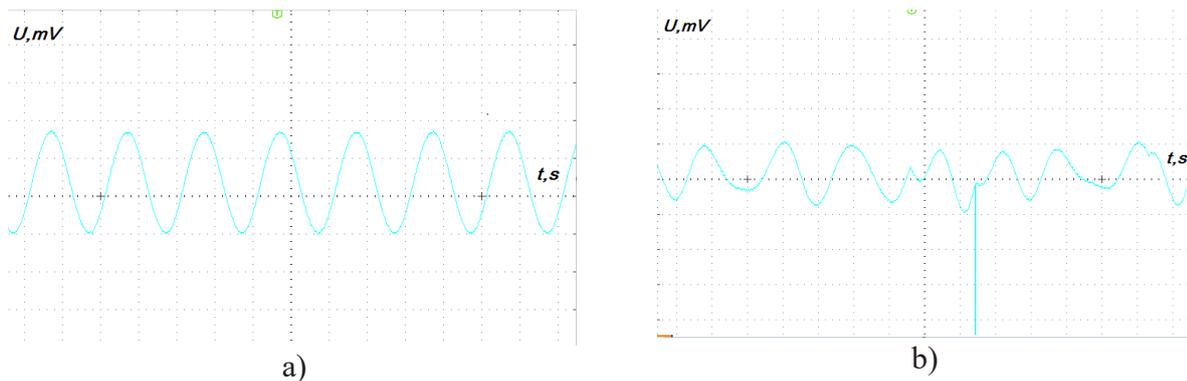
b) осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя в момент непродолжительного полного пробоя 1 кВ

a) oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier without a short complete breakdown;

b) oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier at the moment of a short complete breakdown of 1 kV

Рисунок 5. Осциллограммы напряжений на входе операционного усилителя (режим № 3)

Figure 5. Oscillograms of voltages at the input of the operational amplifier (mode No. 3)



1 — 100 mV/div, 5Ks/s;
2 — 100 mV/div, 5Ks/s

1 — 100 mV/div, 5Ks/s;
2 — 100 mV/div, 5Ks/s

- a) осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя без непродолжительного полного пробоя;
- b) осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя в момент непродолжительного полного пробоя 2 кВ
- a) oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier without a short complete breakdown;
- b) oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier at the moment of a short complete breakdown of 2 kV

Рисунок 6. Осциллограммы напряжений на входе операционного усилителя (режим № 4)

Figure 6. Oscillograms of voltages at the input of the operational amplifier (mode No. 4)

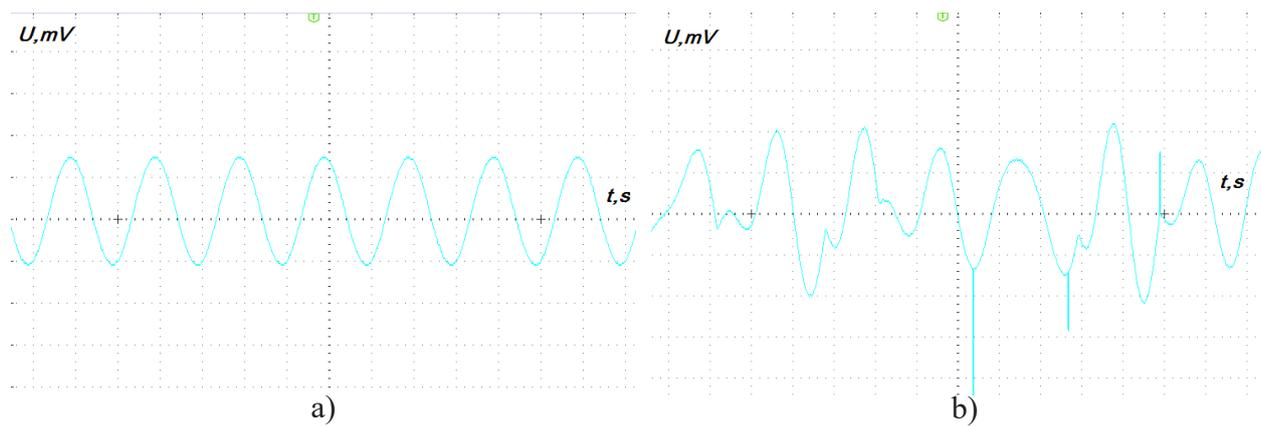
Из рисунка 6, *b* видно, что при имитации пробоя шаровым разрядником при напряжении промышленной частоты 2 кВ происходит наложение двух частот: одна связана с частой испытательного напряжения (тока) 50 Гц, а другая форма тока непродолжительного разряда на точку низкого потенциала на прецизионном резисторе регистрируемая осциллографом до 527 Гц всплеском импульсов амплитудой больше 450 мВ.

При многократных повторениях имитации непродолжительного разряда в точку низкого потенциала на прецизионном резисторе регистрируемая осциллографом амплитуда изменяется в пределах 8 %, а наложенная частота всплеска импульсов — в пределах 12 %. Защита операционного усилителя при испытаниях на переменном токе промышленной частоты на 2 кВ требуется.

Режим работы № 5

Под действием ёмкостной нагрузки 3, равной 145 нФ, при испытательном напряжении промышленной частоты 4 кВ протекает испытательный ток 241 мА по прецизионному резистору 5 (рисунок 2). На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений, представленные на рисунке 7, *a*.

В шаровом разряднике 4 при подаче испытательного напряжения промышленной частоты 4000 В регулируем зазор (расстояние) между разрядниками, до непродолжительного полного пробоя в точку низкого потенциала. На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений при непродолжительном полном пробое, представленные на рисунке 7, *b*.



1 — 100 mV/div, 5Ks/s;
2 — 100 mV/div, 5Ks/s

a) осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя без непродолжительного полного пробоя;

b) осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя в момент непродолжительного полного пробоя 4 кВ

a) oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier without a short complete breakdown;

b) oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier at the moment of a short complete breakdown of 4 kV

Рисунок 7. Осциллограммы напряжений на входе операционного усилителя (режим № 5)

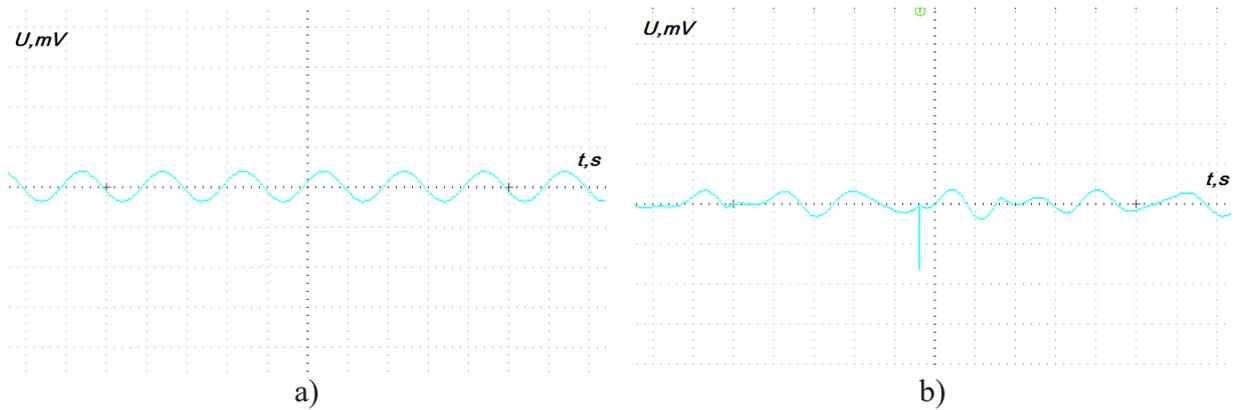
Figure 7. Oscillograms of voltages at the input of the operational amplifier (mode No. 5)

Из рисунка 7, *b* видно, что при имитации пробоя шаровым разрядником при напряжении промышленной частоты 4 кВ происходит наложение двух частот: одна связана с частой испытательного напряжения (тока) 50 Гц, а другая форма тока непродолжительного разряда на точку низкого потенциала на прецизионном резисторе, регистрируемая осциллографом до 3,341 кГц, всплеском импульсов амплитудой больше 500 мВ.

При многократных повторениях имитации непродолжительного разряда в точку низкого потенциала на прецизионном резисторе регистрируемая осциллографом амплитуда изменяется в пределах 11 %, а наложенная частота всплеска импульсов — в пределах 17 %. Защита операционного усилителя при испытаниях на переменном токе промышленной частоты на 4 кВ требуется.

Режим работы № 6

Под действием ёмкостной нагрузки 3, равной 145 нФ, при испытательном напряжении промышленной частоты 6 кВ протекает испытательный ток 312 мА по прецизионному резистору 5 (рисунок 2). На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений, представленные на рисунке 8, *a*. В шаровом разряднике 4 при подаче испытательного напряжения промышленной частоты 6000 В регулируем зазор (расстояние) между разрядниками, до непродолжительного полного пробоя на точку низкого потенциала. На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений при непродолжительном полном пробое, представленные на рисунке 8, *b*.



1 — 500 mV/div, 5Ks/s;
2 — 500 mV/div, 5Ks/s

1 — 500 mV/div, 5Ks/s;
2 — 500 mV/div, 5Ks/s

a) осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя без непродолжительного полного пробоя;

b) осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя в момент непродолжительного полного пробоя 6 кВ

a) oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier without a short complete breakdown;

b) oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier at the moment of a short complete breakdown of 6 kV

Рисунок 8. Осциллограммы напряжений на входе операционного усилителя (режим № 6)

Figure 8. Oscillograms of voltages at the input of the operational amplifier (mode No. 6)

Из рисунка 8, *b* видно, что при имитации пробоя шаровым разрядником при напряжении промышленной частоты 6 кВ происходит наложение двух частот: одна связана с частой испытательного напряжения (тока) 50 Гц, а другая форма тока непродолжительного разряда на точку низкого потенциала на прецизионном резисторе регистрируемая осциллографом до 4,2641 кГц всплеском импульсов амплитудой больше 850 мВ.

При многократных повторениях имитации непродолжительного разряда в точку низкого потенциала на прецизионном резисторе регистрируемая осциллографом амплитуда изменяется в пределах 16 %, а наложенная частота всплеска импульсов — в пределах 21 %. Защита операционного усилителя при испытаниях на переменном токе промышленной частоты на 6 кВ требуется.

Результаты экспериментов по режимам 1–6 представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты экспериментов

Table 1. Experimental results

Режим работы	1	2	3	4	5	6
Ёмкость нагрузки, нФ	145	145	145	145	145	145
Испытательное напряжение, кВ	3	6	1	2	4	6
Испытательный ток, мА	135	321	75	191	241	312
Частота наложенного сигнала, Гц	50	50	325	527	3341	4641
Амплитуда импульсов, мВ	–	–	95	450	500	850

Режим работы № 7

Под действием ёмкостной нагрузки 3, равной 145 нФ, при испытательном напряжении промышленной частоты 6 кВ протекает испытательный ток 312 мА по прецизионному резистору 5 (рисунок 2).

На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений, представленные на рисунке 9. В шаровом разряднике 4 при подаче испытательного напряжения промышленной частоты 6 кВ регулируем зазор (расстояние) между разрядниками, до непродолжительного полного пробоя в точку низкого потенциала. На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений при непродолжительном полном пробое, представленные на рисунке 9.

Из рисунка 9 видно, что при имитации непродолжительного пробоя шаровым разрядником при напряжении промышленной частоты 6 кВ происходит наложение двух частот: одна связана с частотой испытательного напряжения (тока) 50 Гц, а другая форма тока непродолжительного

разряда на точку низкого потенциала на прецизионном резисторе регистрируемая осциллографом до 4,104 кГц всплеском импульсов амплитудой не больше 405 мВ. Защитные диоды Шоттки ограничивают и защищают от высокочастотных импульсов больше 405 мВ.

Согласно полученным экспериментальным данным, представленным в таблице 1, при непродолжительных полных пробоях в процессе испытания изоляции высоковольтного электрооборудования на переменном токе промышленной частоты внедрена защита схемы измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект в ряд испытательных установок РИУ.

На рисунке 10 представлены две платы. Плата № 1 (рисунок 10, а) — это плата управления РИУ на базе маломощного микроконтроллера типа STM32L476VGT6 Cortex-M4, 80 МГц производства фирмы ST Microelectronics. Плата № 2 (рисунок 10, б) — это плата измерения переменного тока и напряжения с защитой изолирующих усилителей диодами Шоттки.

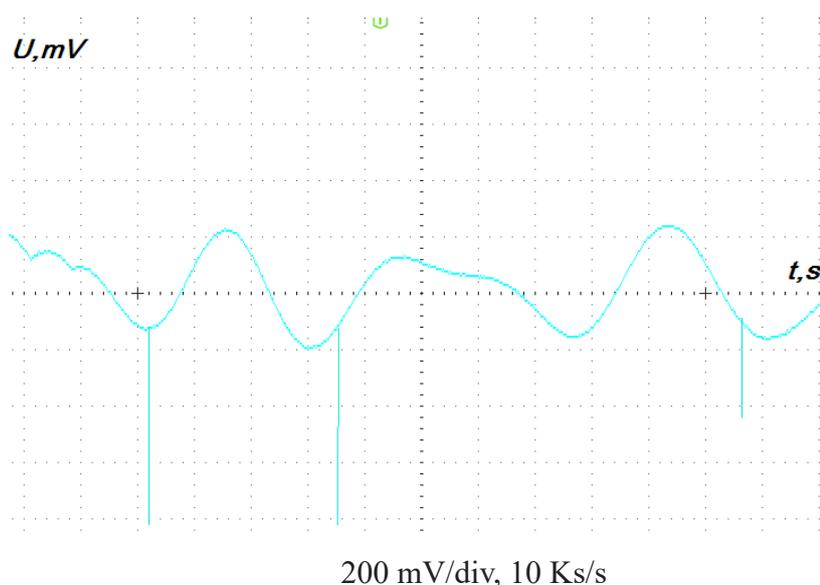


Рисунок 9. Осциллограмма напряжений на входе операционного усилителя при непродолжительном полном пробое 6 кВ (режим № 7) со схемой защиты на диодах Шоттки

Figure 9. Oscillogram of voltages at the input of the operational amplifier with a short full breakdown of 6 kV (mode No. 7) with a protection circuit based on Schottky diodes



a)

a) плата управления РИУ; b) плата измерения тока и напряжения



b)

a) control board RIU; b) current and voltage measurement board

Рисунок 10. Платы управления и измерения**Figure 10.** Control and measurement boards**Выводы**

Среди существующих методов защиты схемы испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при пробоях изоляции и полных разрядов, были выбраны быстродействующие диоды Шоттки, которые обладают следующими преимуществами: имеют меньшую электрическую ёмкость перехода, невысокую стоимость компонентов и высокую надежность компонентов.

Применение предложенного решения для схемы измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным напряжением промышленной частоты, позволяет защитить изолирующие усилители от высокочастотных импульсов.

Разработанная плата позволяет производить защиту схемы измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции

повышенным напряжением промышленной частоты от 1 до 6 кВ от непродолжительного полного пробоя.

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».

Список источников

1. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Кириллов Р.В. Выбор схемы ВИУ для работы в резонансном режиме // Сб. науч. тр. I Междунар. науч.-техн. конф. Уфа: УГНТУ, 2013. С. 209-215.

2. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Хазиева Р.Т., Стрижев Д.А. Новые схемотехнические решения резонансной высоковольтной испытательной установки // Инновационные направления развития электропривода, электротехнологий и

электрооборудования: межвуз. сб. науч. тр. Уфа: УГНТУ, 2012. С. 178-183.

3. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В. Оценка влияния параметров изоляции высоковольтного оборудования на режимы работы испытательной установки // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». 2015. № 2. www.science-education.ru/122-20794 — 07.08.2015.

4. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В. Математическое моделирование резонансных режимов испытательной установки // Вести высших учебных заведений Черноморья. 2015. № 3. С. 51-55.

5. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Конев А.А. Исследование режимов работы дросселя резонансной испытательной установки // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12. № 3. С. 5-10.

6. Пат. 132213 РФ, МПК G 01 R. Компактная испытательная установка для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением / С.Г. Конесев, А.В. Мухаметшин. № 2013108529; заявл. 10.09.13. Бюл. № 25.

7. Пат. 2662952 РФ, МПК G 01 R. Установка для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением / С.Г. Конесев, А.В. Мухаметшин, А.А. Конев, И.З. Гайнутдинов. № 2017130067; заявл. 24.08.17. Бюл. № 22.

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

9. Пат. 156457 РФ, МПК G 01 R. Установка для испытания средств защиты / А.В. Мухаметшин, Е.В. Мухаметшин. № 201524718; заявл. 23.06.15. Бюл. № 31.

10. Хазиева Р.Т., Мухаметшин А.В., Горшенин А.И. Исследование и разработка схемы измерения переменного тока при испытании изоляции // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2020. № 4, Т. 16. С. 46-55.

11. Christian L.A. Accurate High Direct Current Measurements for Industry // 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018). doi: 10.1109/CPEM.2018.8500933.

12. Gert Rietveld, Jan H.N. van der Beek, Ernest Houtzager. Accurate DC Current Ratio Measurements for Primary Currents up to 600 A // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2015. Vol. 64. Issue 11. doi: 10.1109/TIM.2015.2434096.

13. Kuerten Ihlenfeld W.G., Vasconcellos R.T.B. Current Divider Based Impedance Comparator // Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018). 2018. doi: 10.1109/CPEM.2018.8501083.

14. Zhou Liren, Pan Yang, Zhu Li. Sensitivity and Drift Value Measurement of DC Current Comparator // 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). 2019. doi: 10.1109/ICEMI46757.2019.9101759.

15. Charles J. Burroughs, Alain Rüfenacht, Stefan Cular, Paul D. Dresselhaus. Automated Leakage Current Measurement Capability for Programmable Josephson Voltage Standards // Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM). 2020. doi: 10.1109/CPEM49742.2020.9191831.

16. Xiaojiao Chen, Liansheng Huang, Peng Fu, Ge Gao, Zhiquan Song, Liuwei Xu, Shiyong He, Xiuqing Zhang. Overview of CASHIPS High-Power Electrical Equipment Test Facility // IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC). 2018. doi: 10.1109/SPEC.2018.8635843.

17. Yuan Sun, Yanfei Ru, Xuefeng He, Chen Dong. Research on Testing System and Test Method for Charging Facilities of Electric Vehicles // 5th IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems (CCIS). 2018. doi: 10.1109/CCIS.2018.8691342.

18. Xiaojiao Chen, Liansheng Huang, Peng Fu, Xiuqing Zhang, Ge Gao, Liuwei Xu, Shiyong He. High Power Test Facility 500 kA Pulse Current Sharing Control // IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). 2018. doi: 10.1109/PEAC.2018.8590464.

19. Du Q., Liu C., Ding K., Lu K., Long Y., Liu C., Han Q., Wang J., Song Y., Niu E., Bauer P. Test Facility and Results of ITER PF4 Current Leads // IEEE Transactions on Plasma Science. 2019. Vol. 48. Issue 6. doi: 10.1109/TPS.2019.2963082.

20. Albani M., Puggelli F., Toccafondi A., Meniconi G., Scortecci F. Development and Application of Iterative PO to the Characterization of EMI/EMC Ground Test Facility for Electric Propulsion Thrusters // IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. 2018. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608573.

References

1. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Kirillov R.V. Vybor skhemy VIU dlya raboty v rezonansnom rezhime [The Choice of the VIA Circuit for Operation in the Resonant Mode]. *Sbornik nauchnykh trudov I Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Collection of Scientific Works of I International Scientific and Technical Conference]. Ufa, UGNTU, 2013, pp. 209-215. [in Russian].

2. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Khazieva R.T., Strizhev D.A. Novye skhemotekhnicheskie resheniya rezonansnoi vysokovol'tnoi ispytatel'noi ustanovki [New Circuit Solutions of The Resonant High-Voltage Test Facility]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Innovatsionnye napravleniya razvitiya elektroprivoda, elektrotekhnologii i elektrooborudovaniya»* [Interuniversity Collection of Scientific Papers «Innovative Directions of Development of Electric Drive, Electrical Technologies and Electrical Equipment»]. Ufa, UGNTU, 2012, pp. 178-183. [in Russian].

3. Konesev S.G., Mukhametshin A.V. Otsenka vliyaniya parametrov izolyatsii vysokovol'tnogo oborudovaniya na rezhimy raboty ispytatel'noi ustanovki [Assessment of the Influence of Insulation Parameters of High-Voltage Equipment on the Operating Modes of the Test Facility]. *Elektronnyi*

nauchnyi zhurnal «Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya» — Electronic Scientific Journal «Modern Problems of Science and Education», 2015, No. 2. www.science-education.ru/122-20794 — 07.08.2015. [in Russian].

4. Konesev S.G., Mukhametshin A.V. Matematicheskoe modelirovanie rezonansnykh rezhimov ispytatel'noi ustanovki [Mathematical Modeling of Resonance Modes of the Test Setup]. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya — News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region*, 2015, No. 3, pp. 51-55. [in Russian].

5. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Konev A.A. Issledovanie rezhimov raboty drosselya rezonansnoi ispytatel'noi ustanovki [Modelling Modes Inductor Resonance Test Set]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2016, Vol. 12, No. 3, pp. 5-10. [in Russian].

6. Konesev S.G., Mukhametshin A.V. Kompaktnaya ispytatel'naya ustanovka dlya ispytaniya izolyatsii elektrooborudovaniya povyshennym napryazheniem [Compact Test Setup for Testing Insulation of Electrical Equipment with Increased Voltage]. Patent 132213 RF, 2013. [in Russian].

7. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Konev A.A., Gainutdinov I.Z. Ustanovka dlya ispytaniya izolyatsii elektrooborudovaniya povyshennym napryazheniem [Installation for Testing Insulation of Electrical Equipment with Increased Voltage]. Patent 2662952 RF, 2017. [in Russian].

8. Konesev S.G., Khazieva R.T. Analiz stabilizatsionnykh svoystv induktivno-emkostnykh preobrazovatelei pri razlichnykh sposobakh podklyucheniya gibridnykh elektromagnitnykh elementov [Stabilization Properties of Inductive-Capacitive Converters with Different Connection Methods of Hybrid Electromagnetic Elements]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i*

sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems, 2017, No. 1 (34), pp. 49-55. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55. [in Russian].

9. Mukhametshin A.V., Mukhametshin E.V. *Ustanovka dlya ispytaniya sredstv zashchity* [Installation for Testing Protection Means]. Patent 156457 RF, 2015. [in Russian].

10. Khazieva R.T., Mukhametshin A.V., Gorshenin A.I. Issledovanie i razrabotka skhemy izmereniya peremennogo toka pri ispytanii izolyatsii [Research and Development of the Accurate Measurement Scheme for Insulation Tests]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2020, No. 4, Vol. 16, pp. 46-55. [in Russian].

11. Christian L.A. Accurate High Direct Current Measurements for Industry. *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*. doi: 10.1109/CPEM.2018.8500933.

12. Gert Rietveld, Jan H.N. van der Beek, Ernest Houtzager. Accurate DC Current Ratio Measurements for Primary Currents up to 600 A. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, Vol. 64, Issue 11. doi: 10.1109/TIM.2015.2434096.

13. Kuerten Ihlenfeld W.G., Vasconcellos R.T.B. Current Divider Based Impedance Comparator. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, 2018. doi: 10.1109/CPEM.2018.8501083.

14. Zhou Liren, Pan Yang, Zhu Li. Sensitivity and Drift Value Measurement of DC Current Comparator. *14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*. 2019. doi: 10.1109/ICEMI46757.2019.9101759.

15. Charles J. Burroughs, Alain Rüfenacht, Stefan Cular, Paul D. Dresselhaus.

Automated Leakage Current Measurement Capability for Programmable Josephson Voltage Standards. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*. 2020. doi: 10.1109/CPEM49742.2020.9191831.

16. Xiaojiao Chen, Liansheng Huang, Peng Fu, Ge Gao, Zhiquan Song, Liuwei Xu, Shiyong He, Xiuqing Zhang. Overview of CASHIPS High-Power Electrical Equipment Test Facility. *IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC)*. 2018. doi: 10.1109/SPEC.2018.8635843.

17. Yuan Sun, Yanfei Ru, Xuefeng He, Chen Dong. Research on Testing System and Test Method for Charging Facilities of Electric Vehicles. *5th IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems (CCIS)*. 2018. doi: 10.1109/CCIS.2018.8691342.

18. Xiaojiao Chen, Liansheng Huang, Peng Fu, Xiuqing Zhang, Ge Gao, Liuwei Xu, Shiyong He. High Power Test Facility 500 kA Pulse Current Sharing Control. *IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*. 2018. doi: 10.1109/PEAC.2018.8590464.

19. Du Q., Liu C., Ding K., Lu K., Long Y., Liu C., Han Q., Wang J., Song Y., Niu E., Bauer P. Test Facility and Results of ITER PF4 Current Leads. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2019. Vol. 48. Issue 6. doi: 10.1109/TPS.2019.2963082.

20. Albani M., Puggelli F., Toccafondi A., Meniconi G., Scortecci F. Development and Application of Iterative PO to the Characterization of EMI/EMC Ground Test Facility for Electric Propulsion Thrusters. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*. 2018. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608573.



Рузил Ахнафович Сафиуллин
Ruzil A. Safiullin

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технических дисциплин, Башкирский государственный университет, филиал, Нефтекамск, Россия



Ильгиз Флюсович Янгиров
Ilgiz F. Yangirov

доктор технических наук, доцент кафедры электромеханики, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

УДК 531.768

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-41-54

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Актуальность

В наши дни вибродиагностика является одним из эффективных инструментов для решения широкого круга задач обнаружения дефектов электрических машин, предотвращения выхода из строя деталей, продления срока службы и увеличения межремонтных периодов их эксплуатации. Одновременно протекающие электромагнитные и механические процессы во время работы существенно усложняют сбор и анализ параметров вибрации из-за присутствия большого числа гармонических и случайных составляющих в сигнале экспериментальных данных. Для разработки эффективной системы вибродиагностики необходимо создать многофункциональные системы вибрационной диагностики повреждений электрических машин. Сохранение электробезопасности, надежности и долговечности эксплуатации электромеханического оборудования электроприводов на базе асинхронных двигателей в производственных процессах предприятий отраслей промышленности остаются актуальными задачами электротехнических систем.

Цель исследования

Провести теоретические расчеты по исследованию параметров вибрации асинхронных электродвигателей и сопоставить их с экспериментальными данными.

Методы исследования

В работе использованы методы функциональной диагностики по обработке и анализу вибрационных параметров технического состояния электродвигателя.

Результаты

Представлены результаты разработки параметров и применения программно-аппаратного комплекса для анализа сигналов вибрационной диагностики асинхронного двигателя, которая учитывает перемещения ротора относительно статора. Проведены теоретические расчеты, описывающие зависимость изменения токов статора от наличия дефектов в асинхронных электродвигателях. Зависимость позволяет провести моделирование сигналов датчиков вибрации в режиме реального времени и получить

вибрационные новые показатели на основе экспериментальных данных. По результатам измерений статистических данных токов статора были получены кривые вибро-смещений в режимах холостого хода и выбега ротора во времени. Исследована зависимость развития дефектов от характера короткого замыкания витков обмотки статора. Результаты экспериментального исследования модели получены с использованием физического стенда на базе асинхронного многоскоростного двухобмоточного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 1,7 кВт.

Ключевые слова: вибрация, асинхронный двигатель, короткое замыкание витков статора, экспериментальные исследования

INVESTIGATION OF INDUCTION ELECTROMOTOR VIBRATION

Relevance

Nowadays, vibration diagnostics is one of the most effective tools for solving a wide range of problems of detecting defects in electrical machines, preventing the failure of parts, extending the service life and increasing the repair periods in their operation. Simultaneously occurring electromagnetic and mechanical processes during their operation significantly complicate the collection and analysis of vibration parameters due to the presence of a large number of harmonic and random components in the experimental data signal. To develop an effective vibration diagnostics system, it is necessary to create multifunctional vibration diagnostics systems for damage to electric machines. The preservation of electrical safety, reliability and durability of operation of electromechanical equipment of electric drives based on induction motors in the production processes of industrial enterprises remains an urgent task of electrical systems.

Aim of research

To carry out theoretical calculations on the study of vibration parameters of induction electric motors and compare them with experimental data.

Research methods

The paper uses methods of functional diagnostics for processing and analyzing the vibration parameters of the technical condition of the electric motor.

Results

The results of the development of parameters and the application of a software and hardware complex for analyzing the signals of vibration diagnostics of an induction motor, which takes into account the movements of the rotor relative to the stator, are presented. Theoretical calculations describing the dependence of changes in stator currents on the presence of defects in induction electric motors are carried out. It allows you to simulate the signals of vibration sensors in real time and get new vibration indicators based on experimental data. According to the results of measurements of statistical data of stator currents, curves of vibration displacements in the idle and run-out modes of the rotor in time were obtained. The dependence of the development of defects on the nature of the short circuit of the stator winding turns is investigated. The results of the experimental study of the model were obtained using a physical stand based on an induction multi-speed two-winding motor with a closed-loop rotor with a power of 1.7 kW.

Keywords: vibration, induction motor, short circuit of stator turns, experimental studies

Введение

На сегодняшний день нет ни одной сферы жизнедеятельности людей, где бы ни применялись электрические машины — от отраслей промышленности,

сельского хозяйства и бытовых условий.

Как известно, при эксплуатации электрической машины происходит преобразование электрической энергии в механическую, т.е. совершение полезной работы.

Например, электродвигатели применяются в бытовой технике (маломощные синхронные и асинхронные двигатели), в промышленности (турбогенераторы, станки и оборудование, автоматика, краны и лебедки общепромышленного значения, телемеханика), в сельском хозяйстве (машинотракторные электроагрегаты, дизельные генераторы и маломощные электростанции) и т.д. [1–3].

Наибольшее распространение получили трехфазные асинхронные электродвигатели, отличающиеся простотой эксплуатации, надежностью, удачными массогабаритными размерами. Электродвигатели этой серии с короткозамкнутым ротором используются в электроприводах разных станков (металлообрабатывающих, грузоподъемных, ткацких, деревообрабатывающих), в вентиляторах, землеройных машинах, в лифтах, насосах, бытовых приборах и т.д. Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором позволяет значительно снизить энергопотребление оборудованием, которое он питает, обеспечить высокий уровень его надежности, увеличить срок службы. Совокупность этих электромеханических характеристик положительно отражается на модернизации всех технологических процессов производства предприятия.

В настоящее время главными потребителями электрической энергии в различных отраслях промышленности, ЖКХ, сельском хозяйстве экономики страны являются устройства электропривода, в основе которых используются электрические машины — электродвигатели постоянного или переменного токов [2].

Асинхронные двигатели (АД) — это электрические машины, которые работают на больших скоростях вращения и применяются в системах энергосберегающего электропривода благодаря частотному управлению. Данный тип двигателей с короткозамкнутым ротором, которые управляются от преобразователя

частоты с частотой напряжения питания до 400 Гц, имеют скорости вращения до 30000 об/мин и выше. Во вращающихся электрических машинах происходит интенсивное электромеханическое преобразование энергии, а также при таких скоростях возникают значительные вибрации и шумы, как при пуске, так и при их эксплуатации. Высокий уровень вибраций приводит к разрушению подшипников качения за короткий срок, а интенсивность шума достигает критического уровня для человека [3].

Отсюда следует, что обеспечение нормальной эксплуатации асинхронных двигателей является важной научно-практической задачей, так как сфера их эксплуатации в производственных процессах гораздо шире по сравнению с другими электрическими машинами. Поэтому создание системы производственной безопасности актуализует необходимость выбора эффективной системы диагностики их дефектов и повреждений.

Современные методы, средства и информационные технологии диагностики и мониторинга асинхронных двигателей имеют ряд недостатков вследствие ограниченности используемых приемов и алгоритмов, устарелости стандартных технологий.

В данном контексте не подлежит сомнению тот факт, что актуальной является необходимость усовершенствования и развития существующих, а также разработка новых методов мониторинга и диагностики асинхронных двигателей.

Целью исследований является *получение параметров, обеспечивающих высокое быстроедействие и качество их обработки для обоснования своевременных и достоверных результатов*. В связи с этим особую значимость приобретает мониторинг текущего состояния асинхронных электродвигателей путем использования передовых информационных технологий в целях предупреждения аварийного

состояния и их полного выхода из строя. Анализ литературных источников показывает, что на сегодняшний день практически отсутствуют эффективные научные подходы в этом направлении [4, 5].

По мнению авторов, определяющим фактором эффективного функционирования систем диагностики является установление взаимно однозначного соответствия между параметрами диагностических признаков, определяемых по результатам текущих измерений характеристик машины, и видом возникших дефектов. Таковыми могут быть ошибки конструирования, нарушения технологического процесса производства, технического обслуживания и ремонта электрических машин, а также интенсивная безремонтная эксплуатация в производственных процессах, все это приводит к возникновению дефектов различного рода.

В системах вибрационной диагностики параметрами, которые анализируются, являются суммарный уровень и спектральные характеристики вибраций электрической машины. Учитывая большое разнообразие электрических машин и огромное количество возможных вариантов их повреждений, проблема установления такого соответствия является сложной теоретической и практической задачей. Ее невозможно решить только путем накопления и анализа экспериментальных данных, а также обобщения существующего опыта их эксплуатации в производстве. Поэтому для решения проблемы надёжной эксплуатации АД в производстве необходимо внедрять различные способы и средства контроля состояния электрооборудования [4–7].

Задача исследования и ее решение

Согласно поставленной задаче, для построения системы вибрационной диагностики асинхронных двигателей необходимо использование результатов математического моделирования, полученных

на адекватных моделях, которые позволяют определить параметры вибрации электрической машины при различных возможных вариантах ее повреждения (небаланс ротора, короткое замыкание (КЗ), дефекты подшипников и т.д.). Соответственно, разработка таких моделей является важной составляющей создания систем диагностики дефектов и повреждений машин, что и обуславливает выбор темы данной статьи, а также подтверждает ее актуальность, теоретическую и практическую значимость.

На сегодняшний день существуют государственные и международные стандарты электрических вращающихся машин, посвященные вопросам безопасной их эксплуатации и циклограммам технического обслуживания и проведения ремонтных работ [8–10]. Несмотря на это вопросам совершенствования методов определения их качества, поиску критериев, которые наиболее широко описывают состояние электродвигателя, и разработке способов их диагностики уделяется большое внимание учеными и инженерами сообществами всего мира. Наиболее известными отечественными авторами в данной области являются Д.В. Полковниченко, Л.Г. Сидельникова, Д.О. Афанасьев, О.М. Большунова, А.М. Камышьян, Н.П. Воробьева, Г.В. Суханкина, Н.Т. Герцен и др. [3–7].

Из систематизации работ вышеперечисленных авторов следует, что к основным дефектам электромагнитной системы асинхронного электродвигателя, обнаруживаемым по вибрации, относятся:

- динамический (вращающийся) эксцентриситет воздушного зазора;
- статический эксцентриситет воздушного зазора;
- электрические дефекты (обрывы в беличьей клетке, КЗ в активном железе ротора);
- электрические дефекты (КЗ в обмотках и активном железе статора).

К внешним дефектам (источников питания электродвигателей), обнаруживаемым по вибрации, можно отнести:

- несимметрия питания машин переменного тока;
- искажения формы напряжения машин постоянного и переменного токов.

При решении данной проблемы американскими исследователями разработана модель на основе системы обнаружения неисправностей электродвигателя, которая представлена в патенте [11]. Преимуществом этого изобретения является то, что способ и система данного диагностирования неисправностей основаны на программном обеспечении и используют данные, полученные благодаря неинтрузивным измерениям и контролю.

Китайскими учеными Cheng Jiatang, Xiong Yan [12], L.H. Wang [13] разработана модель диагностики технического

состояния асинхронного двигателя с использованием нейросетевых технологий. Показана возможность выборочного контроля диагностических частот при использовании вейвлет-анализа.

Однако несмотря на большое количество исследований и их интенсификацию в последнее время, на сегодняшний день существует потребность детального анализа вибропроцессов для определения технического состояния асинхронных двигателей с использованием методов математического моделирования, что и обуславливает целевую направленность статьи.

Основные источники вибрации электромагнитного, механического и аэродинамического происхождения асинхронного электродвигателя представлены в таблице 1. В вибрационном сигнале содержится вся необходимая информация об изменении всех компонентов, опреде-

Таблица 1. Причины и источники вибрации АД

Table 1. Causes and sources of IM vibration

Магнитные источники	Механические источники	Аэродинамические источники
<ol style="list-style-type: none"> 1. Высшие гармонические поля 2. Зубцовые поля 3. Обмоточные поля 4. Неравномерность распределения обмотки в пазах 5. Нестабильность напряжения питания 6. Несимметричность напряжения питания 7. Неравномерность воздушного зазора 8. Отклонение поверхности статора и ротора от правильной геометрической формы 9. Динамические режимы эксплуатации 10. Магнитострикция 11. Магнитные силы 12. Собственные колебания магнитопровода 13. Разрушение магнитопровода 14. Динамический режим эксплуатации механических напряжений 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ротор с дисбалансом 2. Геометрические ошибки вала 3. Прогиб вала 4. Тепловая деформация при нагреве 5. Асимметрия конструкции машин 6. Предварительное натяжение подшипников в узлах 7. Несоосность — перекося посадочных мест 8. Отклонение форм внешнего и внутреннего колец 9. Разноразмерность шариков 10. Геометрические ошибки размеров посадок подшипников на вал и в корпус 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вентилятор 2. Ротор, который вращается в воздушной среде

ляющих техническое состояние электродвигателя в реальном времени на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации [14, 15].

Математическая модель и основные уравнения

В рамках проводимого исследования рассмотрим детерминированную математическую модель вибрации электромагнитного происхождения, которая базируется на положениях теории электромагнитного поля.

Математические модели электромагнитного поля в асинхронных двигателях рассмотрены в работах многих ученых [1–3, 12–14]. Но в большинстве таких моделей используется предположение об условной неподвижности ротора, которое позволяет провести вибрационный анализ на основе неизменной геометрии расчетной области, что упрощает численную реализацию моделей, и поэтому на сегодня они широко применяются при решении такого типа задач.

Представленная в этой статье модель отличается тем, что в ней в режиме реального времени учитывается изменение геометрии расчетной области в результате перемещения ротора относительно статора. Это позволяет провести моделирование сигналов датчиков вибрации во времени и получить ряд новых результатов.

Основу разрабатываемой математической модели составляет уравнение электромагнитного поля в активной зоне асинхронного двигателя [15–17]. Рассматриваемые процессы являются устойчивыми. Предположим, что все полевые функции изменяются во времени согласно гармоническому закону. Для двумерных полей в поперечном сечении АД уравнение электромагнитного поля относительно комплексной амплитуды единой осевой составляющей векторного маг-

нитного потенциала \dot{A}_z в статорной системе координат имеет следующий вид:

$$\Delta \dot{A}_z - j\omega\mu\gamma \dot{A}_z + \mu\gamma\omega_R(R \times \text{rot} \dot{A}_z) = -\mu j_{zi},$$

где ω — угловая частота изменения во времени векторного магнитного потенциала, рад/с;

ω_R — угловая скорость вращения ротора, рад/с;

μ — магнитная проницаемость, Гн/м;

γ — электропроводность, См;

j_{zi} — плотность сторонних токов (плотность токов в пазах статора, согласно схеме обмотки статора), А/м²;

R — радиус-вектор произвольной точки ротора, м.

Для такой задачи целесообразно использовать роторную систему координат, в которой уравнение принимает более простой вид:

$$\Delta \dot{A}_z - j\omega_1 s \mu \gamma \dot{A}_z = -\mu j_{zi},$$

где $s = (n_1 - n)/n_1$ — скольжение АД, о.е. или %;

$n_1 = 60 \times f/p$ — скорость вращения ротора АД, об/мин;

n_1 — скорость циклического изменения магнитного потока статора, об/мин;

f — частота сети переменного тока, Гц;

p — число пар полюсов обмотки статора или число пар катушек на фазу.

Целесообразность использования роторной системы координат обусловлена тем, что вихревые электромагнитные токи возникают только в элементах массивного ротора, а все элементы конструкции статора асинхронного двигателя можно считать неэлектропроводными (магнитопровод статора — шихтованный, в пазах статора задаются только сторонние токи) [18–20].

Источниками электромагнитного поля являются плотности сторонних токов трех фаз обмоток статора:

$$j_{Ai} = \frac{I_m u_{\Pi}}{S_{\Pi}};$$

$$j_{Bi} = \frac{I_m u_{\Pi} \left[\cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) - j \sin\left(-\frac{2\pi}{3}\right) \right]}{S_{\Pi}};$$

$$j_{Ci} = \frac{I_m u_{\Pi} \left[\cos\left(-\frac{4\pi}{3}\right) - j \sin\left(-\frac{4\pi}{3}\right) \right]}{S_{\Pi}},$$

где I_m — амплитуда тока в фазе обмотки статора, А;

u_{Π} — число последовательно соединенных проводников в пазах статора;

S_{Π} — площадь сечения паза статора, м².

Вышеприведенные уравнения дополняются однородными граничными условиями первого рода $A_z|G = 0$ на линии G внешней поверхности яра статора, которые ограничивают расчетную область. Величина μ в каждой точке расчетной области, где находятся ферромагнитные материалы, определяется по соответствующим кривым намагничивания.

Составляющие вектора магнитной индукции в декартовой системе координат определяются следующим образом:

$$\dot{B}_x = \frac{\partial \dot{A}_z}{\partial y \dot{B}_y} = -\frac{\partial \dot{A}_z}{\partial x}.$$

По известным проекциям \dot{B}_x , \dot{B}_y на внутренней поверхности статора легко найти составляющие вектора магнитной индукции: \dot{B}_n — нормальную (направленную вдоль вектора нормали к поверхности в заданной точке с координатами x, y) и \dot{B}_τ — тангенциальную (направленную вдоль касательной к поверхности в этой же точке) проекции вектора магнитной индукции:

$$\dot{B}_n = \frac{(y\dot{B}_y + x\dot{B}_x)}{R_{\delta}}; \quad \dot{B}_\tau = \frac{(y\dot{B}_x - x\dot{B}_y)}{R_{\delta}},$$

где $\dot{\vec{B}}$ — комплексный вектор магнитной индукции, Тл;

R_{δ} — радиус расточки статора, м.

Плотность вибровозмущающих сил пропорциональна тензору магнитного натяжения, который имеет физическую размерность давления (Н/м²).

Модули нормальной и тангенциальной составляющих тензора магнитного натяжения выражаются в виде:

$$T_n = \left| \frac{1}{2\mu} \cdot (\dot{B}_n^2 - \dot{B}_\tau^2) \right|, \quad T_\tau = \left| \frac{\dot{B}_n^2 \cdot \dot{B}_\tau^2}{\mu} \right|.$$

В дальнейшем рассматриваются радиальные вибрации, которые происходят за счет действия нормальной составляющей тензора магнитного натяжения. Вибрации исследовались в заданной точке на коронке зубца статора, которая соответствует месту условного размещения датчика вибрации.

Для экспериментального исследования предложенной модели использовался физический стенд на базе асинхронного многоскоростного двухобмоточного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 1,7 кВт, на котором моделировались дефекты [17]. Многочисленные эксперименты в режимах холостого хода и на выбеге ротора проводились для условно бездефектного состояния и при моделировании наличия дефектов.

Интервал времени, на котором осуществлялся анализ сигнала, соответствует одному периоду процесса — одному полному обороту ротора АД. При номинальном скольжении $s = 0,044$ о.е. расчетный интервал времени равен $T = 0...0,0418$ с. Количество расчетных шагов составляло $N = 360$, то есть за один шаг по времени $\Delta t = T/N = 1,16 \cdot 10^{-4}$ с ротор поворачивался на угол 1° , что удовлетворяет условиям точности.

Таким образом, полный расчет процесса на одном обороте ротора содержит в себе N расчетов поля при различных положениях вращающегося ротора [18].

Экспериментальные исследования

Две виброизмерительные пьезоэлектрические преобразователи (датчики вибраций) типа ДН-3-М1 были закреплены на корпусе в точках измерения.

Датчики имеют рабочий диапазон частот 5–4800 Гц и превращают механические колебания корпуса датчика в электрические сигналы, пропорциональные его ускорению. Принцип действия датчиков вибрации основан на пьезоэлектрическом эффекте [16–18].

На рисунке 1 представлена общая картина протекания вибрационных процессов для условно бездефектного состояния АД в режимах холостого хода (при 750 об/мин) и выбега ротора. Здесь кривые 1, 2 — это зависимости, которые построены по статистическим данным за время вибросмещений в режимах холостого хода и выбега ротора.

Далее в процессе эксперимента рассматривались:

— вертикальная составляющая амплитуды вибрации в режиме выбега ротора (мкм, мм/с) (A_{xx});

— вертикальная составляющая амплитуды вибрации при нагрузке или холостом ходу (мкм, мм/с) (A_R),

— а также учитывалось предельное значение амплитуды вибрации, выше которого эксплуатация асинхронного двигателя не допускается (A_{lim}).

Эти показатели в совокупности позволяют рассчитать диагностический параметр, который характеризует наличие дефектов в статоре, что соответствует значению критериальной функции при определенном состоянии АД:

$$D = \frac{A_{xx}}{A_R} \left(\frac{A_{lim} - A_{lim}}{A_R} \right).$$

В режиме выбега ротора вертикальная составляющая вибросмещений выбиралась в пределах 500–400 об/мин, что составляло 60–70 % от номинальной нагрузки, когда электромагнитное поле уже не влияло на вибропроцессы.

В эксперименте также моделировались дефекты, возникающие при замыкании разного количества витков, рассматривалась степень их накоплений, возникающих в обмотке статора АД. Были рассмотрены три варианта: замыкание 9, 22, 32 витков, при общем количестве витков в фазе 702.

На рисунке 2 изображены графики зависимостей по времени вибросмещений при витковом замыкании обмотки статора. Обозначение кривых 1, 2 на всех рисунках одни и те же.

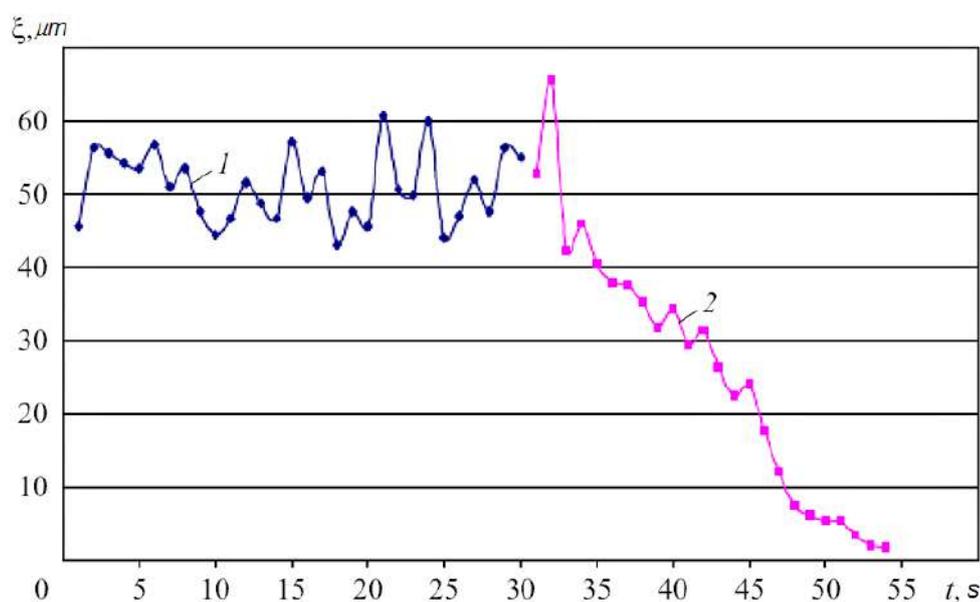


Рисунок 1. Вибрационные процессы в условно-бездефектном состоянии АД

Figure 1. Vibration processes in the conditionally defect-free state of an induction motor

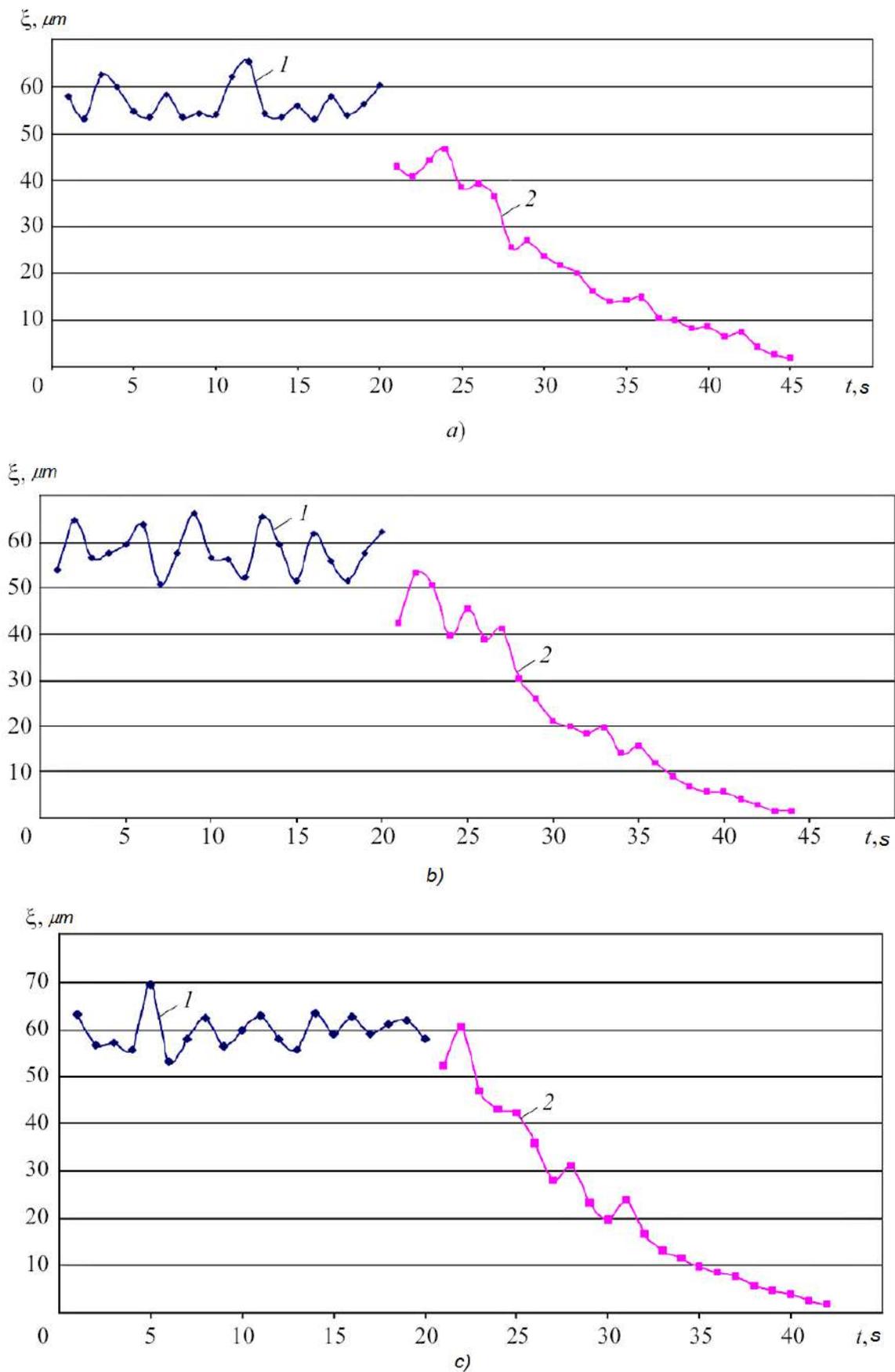


Рисунок 2. Графики зависимостей по времени вибросмещений при витковом замыкании обмотки статора

Figure 2. Graphs of time dependencies of vibration displacements during the winding closure of the stator winding

В первом варианте при замыкании девяти витков значение диагностического параметра D равно 0,59 (рисунок 2, *a*), во втором — при замыкании 22 витков D было около 0,53 (рисунок 2, *b*), а в третьем — при замыкании 32 витков D уже равнялось 0,41 (рисунок 2, *c*). Необходимо отметить, что в последнем случае обмотка нагревалась до недопустимой температуры, что свидетельствовало о том, что работу электродвигателя необходимо останавливать.

Таким образом, для условно бездефектного асинхронного двигателя значение параметра D равно в среднем 1, а при различном количестве замыканий витков в обмотке статора исследуемый параметр находился в пределах 0,41–0,59. Отсюда можно сделать вывод о том, что значение диагностического параметра D меняется в зависимости от степени накопления дефектов в пределах от 4 % до 59 %.

На следующем этапе эксперимента была проведена серия испытаний при различных токах нагрузки обмотки статора, в которых измерялись вибрации АД. В таблице 2 представлены результаты экспериментальных испытаний.

В таблице 2 введены следующие обозначения:

I_l — ток нагрузки, А;

s — экспериментально найденное скольжение ротора, о.е.;

a — экспериментально определенное среднеквадратическое виброускорение, мм/с²;

v — виброскорость, мм/с;

m_e — эквивалентная приведенная масса, кг.

Из полученных экспериментальных данных таблицы 2 видно, что при увеличении тока нагрузки обмотки статора вибрация АД уменьшается. Это объясняется уменьшением магнитного потока (индукции) в зазоре двигателя вследствие увеличения падения напряжения на электрических опорах обмотки статора при увеличении тока. Приведенные данные также показывают, что при изменении тока статора на 53 % эквивалентная приведенная масса меняется всего на 2,1 %, поэтому данную величину можно использовать как обобщенный параметр АД.

Амплитуда сигнала собственных механических колебаний при приближении к номинальной скорости вращения ротора АД равна ~ 20 мм/с², что составляет 15–20 % от амплитуды сигнала электромагнитных колебаний. В режиме номинальной нагрузки АД средняя амплитуда сигнала электромагнитных колебаний первого датчика, который размещен в горизонтальной плоскости (сбоку), составила 130 мм/с², а второго, расположенного в вертикальной плоскости (сверху), составила 110 мм/с². На рисунке 3 показано распределение экспериментального (рисунок 3, *a*) и смоделированного (рисунок 3, *b*) сигналов первого вибродатчика за время одного поворота ротора.

Каждый сигнал, отраженный в терминах виброускорения, содержит по четыре

Таблица 2. Результаты испытаний АД при различных токах нагрузки статора

Table 2. Test results of an induction motor at different stator load currents

№ п/п	I_l, A	$s, r.u.$	$a, mm/s^2$	$v, mm/s$	m_e, kg
1	8,4	0,04	78,7	0,652	36530
2	9,7	0,052	74,1	0,617	36100
3	11,1	0,066	68,6	0,568	36050
4	12,9	0,079	67,4	0,557	35760

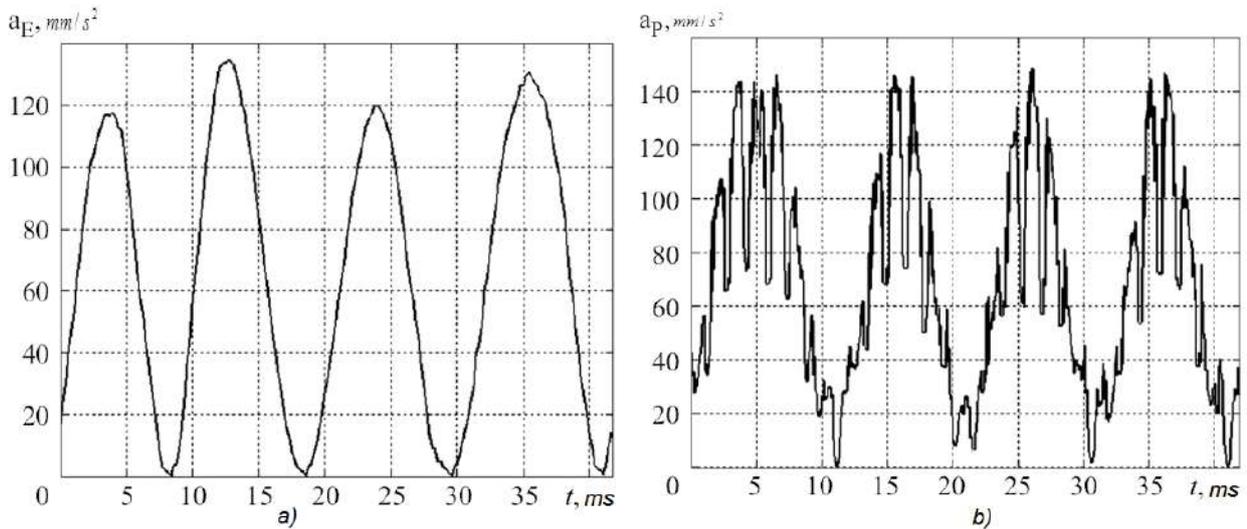


Рисунок 3. Распределение экспериментального и смоделированного сигналов первого вибродатчика за время одного поворота ротора

Figure 3. Distribution of experimental and simulated signals of the first vibration sensor during one rotation of the rotor

амплитуды колебаний, что отражает основную частоту электромагнитных вибраций 100 Гц. Полученные числовые значения амплитуд расчетного и экспериментального сигналов близки между собой, что в целом подтверждает достоверность предложенной модели.

Достоинства разработанной модели и ее преимущества по сравнению с уже имеющимися моделями выявлены в процессе сравнения спектрограмм.

Так, полученная в процессе эксперимента постоянная составляющая и гармоника частотой 100 Гц является больше, чем в расчетном сигнале. Однако разница равна соответственно 1 % и 5 %, что является допустимым.

Выводы

При витковых замыканиях обмоток статора АД вибрации на обоях подшипников ротора растут, при этом на выбеге ротора они более стремительно снижаются, чем для случая условно бездефектных машин.

Предложенный в статье диагностический параметр D более чувствителен к витковым замыканиям, а также к значениям вибросмещения. Используя предложенный диагностический параметр, можно построить критерий предельного накопления дефектов и прогнозировать техническое состояние АД по совокупности накопленных дефектов и вовремя его ремонтировать, не допуская существенных повреждений узлов машины и аварийных ситуаций.

Результаты проведенного эксперимента на стенде подтвердили адекватность разработанной математической модели и могут быть использованы при диагностике других электрических машин [19, 20]. В дальнейшем данная модель может быть использована при создании многофункциональных систем вибрационной диагностики повреждений электрических машин.

Список источников

1. Архипцев Ю.Ф., Котеленец Н.Ф. Асинхронные электродвигатели. М.: Энергоатомиздат, 1986. 112 с.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. М.-СПб.: Питер, 2006. Т. 1: 319 с.; Т. 2: 346 с.
3. Subrahmanyam V. Electric Drives. Concepts and Applications. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2011. 752 p.
4. Баркова Н.А., Дорошев Ю.С. Неразрушающий контроль технического состояния горных машин и оборудования: учеб. пособие. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. 157 с.
5. Lubin T., Mezani S., Rezzoug A. Analytic Calculation of Eddy Currents in the Slots of Electrical Machines: Application to Cage Rotor Induction Motors // IEEE Transactions on Magnetics. November, 2011. 47 (11). P. 4650-4659. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2157167.
6. Сафиуллин Р.А. Устойчивость композитного ротора электрической машины на подшипниках скольжения // Энергетика, состояние, проблемы, перспективы: тр. X Всеросс. науч.-техн. конф., 2019 г., Оренбург. Оренбург: ОГУ, 2019. С. 275-282.
7. Сафиуллин Р.А., Галеев Р.Ф., Мухаметзянов И.А. Инженерный расчёт характеристик электромеханического преобразователя с композитным вторичным элементом // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сб. тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. С. 555-561.
8. ГОСТ IEC 60034-14-2014. Машины электрические вращающиеся. Часть 14. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотами вала 56 мм и более. Измерения, оценка и пределы жесткости вибраций. М.: Стандартинформ, 2015. 16 с.
9. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машинных систем. Электросигнатурный анализ трехфазных асинхронных двигателей. М.: Стандартинформ, 2016. 29 с.
10. Standards European UNE EN 60034-14:2004/A1:2007. Rotating Electrical Machines - Part 14: Mechanical Vibration of Certain Machines with Shaft Heights 56 mm and Higher — Measurement, Evaluation and Limits of Vibration Severity (IEC 60034-14:2003/A1:2007).
11. Patent US6014598A. Model-Based Fault Detection System for Electric Motors / A. Duyar, E. Albas, O.T. Durakbasa, A.H. Serafettinoglu. 2000.
12. Cheng Jiatang, Xiong Yan. Application of Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm in Rotor Fault Diagnosis for Asynchronous Motor // Procedia Computer Science. 2018. Vol. 131. P. 1275-1281.
13. Wang L.H. Motor Fault Diagnosis Based on Short-time Fourier Transform and Convolutional Neural Network // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2017. Vol. 30, No. 6. P. 1357-1368.
14. Korobeinikov A.B., Sarvarov A.S. Analysis of Existing Methods for Diagnostics of Electric Motors and Perspectives of Their Development // Electrical Systems and Complexes. 2020. Vol. 1 (26). P. 4-9.
15. Александров А.А., Барков А.В., Баркова Н.А., Шафранский В.А. Вибрация и вибродиагностика судового электрооборудования. Л.: Судостроение, 1986. 273 с.
16. Гордеев О.Я., Захаренко В.А. Диагностика электромеханического оборудования по параметрам потребляемой электроэнергии // Журнал Физики: серия конференций. 1546 (2020), 012014. С. 1-7.
17. Safiullin R.A., Yangirov I.F., Khalikov A.R., Ayupova A.R. Spring Drive for Defectoscope // Proceedings of the IEEE International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (2019 ICOECS), Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia, October 22-25, 2019. Ufa, 2019. P. 616-619.
18. Safiullin R.A., Yangirov I.F. Tachogenerator for processing Signals and Data from Electrical Machine // 2nd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2020), National Research University «Moscow Power Engineering Institute». Moscow, Russia, March 12-14, 2020. P. 1-5.
19. Сафиуллин Р.А. Управление движением электромеханического микропро-

бота // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2020. Т. 63. № 6. С. 57-65.

20. Баширов М.Г., Прахов И.В. Оценка поврежденности насосных агрегатов по значениям параметров гармоник токов и напряжений электропривода: монография. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013. 96 с.

References

1. Arkhiptsev Yu.F., Kotelenets N.F. *Asinkhronnye elektrodvigateli* [Asynchronous Electric Motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 112 p. [in Russian].

2. Vol'dek A.I., Popov V.V. *Elektricheskie mashiny* [Electrical Machines]. Moscow-Saint-Petersburg, Piter Publ., 2006. Vol. 1: 319 p.; Vol. 2: 346 p. [in Russian].

3. Subrahmanyam V. *Electric Drives. Concepts and Applications*. New Delhi, Tata McGraw-Hill Publ., 2011. 752 p.

4. Barkova N.A., Doroshev Yu.S. *Nerazrushayushchii kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya gornyx mashin i oborudovaniya: ucheb. posobie* [Non-Destructive Monitoring of the Technical Condition of Mining Machines and Equipment]. Vladivostok, Izd-vo DVG TU, 2009. 157 p. [in Russian].

5. Lubin T., Mezani S., Rezzoug A. Analytic Calculation of Eddy Currents in the Slots of Electrical Machines: Application to Cage Rotor Induction Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*. November, 2011. 47 (11). pp. 4650-4659. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2157167.

6. Safiullin R.A. Ustoichivost' kompozitnogo rotora elektricheskoi mashiny na podshipnikakh skol'zheniya [Stability of the Composite Rotor of an Electric Machine on Sliding Bearings]. *Trudy X Vserossiiskoi nauchnotekhnicheskoi konferentsii «Energetika: sostoyanie, problemy, perspektivy»* [Proceedings of the X All-Russian Scientific and Technical Conference «Power Engineering: State, Problems, Prospects»]. Orenburg, OGU Publ., 2019, pp. 275-282. [in Russian].

7. Safiullin R.A., Galeev R.F., Mukhametzyanov I.A. Inzhenernyi raschet kharakteristik elektromekhanicheskogo preobrazovatelya s kompozitnym vtorichnym

elementom [Engineering Calculation of the Characteristics of an Electromechanical Converter with a Composite Secondary Element]. *Sbornik trudov IX Mezhdunarodnoi nauchnotekhnicheskoi konferentsii «Energetika: upravlenie, kachestvo i effektivnost' ispol'zovaniya energoresursov»* [Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference «Energetika: Management, Quality and Efficiency of Energy Resources Use»]. Blagoveshchensk, Amurskii gos. un-t, 2019, pp. 555-561. [in Russian].

8. GOST IEC 60034-14-2014. *Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya. Chast' 14. Mekhanicheskaya vibratsiya nekotorykh vidov mashin s vysotami vala 56 mm i bolee. Izmereniya, otsenka i predely zhestkosti vibratsii* [State Standard IEC 60034-14-2014. Rotating Electrical Machines. Part 14. Mechanical Vibration of Some Types of Machines with Shaft Heights of 56 mm or More. Measurements, Evaluation and Limits of Vibration Severity]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 16 p. [in Russian].

9. GOST ISO 20958-2015. *Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashinnykh sistem. Elektrosignaturnyi analiz trekhfaznykh asinkhronnykh dvigatelei* [State Standard 20958-2015. Condition Monitoring and Diagnostics of Machine Systems. Electrosignature Analysis of Three-Phase Asynchronous Motors]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 29 p. [in Russian].

10. *Standards European UNE EN 60034-14:2004/A1:2007. Rotating Electrical Machines. Part 14: Mechanical Vibration of Certain Machines with Shaft Heights 56 mm and Higher — Measurement, Evaluation and Limits of Vibration Severity* (IEC 60034-14:2003/A1:2007).

11. Duyar A., Albas E., Durakbasa O.T., Serafettinoglu A.H. *Model-Based Fault Detection System for Electric Motors*. Patent US6014598A, 2000.

12. Cheng Jiatang, Xiong Yan. Application of Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm in Rotor Fault Diagnosis for Asynchronous Motor. *Procedia Computer Science*, 2018, Vol. 131, pp. 1275-1281.

13. Wang L.H. Motor Fault Diagnosis Based on Short-time Fourier Transform and Convolutional Neural Network. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, Vol. 30, No. 6, pp. 1357-1368.
14. Korobeinikov A.B., Sarvarov A.S. Analysis of Existing Methods for Diagnostics of Electric Motors and Perspectives of Their Development. *Electrical Systems and Complexes*, 2020, Vol.1 (26). pp.4–9.
15. Aleksandrov A.A., Barkov A.B., Barkova H.A., Shafranskii B.A. *Vibratsiya i vibrodiagnostika sudovogo elektro-oborudovaniya* [Vibration and Vibration-Based Diagnostics of the Marine Electric Equipment]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1986. 273 p. [in Russian].
16. Gordeev O.Ya., Zakharenko V.A. Diagnostika elektromekhanicheskogo oborudovaniya po parametram potrebyaemoi elektroenergii [Diagnostics of electromechanical equipment by electrical power consumption parameters]. *Zhurnal Fiziki: seriya konferentsii — Journal of Physics: Conference Series*, 1546 (2020), 012014, pp. 1-7. [in Russian].
17. Safiullin R.A., Yangirov I.F., Khalikov A.R., Ayupova A.R. Spring Drive for Defectoscope. *Proceedings of the IEEE International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (2019 ICOECS)*, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia, October 22-25, 2019. Ufa, 2019, pp. 616-619.
18. Safiullin R.A., Yangirov I.F. Tachogenerator for processing Signals and Data from Electrical Machine. *2nd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2020)*, National Research University «Moscow Power Engineering Institute». Moscow, Russia, March 12-14, 2020, pp. 1-5.
19. Safiullin R.A. Upravlenie dvizheniem elektromekhanicheskogo mikrorobota [Motion Control of an Electromechanical Microrobot]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika — Russian Electromechanics*, 2020, Vol. 63, No. 6, pp. 57-65. [in Russian].
20. Bashirov M.G., Prakhov I.V. *Otsenka povrezhdennosti nasosnykh agregatov po znacheniyam parametrov garmonik tokov i napryazhenii elektroprivoda* [Assessment of Damage to Pumping Units by the Values of the Parameters of Harmonics of Currents and Voltages of the Electric Drive]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2013. 96 p. [in Russian].



Александр Владимирович Белов
Alexandr V. Belov

*инженер по метрологии отдела
поверки средств измерений
электромагнитных величин,
ФБУ «Государственный
региональный центр стандартизации,
метрологии и испытаний
Республики Башкортостан»,
Уфа, Россия*



Борис Анатольевич Мартынов
Boris A. Martynov

*инженер научно-исследовательской
лаборатории,
ООО НИЦ «Энергодиагностика»
Уфа, Россия*



Регина Тагировна Хазиева
Regina T. Khazieva

*кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Электротехника
и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
Уфа, Россия*



Андрей Валерьевич Мухаметшин
Andrey V. Mukhametshin

*инженер кафедры «Электротехника
и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
Уфа, Россия*

УДК 621.317.311, 621.396.669

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-55-66

МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА РЕЗОНАНСНОЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Актуальность

При разработке источников испытательного напряжения на переменном токе для оценки качества изоляции высоковольтного электрооборудования стоит задача определения нормированных точностных характеристик и их соответствия требованиям нормативно-технической документации.

Цель исследования

Разработать и исследовать методику калибровки с основной приведенной погрешностью измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным напряжением промышленной частоты, не превышающей $\pm 5\%$.

Методы исследования

При решении поставленной задачи авторами предложено рассчитать и исследовать линейную, экспоненциальную и степенную функции, описывающие связь между экспериментальными данными снятия уровней квантования с аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера от тока на образцовом амперметре, используя программные модули, выполняющие обработку измерительной информации.

Результаты

В статье в ходе исследования рассчитана и выбрана наиболее оптимальная функция, описывающая связь между экспериментальными данными снятия уровней квантования с АЦП микроконтроллера от тока на образцовом амперметре, создан опытно-промышленный образец, позволяющий производить измерения испытательного тока в пределах приведенной погрешности $0,17\%$. Применение разработанной методики калибровки с основной приведенной погрешностью в заданных пределах позволит на его базе создавать ряд цифровых измерительных амперметров, позволяющих производить измерение переменного тока в диапазоне от 1 мА до 100 А . Полученные результаты могут быть использованы в технике высокого напряжения для исследования схем измерения тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты.

Ключевые слова: аттестация, измерение тока, испытание изоляции, испытательный ток, повышенное напряжение, высоковольтная испытательная установка, испытуемый объект, резонанс

CALIBRATION TECHNIQUE FOR A RESONANT AC TEST INSTALLATION

Relevance

When developing alternating current test voltage sources to assess the quality of insulation of high-voltage electrical equipment, the task is to determine the standardized accuracy characteristics, and their compliance with the requirements of regulatory and technical documentation.

Aim of research

Develop and investigate a calibration technique with the basic reduced measurement error of the test current flowing through the test object when testing insulation with an increased power frequency voltage not exceeding $\pm 5\%$.

Research methods

When solving the problem, the authors proposed to calculate and investigate the linear, exponential and power-law functions describing the relationship between the experimental data of removing the quantization levels from the ADC of the microcontroller from the current on the exemplary ammeter using software modules that process the measurement information.

Results

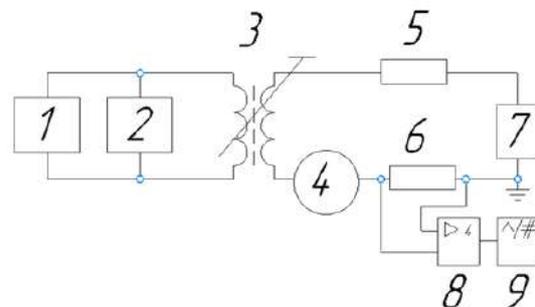
In the article, in the course of researching the protection stand of the test current measurement circuit flowing through the tested object when testing the insulation with increased power frequency voltage, a prototype was created that allows to protect the test current measurement circuit. The use of the developed protection circuit for measuring the test

current flowing through the test object when testing the insulation with an increased voltage of industrial frequency makes it possible to limit high-frequency pulses with an amplitude of more than 405 mV. In the article, during the study, the most optimal function was calculated and selected. This function describes the relationship between the experimental data of removing the quantization levels from the ADC of the microcontroller and the current on the exemplary ammeter. The authors have created a prototype that allows you to measure the test current with a reduced error of 0.17 %. The use of the developed calibration technique with the basic reduced error within the specified limits will make it possible to create a number of digital measuring ammeters on its basis, which make it possible to measure alternating current in the range from 1 mA to 100 A. The results obtained can be used in high voltage technology to study current measurement circuits, flowing through the test object when testing the insulation with an alternating sinusoidal voltage of power frequency.

Keywords: certification, current measurement, insulation test, test current, overvoltage, high voltage test setup, test object, resonance

Согласно ГОСТ Р 8.568-2017 ГСИ «Аттестация испытательного оборудования» вводится следующее определение: аттестация испытательного оборудования — определение нормированных точностных характеристик испытательного оборудования, их соответствия требованиям нормативно-технической документации и установление пригодности этого оборудования к эксплуатации. Основные измеряемые параметры при испытании повышенным переменным синусоидальном напряжении промышленной частоты, которые подлежат контролю, — это испытательное напряжение и ток, протекающий через испытуемый объект. В данной статье рассматривается поиск оптимальной эмпирической функции при первичной аттестации высоковольтной испытательной установки, описывающей связь между экспериментальными данными снятия уровней квантования с АЦП микроконтроллера от тока на образцовом амперметре.

На рисунке 1 представлена схема снятия уровней квантования с АЦП микроконтроллера от тока на образцовом амперметре при нагрузке ёмкостного объекта 105 нФ.



- 1 — регулятор напряжения от 0 до 220 В, 50 Гц; 2 — резонансный контур;
- 3 — повышающий высокопотенциальный испытательный трансформатор;
- 4 — образцовый амперметр;
- 5 — токоограничивающий резистор;
- 6 — прецизионный резистор;
- 7 — ёмкостной стенд; 8 — изолирующий усилитель; 9 — АЦП контроллера

- 1 — voltage regulator from 0 to 220 V, 50 Hz;
- 2 — resonant circuit; 3 — step-up high-potential test transformer; 4 — exemplary ammeter; 5 — current-limiting resistor;
- 6 — precision resistor; 7 — capacitive stand; 8 — isolating amplifier; 9 — ADC controller

Рисунок 1. Схема проведения эксперимента

Figure 1. Scheme of the experiment

На рисунке 1 даны следующие обозначения. В качестве регулятора напряжения используется лабораторный автотранс-

форматор 1 типа TDGC2-2 фирмы «Ресанта». Резонансный контур 2 состоит из набора емкостных и индуктивных элементов, рассчитанных на резонансную частоту 50 Гц. Высокопотенциальный повышающий испытательный трансформатора 3 типа ВИТ-РИУ-10 зав.№02-35.2021. Амперметр 5 типа Э59 используется в качестве измерений среднеквадратических значений тока с классом точности 0,5. Токоограничивающий постоянный проволочный резистор 6 типа С5-35В-160 номинальным сопротивлением 2,5 кОм. Прецизионный резистор 7 типа С2-29В отечественного производителя АНО «НПО «ЭРКОН»» применяется для измерения испытательного тока. Стенд электрических емкостей 8 от 0 до 210 нФ напряжение до 30 кВ производства компании ООО НИЦ «Резонансные системы».

Экспериментальные данные, представленные в таблице 1, получены при температуре окружающего воздуха 20,5 °С, относительной влажности воздуха 52 %, электрическом напряжении питающей сети 220,2 В, частоте питающей сети 50 Гц.

В таблице 1 параметр δ определяется по следующему выражению:

$$\delta = \frac{I_i}{m_i}, \quad (1)$$

где I_i — измеренное среднеквадратическое значение тока на образцовом амперметре, мА;

m_i — количество уровней квантования на АЦП.

На основе таблицы 1 поставлена задача — определить функцию, приближённо описывающую зависимость между экспе-

риментальными данными таблицы, но в пределах не больше основной приведенной погрешности $\pm 5\%$. При этом отклонение значений в точках, вычисленных по полученной формуле, от экспериментальных данных должно быть минимальным. Для решения поставленной задачи, а именно получения аппроксимирующей функции по табличным данным с наиболее точным приближением, исследуем линейную, экспоненциальную и степенную функции.

Выбор эмпирической формулы определяется классом функции, который более точно отражает связь между табличными данными. Воспользуемся графическим изображением на координатной плоскости и произведем расчет известных элементарных функций и поиск числовых параметров с расчетом поиска минимального значения метрики.

Линейная аппроксимация

Согласно экспериментальным данным снятия уровней квантования с АЦП микроконтроллера от тока на образцовом амперметре, представленным в таблице 1, методом наименьших квадратов определим параметры линейной эмпирической функции:

$$I(m) = a_1 \cdot m + a_0. \quad (2)$$

Основные данные для определения параметров линейной зависимости представлены в таблице 2.

В таблице 2 параметры S_2 и S_3 определяются по следующим выражениям:

$$S_2 = m^2; \quad (3)$$

$$S_3 = m \cdot \delta. \quad (4)$$

Таблица 1. Результаты экспериментов

Table 1. Experimental results

Ток образцового амперметра I , мА	50	100	150	200	250	300	350	375
Количество уровней квантования m	416	829	1256	1658	2102	2525	2926	3140
δ	8,32	8,29	8,37	8,29	8,41	8,42	8,36	8,37

Таблица 2. Расчетные коэффициенты линейной функции

Table 2. Calculated coefficients of the linear function

Коэффициенты									Сумма
m	416	829	1256	1658	2102	2525	2926	3140	14852
δ	8,32	8,29	8,37	8,29	8,41	8,42	8,36	8,37	66,83
S_2	173056	687241	1577536	2748964	4418404	6375625	8561476	9859600	34401902
S_3	3461,12	6872,41	10516,91	13744,82	17673,62	21252,08	24461,36	26292,27	124274,58

Количество точек исследования определяется шагом уровней квантования с АЦП микроконтроллера от тока на образцовом амперметре при испытании переменным током и равно 8.

Согласно данным, представленным в таблице 2, составим систему линейных уравнений для нахождения неизвестных параметров a_0, a_1 линейной функции:

$$\begin{cases} 34401902 \cdot a_1 + 14852 \cdot a_0 = 124274,58 \\ 14852 \cdot a_1 + 8 \cdot a_0 = 66,83 \end{cases} \quad (5)$$

Решая систему линейных уравнений методом обратной матрицы, получаем:

$$a_1 = 0,00003; \quad (6)$$

$$a_0 = 8,299. \quad (7)$$

Согласно (2) и (3) составим линейную функцию:

$$I(m) = 0,00003 \cdot m + 8,299. \quad (8)$$

Результаты практических и расчётных данных представлены на рисунке 2.

Экспоненциальная аппроксимация

Согласно экспериментальным данным, представленным в таблице 1, методом наименьших квадратов определим параметры линейной экспоненциальной функции:

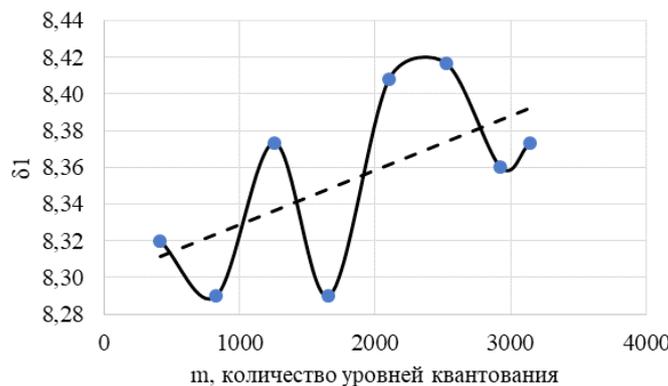
$$I(m) = a_2 \cdot e^{b_1 \cdot m}. \quad (9)$$

Применяя метод наименьших квадратов, экспоненциальную функцию линеаризуем:

$$a_3 = \ln(a_2); \quad (10)$$

$$a_4 = b_2. \quad (11)$$

Расчетные коэффициенты линейной зависимости, полученные на основе аппроксимации экспоненциальной функции, представлены в таблице 3.



1 — график зависимости, описывающей отношение уровней квантования на входе АЦП микроконтроллера к току на образцовом амперметре;
2 — линейная эмпирическая функция

1 — a graph of dependence describing the ratio of the quantization levels at the input of the ADC of the microcontroller to the current at the exemplary ammeter;
2 — linear empirical function

Рисунок 2. Результаты практических и расчётных данных

Figure 2. Results of practical and calculated data

В таблице 3 параметры S_4 , S_5 и S_6 определяются по следующим выражениям:

$$S_4 = \ln(\delta_1); \quad (12)$$

$$S_5 = m^2; \quad (13)$$

$$S_6 = m \cdot \delta. \quad (14)$$

Количество точек исследования определяется шагом уровней квантования с АЦП микроконтроллера от тока на образцовом амперметре при испытании переменным током и равно 8.

Согласно данным, представленным в таблице 3, составим систему линейных уравнений для нахождения неизвестных параметров a_0 , a_1 линейной аппроксимации:

$$\begin{cases} 34401902 \cdot a_1 + 14852 \cdot a_0 = 31550,79 \\ 14852 \cdot a_1 + 8 \cdot a_0 = 16,98 \end{cases}. \quad (15)$$

Решая систему линейных уравнений методом обратной матрицы, получаем:

$$a_1 = 4 \cdot 10^{-6}; \quad (16)$$

$$a_0 = 2,116. \quad (17)$$

Линеаризованная эмпирическая функция примет следующий вид:

$$I(m) = 4 \cdot 10^{-6} \cdot m - 2,116. \quad (18)$$

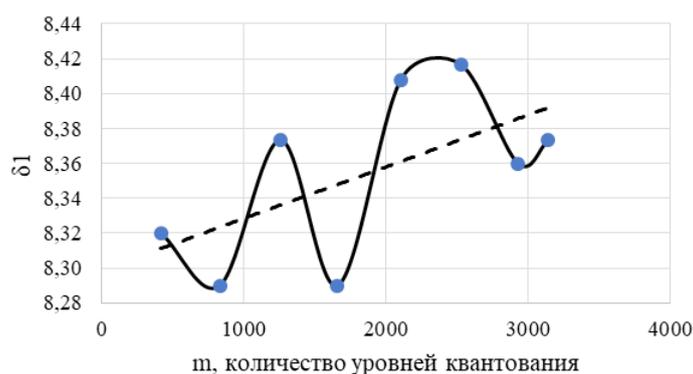
Согласно (10) и (11), определяя параметры экспоненциальной эмпирической зависимости, получаем искомую функцию (график представлен на рисунке 3):

$$I(m) = 8,299 \cdot e^{4 \cdot 10^{-6} \cdot m}. \quad (19)$$

Таблица 3. Расчетные коэффициенты линейной зависимости, полученные на основе аппроксимации экспоненциальной функции

Table 3. Calculated coefficients of the linear function dependence, obtained on the basis of approximation of the exponential function

	Коэффициенты									Сумма
I	50	100	150	200	250	300	350	375	1775	
m	416	829	1256	1658	2102	2525	2926	3140	14852	
δ	8,32	8,29	8,37	8,29	8,41	8,42	8,36	8,37	66,83	
S_4	2,12	2,12	2,13	2,12	2,13	2,13	2,12	2,13	16,98	
S_5	173056	687056	1577536	2748964	4418404	6375625	8561476	9859600	34401902	
S_6	881,36	1753,38	2669,07	3506,75	4475,54	5378,79	6213,24	6672,66	315550,79	



1 — график зависимости, описывающей отношение уровней квантования на входе АЦП микроконтроллера к току на образцовом амперметре; 2 — экспоненциальная эмпирическая зависимость

1 — a graph of dependence describing the ratio of the quantization levels at the input of the ADC of the microcontroller to the current at the exemplary ammeter; 2 — exponential empirical dependence

Рисунок 3. Результаты практических и расчётных данных

Figure 3. Results of practical and calculated data

Степенная аппроксимация

Предположим, что на основании экспериментальных данных снятия уровней квантования с АЦП микроконтроллера от тока на образцовом амперметре в качестве эмпирической функции примем степенную функцию:

$$F(m) = a \cdot m^b, \tag{20}$$

где m — количество уровней квантования;

a — единица младшего разряда;

b — степень.

Используя метод наименьших квадратов, линеаризуя степенную функцию, получим:

$$\ln F(m) = \ln a \cdot m^b. \tag{21}$$

Упрощая (21), получаем:

$$\ln F(m) = \ln a + b \cdot \ln m. \tag{22}$$

Линейная функция:

$$F = a_1 \cdot X + a_0. \tag{23}$$

Определяем коэффициенты линейной функции, аппроксимирующей экспериментальные данные:

$$X_i = \ln(I_i); \tag{24}$$

$$Y_i = \ln(m_i); \tag{25}$$

$$a_0 = \ln(a); \tag{26}$$

$$a_1 = b; \tag{27}$$

$$\delta_i = \frac{m_i}{I_i}; \tag{28}$$

$$L_i = X_i^2; \tag{29}$$

$$Z_i = X_i \cdot Y_i; \tag{30}$$

Количество точек исследования определяется шагом уровней квантования с АЦП микроконтроллера от тока на образцовом амперметре при испытании переменным током и равно 8.

Согласно данным представленным в таблице 4, составим систему линейных уравнений для нахождения неизвестных параметров a_0, a_1 линейной аппроксимации:

$$\begin{cases} 435,85 \cdot a_1 + 58,82 \cdot a_0 = 124,87 \\ 58,82 \cdot a_1 + 8 \cdot a_0 = 16,98 \end{cases}. \tag{31}$$

Решая систему линейных уравнений методом обратной матрицы, получаем:

$$a_1 = 0,00496; \tag{32}$$

$$a_0 = 2,086; \tag{33}$$

Согласно (32) и (33) составим эмпирической функции:

$$F = 2,086 \cdot m + 0,00496; \tag{34}$$

По (26) и (27) получим степенную эмпирическую функцию:

$$F(m) = 8,0548 \cdot m^{0,0050}; \tag{35}$$

Выбор оптимальной эмпирической зависимости

Получив функции (8), (19) и (35), описывающие приближение к точкам табличной функции по методу наименьших квадратов, рассчитаем моделируемые математические показания прибора высоко-

Таблица 4. Расчетные коэффициенты линейной зависимости, полученные на основе степенной аппроксимации

Table 4. Calculated coefficients of the linear function dependence, obtained on the basis of power-law approximation

	Коэффициенты								Сумма
I	50	100	150	200	250	300	350	375	1775
m	416	829	1256	1658	2102	2525	2926	3140	14852
δ	8,32	8,29	8,37	8,29	8,41	8,42	8,36	8,37	66,83
X	6,03	6,72	7,14	7,41	7,65	7,83	7,98	8,05	58,82
Y	2,12	2,12	2,13	2,12	2,13	2,13	2,12	2,13	16,98
$L = X^2$	36,37	45,16	50,92	54,96	58,53	61,37	63,70	64,83	435,85
$Z = X \cdot Y$	12,78	14,21	15,16	15,68	16,29	16,69	16,95	17,11	124,87

вольтной испытательной установки и основную приведенную погрешность.

Основную приведенную погрешность измерения силы переменного тока определяем по формуле:

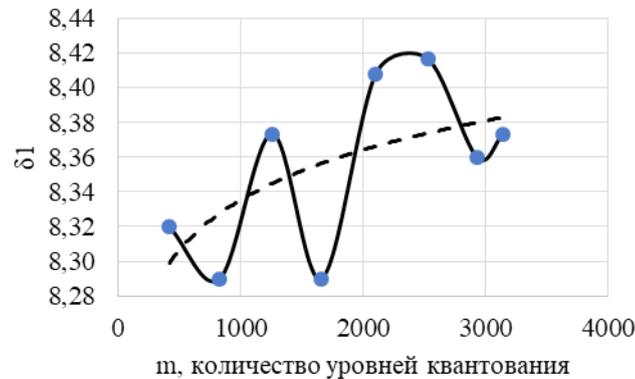
$$\gamma = \frac{I_{ИО} - I_{СА}}{I_K} \cdot 100\%; \quad (36)$$

где $I_{ИО}$ — показания ИО;

$I_{СА}$ — показания средства аттестации;

I_K — конечное значение шкалы миллиамперметра ИО.

По расчетным данным, представленным в таблице 5, определили среднее значение основной приведенной погрешно-



1 — график зависимости, описывающей отношение уровней квантования на входе АЦП микроконтроллера к току на образцовом амперметре;
2 — степенная зависимость

1 — a graph of dependence describing the ratio of the quantization levels at the input of the ADC of the microcontroller to the current at the exemplary ammeter;
2 — power dependence

Рисунок 3. Результаты практических и расчётных данных

Figure 3. Results of practical and calculated data

Таблица 5. Расчетные данные

Table 5. Calculated data

Ток образцового амперметра, мА	50	100	150	200	250	300	350	375
Количество уровней квантования	416	829	1256	1658	2102	2525	2926	3140
Расчётный ток линейной функции, мА	49,7	97,7	145,8	189,8	237,0	280,7	320,9	342,0
Основная приведенная погрешность, %	0,05	0,47	0,84	2,04	2,60	3,87	5,81	6,60
Расчётный ток экспоненциальной функции, мА	50,0	99,6	150,6	198,5	251,2	301,2	348,5	373,6
Основная приведенная погрешность, %	0,01	0,09	0,12	0,31	0,23	0,24	0,31	0,27
Расчётный ток степенной функции, мА	50,1	99,5	150,5	198,3	251,2	301,4	349,1	374,4
Основная приведенная погрешность, %	0,02	0,10	0,09	0,33	0,23	0,29	0,19	0,111

сти; так, для линейной функции основная приведенная погрешность 2,79 %, экспоненциальной функции — 0,20 %, а для степенной функции — 0,17 %.

Для проведения аттестации произведем сборку компонентов, представленных на рисунке 1, в готовое устройство прибора типа РИУ-10-М2, представленное на рисунке 4, а в программном листинге прибора РИУ-10-М2 используем степенную функцию.

Аттестация резонансной испытательной установки РИУ-10-М2 проводится по схеме, представленной на рисунке 5.

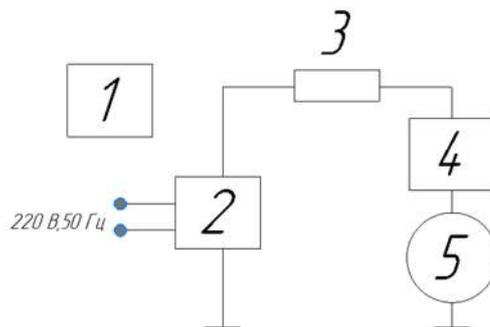
Прибор для контроля воздушной среды 1, представленный на рисунке 2, типа

МЭС-200А ЗАО НПП «Электростандарт» используется для определения области влияющих величин, характеризующих климатические воздействия с допустимым отклонением согласно ГОСТ 22261-94 «Средства измерений электрических и магнитных величин». Использовано следующее оборудование. Токоограничивающий постоянный проволочный резистор 3, представленный на рисунке 2, типа С5-35В-160 номинальным сопротивлением 2,5 кОм. Стенд электрических емкостей от 0 до 210 нФ напряжение до 30 кВ 4, представленный на рисунке 1, производства компании ООО НИЦ «Резонансные системы». Мультиметр



Рисунок 4. Резонансная испытательная установка РИУ-10-М2

Figure 4. Resonant test setup RIU-10-M2



1 — установка РИУ-10-М2; 2 — активная нагрузка; 3 — ёмкостная нагрузка; 4 — образцовый амперметр

1 — installation RIU-10-M2; 2 — activee load; 3 — capacitive load; 4 — exemplary ammeter

Рисунок 5. Схема проведения аттестации установки РИУ-10-М2

Figure 5. Scheme of attestation of the RIU-10-M2 installation

Таблица 6. Результаты аттестации**Table 6.** Results of certification

Показания аттестуемого РИУ-10-М2, мА	20,0	100,0	200,0	300,0	340,0
Показания средства аттестации, мА	19,0	100,0	200,0	300,8	340,9
Основная приведенная погрешность, %	0,29	0,00	0,00	-0,23	-0,26

цифровой 5, представленный на рисунке 2, типа 34465 производителя «Keysight Technologies Microwave Products (M) Sdn. Bhd.» (Малайзия) используется в качестве измерения переменного тока в диапазоне погрешности от 0,14 % до 0,27 % в диапазоне частот от 3 Гц до 5 кГц.

Результаты аттестации, представленные в таблице 6, получены при температуре окружающего воздуха 20,5 °С, относительной влажности воздуха 53 %, атмосферном давлении 91,11 кПа, электрическом напряжении питающей сети 219,9 В, частоте питающей сети 49,99 Гц.

В таблице 6 указана основная приведенная погрешность измерения силы переменного электрического тока в процентах при показаниях аттестуемого испытательного оборудования в миллиамперах от показаний средств аттестаций в миллиамперах.

Основную приведенную погрешность измерения силы переменного тока по формуле:

$$\gamma = \frac{I_{ИО} - I_{СА}}{I_K} \cdot 100\%; \quad (36)$$

где $I_{ИО}$ — показания ИО;

$I_{СА}$ — показания средства аттестации;

I_K — конечное значение шкалы миллиамперметра ИО.

Выводы

1. Применение методики обработки схемы измерения тока, протекающего через испытуемый объект, при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты позволяет получать среднеквадратичное значение тока в реальном масштабе вре-

мени, и, следовательно, оперативно контролировать ток в высоковольтных цепях для постоянного мониторинга с приведенной погрешностью не более 0,17 %.

2. По результатам проведения исследования создан опытно-промышленной образец резонансной испытательной установки РИУ-10-М2, и ФБУ «ЦСМ Республики Башкортостан» получен аттестат № 8/22 от 08.06.2021, протокол первичной аттестации № 8/1/118, по которой установка признана пригодной для использования при испытаниях повышенным напряжением промышленной частоты изоляции обмоток электродвигателей и других твердых диэлектриков, подачи высокого напряжения при измерении уровня частичных разрядов в изоляции, а также при проведении других измерений и проверок электрооборудования.

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».

Список источников

1. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Кириллов Р.В. Выбор схемы ВКУ для работы в резонансном режиме // Сб. науч. тр. I Междунар. науч.-техн. конф. Уфа: УГНТУ, 2013. С. 209-215.
2. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Хазиева Р.Т., Стрижев Д.А. Новые схемотехнические решения резонансной высоковольтной испытательной установки // Инновационные направления развития электропривода, электротехнологий и электрооборудования: межвуз. сб. науч. тр. Уфа: УГНТУ, 2012. С. 178-183.
3. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В. Оценка влияния параметров изоляции высоковольтного оборудования на режимы работы испытательной установки // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». 2015. № 2. www.science-education.ru/122-20794 — 07.08.2015.
4. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В. Математическое моделирование резонансных режимов испытательной установки // Вести высших учебных заведений Черноморья. 2015. № 3. С. 51-55.
5. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Конев А.А. Исследование режимов работы дросселя резонансной испытательной установки // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12. № 3. С. 5-10.
6. Пат. 132213 РФ, МПК G 01 R. Компактная испытательная установка для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением / С.Г. Конесев, А.В. Мухаметшин. № 2013108529; заявл. 10.09.13. Бюл. № 25.
7. Пат. 2662952 РФ, МПК G 01 R. Установка для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением / С.Г. Конесев, А.В. Мухаметшин, А.А. Конев, И.З. Гайнутдинов. № 2017130067; заявл. 24.08.17. Бюл. № 22.
8. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Анализ стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей при различных способах подключения гибридных электромагнитных элементов // Электротехнические системы и комплексы. 2017.

№ 1 (34). С. 49-55. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55.

9. Пат. 156457 РФ, МПК G 01 R. Установка для испытания средств защиты / А.В. Мухаметшин, Е.В. Мухаметшин. № 201524718; заявл. 23.06.15. Бюл. № 31.

10. Хазиева Р.Т., Мухаметшин А.В., Горшенин А.И. Исследование и разработка схемы измерения переменного тока при испытании изоляции // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2020. № 4, Т. 16. С. 46-55.

References

1. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Kirillov R.V. Vybora skhemy VIU dlya raboty v rezonansnom rezhime [The Choice of the VIA Circuit for Operation in the Resonant Mode]. *Sbornik nauchnykh trudov I Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Collection of Scientific Works of I International Scientific and Technical Conference]. Ufa, UGNTU, 2013, pp. 209-215. [in Russian].
2. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Khazieva R.T., Strizhev D.A. Novye skhemotekhnicheskie resheniya rezonansnoi vysokovol'tnoi ispytatel'noi ustanovki [New Circuit Solutions of The Resonant High-Voltage Test Facility]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Innovatsionnye napravleniya razvitiya elektroprivoda, elektrotekhnologii i elektrooborudovaniya»* [Interuniversity Collection of Scientific Papers «Innovative Directions of Development of Electric Drive, Electrical Technologies and Electrical Equipment»]. Ufa, UGNTU, 2012, pp. 178-183. [in Russian].
3. Konesev S.G., Mukhametshin A.V. Otsenka vliyaniya parametrov izolyatsii vysokovol'tnogo oborudovaniya na rezhimy raboty ispytatel'noi ustanovki [Assessment of the Influence of Insulation Parameters of High-Voltage Equipment on the Operating Modes of the Test Facility]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya» — Electronic Scientific Journal «Modern Problems of Science and Education»*, 2015, No. 2. www.science-education.ru/122-20794 — 07.08.2015. [in Russian].

4. Konesev S.G., Mukhametshin A.V. Matematicheskoe modelirovanie rezonansnykh rezhimov ispytatel'noi ustanovki [Mathematical Modeling of Resonance Modes of the Test Setup]. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya — News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region*, 2015, No. 3, pp. 51-55. [in Russian].
5. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Konev A.A. Issledovanie rezhimov raboty drosselya rezonansnoi ispytatel'noi ustanovki [Modelling Modes Inductor Resonance Test Set]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2016, Vol. 12, No. 3, pp. 5-10. [in Russian].
6. Konesev S.G., Mukhametshin A.V. Kompaktnaya ispytatel'naya ustanovka dlya ispytaniya izolyatsii elektrooborudovaniya povyshennym napryazheniem [Compact Test Setup for Testing Insulation of Electrical Equipment with Increased Voltage]. Patent 132213 RF, 2013. [in Russian].
7. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Konev A.A., Gainutdinov I.Z. Ustanovka dlya ispytaniya izolyatsii elektrooborudovaniya povyshennym napryazheniem [Installation for Testing Insulation of Electrical Equipment with Increased Voltage]. Patent 2662952 RF, 2017. [in Russian].
8. Konesev S.G., Khazieva R.T. Analiz stabilizatsionnykh svoystv induktivno-emkostnykh preobrazovatelei pri razlichnykh sposobakh podklyucheniya gibridnykh elektromagnitnykh elementov [Stabilization Properties of Inductive-Capacitive Converters with Different Connection Methods of Hybrid Electromagnetic Elements]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2017, No. 1 (34), pp. 49-55. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55. [in Russian].
9. Mukhametshin A.V., Mukhametshin E.V. Ustanovka dlya ispytaniya sredstv zashchity [Installation for Testing Protection Means]. Patent 156457 RF, 2015. [in Russian].
10. Khazieva R.T., Mukhametshin A.V., Gorshenin A.I. Issledovanie i razrabotka skhemy izmereniya peremennogo toka pri ispytanii izolyatsii [Research and Development of the Accurate Measurement Scheme for Insulation Tests]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2020, No. 4, Vol. 16, pp. 46-55. [in Russian].



**Антон Николаевич
Яшин**
Anton N. Yashin

*аспирант кафедры
«Электротехника
и электрооборудование
предприятий»,
Уфимский
государственный
нефтяной технический
университет,
Уфа, Россия*



**Эдуард Ахнафович
Гильманов**
Eduard A. Gilmanov

*кандидат
технических наук,
главный энергетик —
начальник службы
МУП «Уфаводоканал»,
Уфа, Россия*



**Марат Ильгузович
Хакимьянов**
Marat I. Khakimyanov

*доктор технических наук,
доцент,
заведующий кафедрой
«Электротехника
и электрооборудование
предприятий»,
Уфимский
государственный
нефтяной технический
университет,
Уфа, Россия*

УДК 621.313.333

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-67-75

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПАКЕТЕ MATLAB SIMULINK

Актуальность

Разработка и использование математических моделей электромеханических устройств позволяют изучать их характеристики, оптимизировать конструкцию, подбирать материалы, сокращая количество дорогостоящих физических экспериментов. Поэтому в настоящее время математическое моделирование широко используется в электроприводе, схемотехнике и других областях. Для студентов электротехнических направлений подготовки очень важно во время учебы овладеть навыками построения математических моделей и работы с программными комплексами для моделирования электрических машин и других устройств.

Цель исследования

Требовалось разработать математическую модель, позволяющую продемонстрировать студентам принципы построения моделей электрических машин, а также исследовать механические характеристики асинхронного двигателя.

Методы исследования

Авторы использовали принципы теории электрических машин, модель реализована в пакете Matlab Simulink.

Результаты

В ходе работы построена модель для исследования механических характеристик асинхронного двигателя, получены следующие характеристики: естественная, при пониженном напряжении, при изменении числа пар полюсов машины, при введении добавочного сопротивления в цепь ротора. Полученные результаты используются в

учебном процессе кафедры электротехники и электрооборудования предприятий Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, математическая модель, компьютерная модель, естественная характеристика, механическая характеристика

SIMULATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF AN INDUCTION MOTOR IN MATLAB SIMULINK

Relevance

The construction and implementation of mathematical models of electromechanical devices on a computer allows you to study their characteristics, optimize the design, select materials, reducing the number of expensive physical experiments. Therefore, at present, mathematical simulation is widely used in electric drive, circuitry and other fields. For students of electrical engineering areas of training, it is very important during their studies to master the skills of building mathematical models and working with software systems for simulation electrical machines and other devices.

Aim of research

It was required to develop a mathematical model that allows students to demonstrate the principles of constructing models of electrical machines, as well as to investigate the mechanical characteristics of an induction motor.

Research methods

The authors used the principles of the theory of electrical machines, the model is implemented in Matlab Simulink.

Results

In the course of the work, a model was built to study the mechanical characteristics of an induction motor, the following characteristics were obtained: natural, at reduced voltage, with a change in the number of pairs of poles of the machine, with the introduction of additional resistance into the rotor circuit. The results obtained are used in the educational process of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises, Ufa State Petroleum Technological University

Keywords: induction motor, mathematical simulation, computer model, natural characteristic, mechanical characteristic

Студенты электротехнических направлений подготовки в настоящее время должны владеть навыками построения математических моделей электромеханических устройств, а также реализации данных моделей в современных программных комплексах. Моделирование способно заменить во многих случаях проведение дорогостоящих физических экспериментов, сократить сроки разработки новых устройств, оптимизировать режимы работы элементов электротехнических комплексов.

Существует достаточно большое количество программных пакетов для реализации математических моделей электротехнических устройств [1–6], которые

позволяют проводить электромагнитные, тепловые, электродинамические и другие виды расчетов. Однако, как показал анализ работ в этой области, большинство из них является слишком дорогими и сложными для использования в учебном процессе при подготовке студентов [7–10]. Поэтому перед авторами стояла задача построить математическую модель асинхронного двигателя (АД) в доступном программно-математическом пакете, достаточно простую для обучения студентов электриков.

Matlab — пакет прикладных программ для технических вычислений, позволяет решить задачи математического программирования практически любой сложно-

сти. Основным достоинством является относительная простота манипуляций с матричными и другими видами данных.

Simulink — это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы [11].

Механической характеристикой называется зависимость частоты вращения двигателя от вращающегося момента на валу [12]. Она позволяет анализировать поведение двигателя при изменении его механической нагрузки. Общий вид механической характеристики можно определить графически, анализируя зависимости каждого из параметров, определяющих электромагнитный вращающий момент.

Естественная механическая характеристика АД (рисунок 1) описывается следующим выражением [13]:

$$M = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}, \quad (1)$$

где M — момент на валу АД;

U_{ϕ} — напряжение фазы обмотки статора;

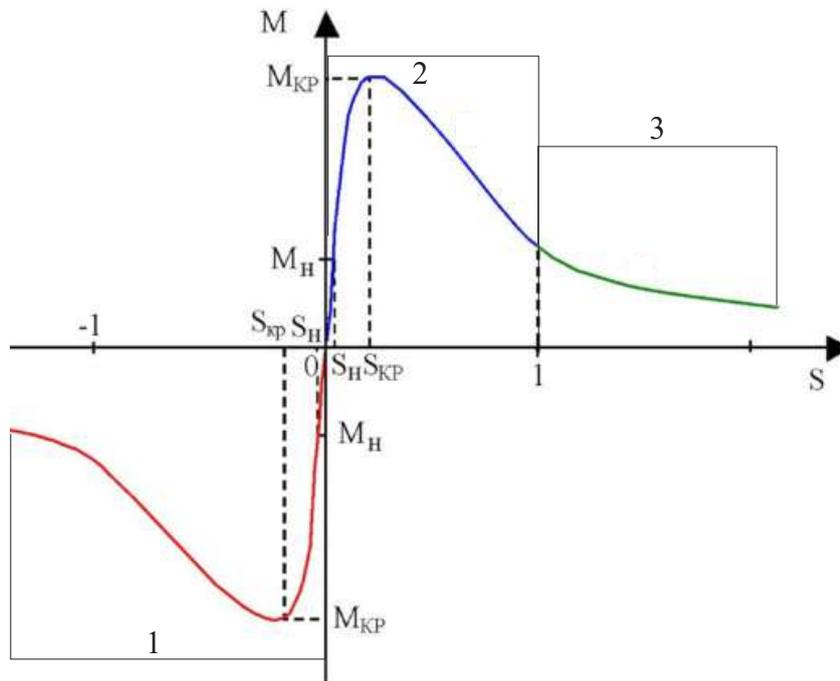
R_1, X_1 — соответственно активное и индуктивное сопротивление фазы обмотки статора;

R_2'/s — приведенное активное сопротивление обмотки ротора с учетом механической нагрузки на валу двигателя;

X_2' — приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора.

Зависимость скорости от момента (рисунок 2) имеет следующий вид:

$$\omega = \omega_0 - \frac{3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot R_2'}{M \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}. \quad (2)$$

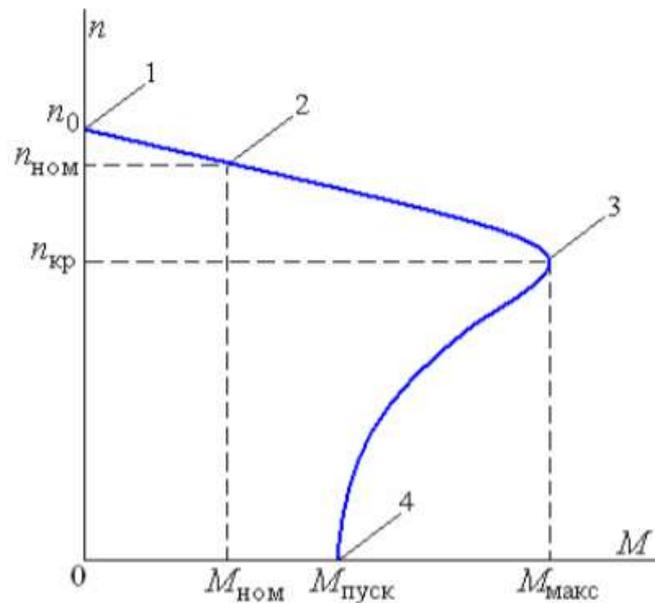


1 — генераторный режим; 2 — двигательный режим; 3 — режим противовключения

1 — generator mode; 2 — motor mode; 3 — opposition regime

Рисунок 1. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя

Figure 1. Natural mechanical characteristic of an induction motor



1 — режим XX; 2 — номинальный режим; 3 — критический режим;
4 — режим короткого замыкания (КЗ)

1 — mode XX; 2 — nominal mode; 3 — critical mode; 4 — short circuit mode

Рисунок 2. Зависимость скорости от момента асинхронного двигателя

Figure 2. Dependence of speed on the moment of an induction motor

Моделирование механических характеристик АД проводится на основании выражений (1) и (2). Параметры асинхронного двигателя представлены в таблице 1.

На рисунке 3 представлена математическая модель для построения механических характеристик асинхронного двигателя.

Данная модель позволяет увидеть естественную механическую характеристику АД (рисунки 4, 5), а также проанализировать способы регулирования скорости вращения вала двигателя.

Искусственные механические характеристики АД при понижении напряжения,

подводимого к обмотке статора, будут иметь вид, как показано на рисунке 6.

Искусственные механические характеристики АД при изменении числа пар полюсов представлены на рисунке 7.

Искусственные механические характеристики АД при введении добавочного сопротивления в цепь ротора представлены на рисунке 8.

Искусственные механические характеристики АД при частотном регулировании представлены на рисунке 9.

Таблица 1. Параметры асинхронного двигателя

Table 1. Parameters of an induction motor

Наименование и обозначение	Значение
Напряжение фазы обмотки статора U_{ϕ} , В	220
Активное сопротивление фазы обмотки статора R_1 , Ом	0,0178
Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора X_1 , Ом	0,118
Активное сопротивление фазы обмотки ротора R_2 , Ом	0,0194
Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора X_2 , Ом	0,123
Число пар полюсов p	2

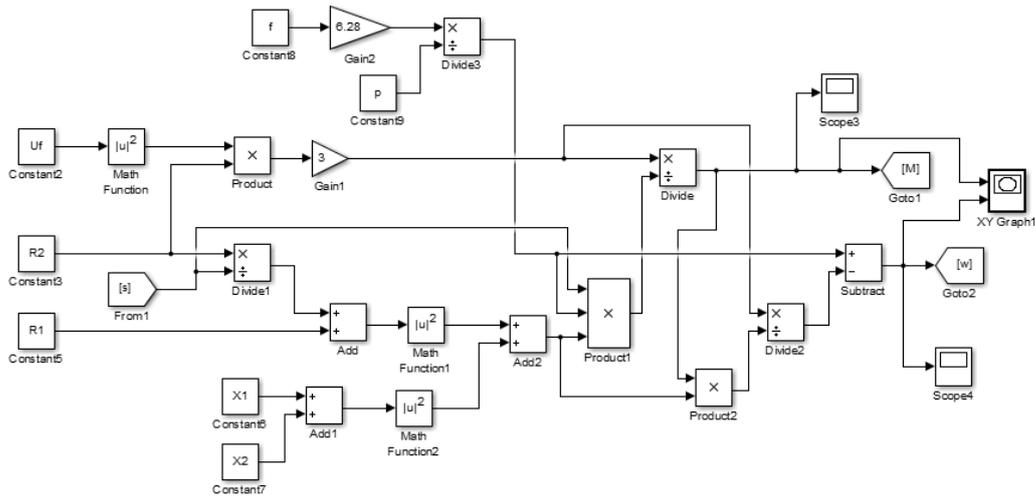


Рисунок 3. Математическая модель для построения механических характеристик асинхронного двигателя

Figure 3. Mathematical model for obtaining the mechanical characteristics of an induction motor

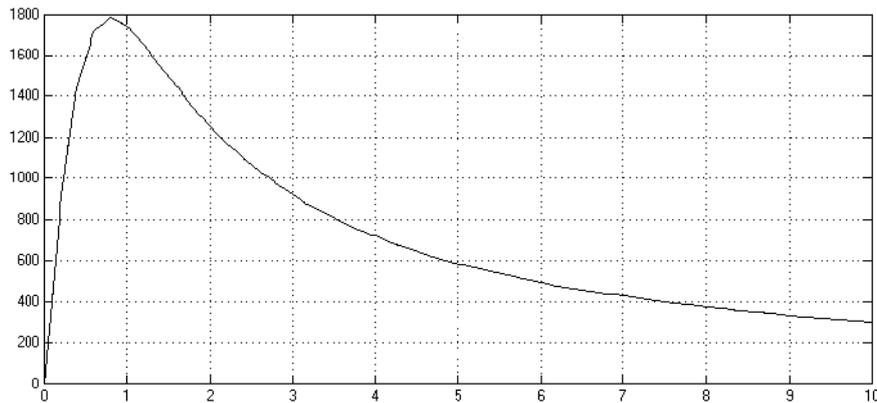


Рисунок 4. Полученная с помощью модели естественная механическая характеристика асинхронного двигателя ($M = f(s)$)

Figure 4. Natural mechanical characteristic obtained using the model of an induction motor ($M = f(s)$)

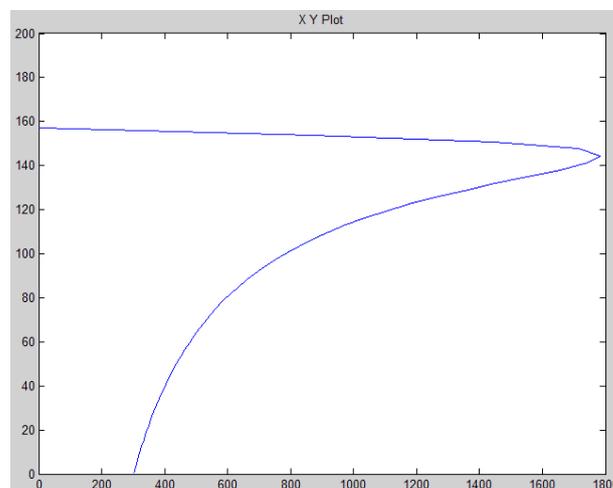


Рисунок 5. Зависимость $\omega = f(M)$ асинхронного двигателя

Figure 5. Dependence $\omega = f(M)$ of an induction motor

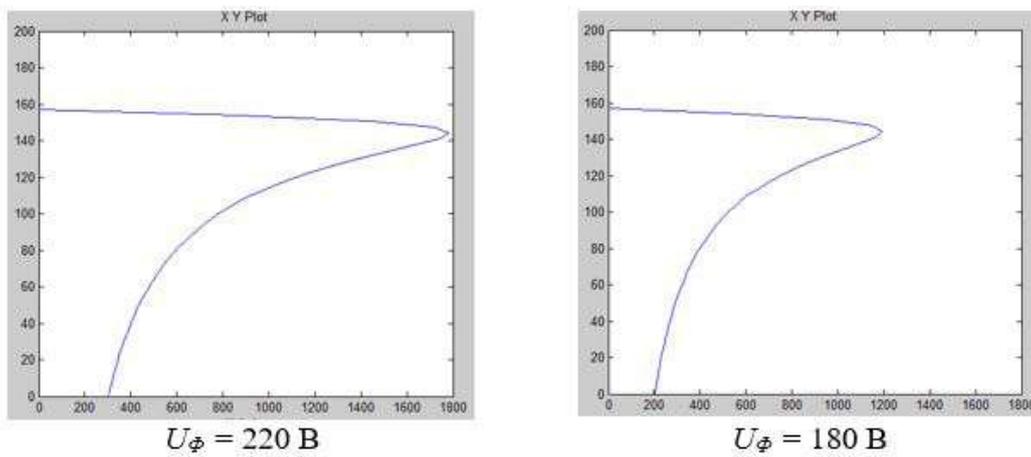


Рисунок 6. Механические характеристики асинхронного двигателя при понижении напряжения

Figure 6. Mechanical characteristics of an induction motor at undervoltage

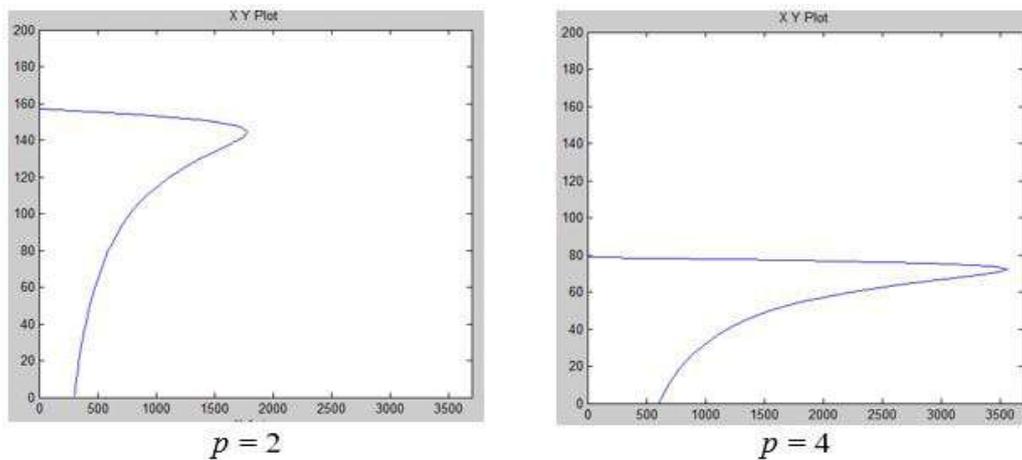


Рисунок 7. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении числа пар полюсов

Figure 7. Mechanical characteristics of an induction motor with a change in the number of pole pairs

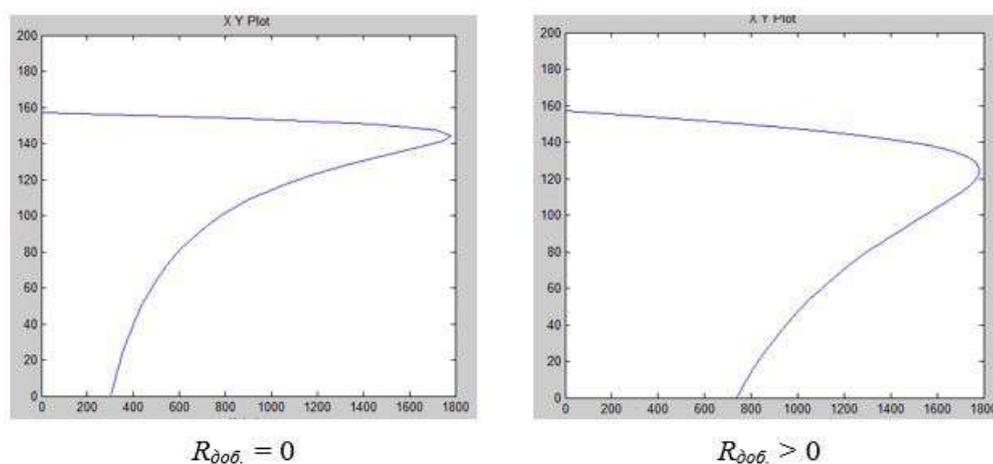


Рисунок 8. Механические характеристики асинхронного двигателя при введении добавочного сопротивления в цепь ротора

Figure 8. Mechanical characteristics of an induction motor with the introduction of additional resistance in the rotor circuit

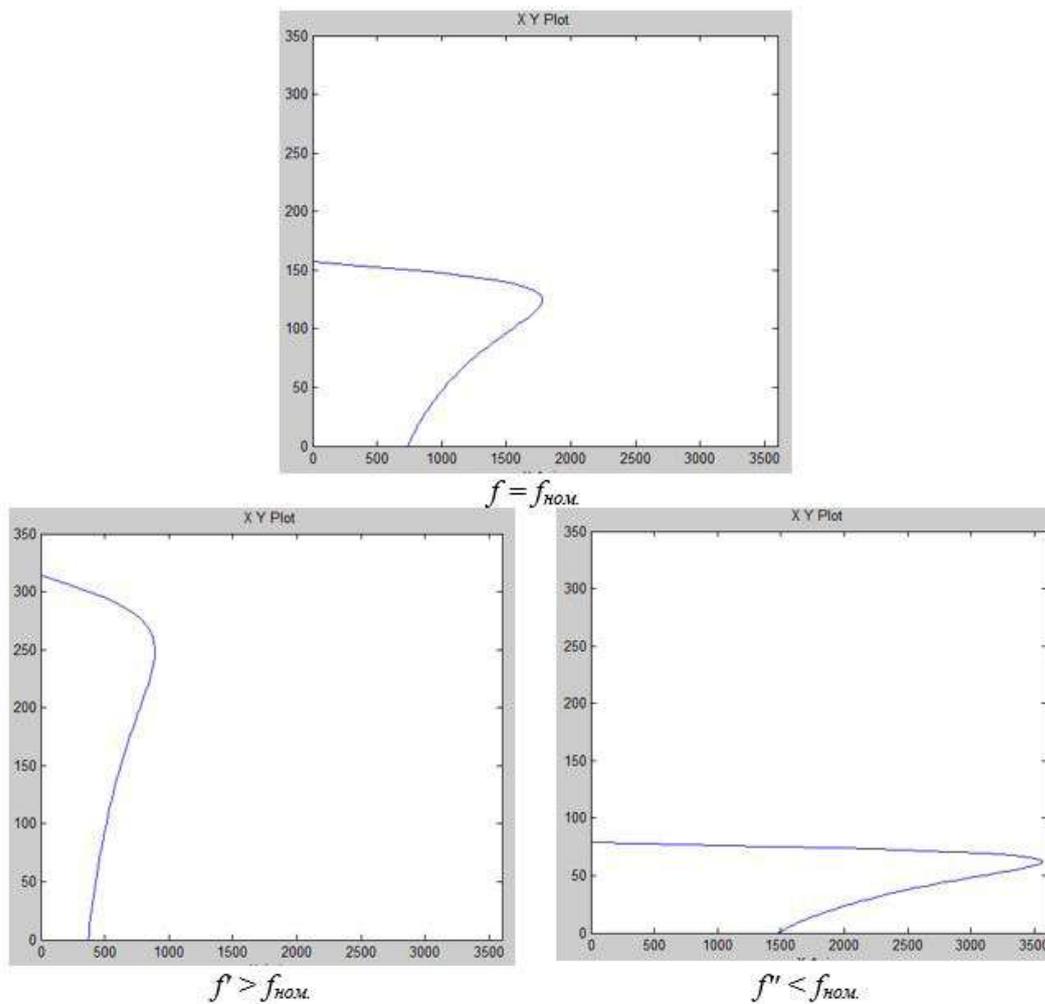


Рисунок 9. Механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании

Figure 9. Mechanical characteristics of an induction motor with frequency regulation

Математическая модель, представленная на рисунке 3, позволяет анализировать поведение двигателя при изменении его механической нагрузки и оценить результаты регулирования скорости вращения вала двигателя различными способами.

Выводы

1 Математическое моделирование электромеханических устройств в настоящее время широко используется в таких областях, как электропривод, электрические машины и другие. Поэтому актуальной является задача обучения студентов электротехнических специальностей основам моделирования электромеханических систем.

2 На рынке представлено довольно большое количество программно-математических пакетов для проведения электромагнитных, тепловых, электродинамических и других типов расчетов. Однако большинство из них имеют высокую стоимость, малодоступны для студентов и сложны в освоении.

3 Авторами разработана модель для исследования механических характеристик асинхронного двигателя в пакете Matlab Simulink. Модель предназначена для использования в учебном процессе, она позволяет студентам освоить принципы построения компьютерных моделей, а также получать различные семейства характеристик путем изменения параметров модели.

Список источников

1. Abdulwahid M.M., e.a. Design and Implementation of Motor Speed Control Model by using PLC // *Informatica: Journal of Applied Machines Electrical Electronics Computer Science and Communication Systems*. 2020. Vol. 1. No. 1. P. 54-62.
2. Hiroi K., e.a. Magnetic Field Imaging of A Model Electric Motor Using Polarized Pulsed Neutrons at J-PARC/MLF // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 862. No. 1. P. 012008.
3. Jorgens C. Electric Motor Powered Are Engine Simulator (EMPAS): Test Model Hardware Design and Fabrication // *AIAA AVIATION 2021 FORUM*. 2021. P. 2975.
4. Aymen F., e.a. Electric Vehicle Model Based on Multiple Recharge System and a Particular Traction Motor Conception // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 49308-49324.
5. Altshul G.M., e.a. Interaction Model of One Jaw of a Vibrating Jaw Crusher with the Processed Rock, Taking Into Account the Properties of the Electric Motor // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 747. No. 1. P. 012047.
6. Sieklucki G. An Investigation into the Induction Motor of Tesla Model & Vehicle // *International Symposium on Electrical Machines (SME)*. 2018. P. 1-6.
7. Kiyakli A.O., Solmaz H. Modeling of an Electric Vehicle with MATLAB/Simulink // *International Journal of Automotive Science and Technology*. 2018. Vol. 2. No. 4. P. 9-15.
8. Traue A., e.a. Toward a Reinforcement Learning Environment Toolbox for Intelligent Electric Motor Control // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2020.
9. Fu S., e.a. SM-PI Control Strategy of Electric Motor-Pump for Pure Electric Construction Machinery // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 100241-100250.
10. Gandzha S., Kosimov B., Aminov D. Selecting Optimal Design of Electric Motor of Pilgrim Mill Drive for Manufacturing Techniques Seamless Pipe // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2019. P. 1-7.

11. MATLAB Exponent. Simulink [Электронный ресурс]. URL: <https://matlab.ru/products/simulink> (дата обращения 11.09.2021).

12. Проскуряков В.С., Соболев С.В. Электротехника. Асинхронный двигатель. Ухта: Изд-во УГТУ-УПИ, 2008. 33 с.

13. Петрова М.В. Электрический привод. Ульяновск: УлГТУ, 2013. 50 с.

References

1. Abdulwahid M.M., e.a. Design and Implementation of Motor Speed Control Model by using PLC. *Informatica: Journal of Applied Machines Electrical Electronics Computer Science and Communication Systems*, 2020, Vol. 1, No. 1, pp. 54-62.
2. Hiroi K., e.a. Magnetic Field Imaging of A Model Electric Motor Using Polarized Pulsed Neutrons at J-PARC/MLF. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, Vol. 862, No. 1, pp. 012008.
3. Jorgens C. Electric Motor Powered Are Engine Simulator (EMPAS): Test Model Hardware Design and Fabrication. *AIAA AVIATION 2021 FORUM*, 2021, pp. 2975.
4. Aymen F., e.a. Electric Vehicle Model Based on Multiple Recharge System and a Particular Traction Motor Conception. *IEEE Access*, 2021, Vol. 9, pp. 49308-49324.
5. Altshul G.M., e.a. Interaction Model of One Jaw of a Vibrating Jaw Crusher with the Processed Rock, Taking Into Account the Properties of the Electric Motor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 747, No. 1, pp. 012047.
6. Sieklucki G. An Investigation into the Induction Motor of Tesla Model & Vehicle. *International Symposium on Electrical Machines (SME)*, 2018, pp. 1-6.
7. Kiyakli A.O., Solmaz H. Modeling of an Electric Vehicle with MATLAB/Simulink. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 2018, Vol. 2, No. 4, pp. 9-15.
8. Traue A., e.a. Toward a Reinforcement Learning Environment Toolbox for Intelligent Electric Motor Control. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2020.

9. Fu S., e.a. SM-PI Control Strategy of Electric Motor-Pump for Pure Electric Construction Machinery. *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 100241-100250.
10. Gandzha S., Kosimov B., Aminov D. Selecting Optimal Design of Electric Motor of Pilgrim Mill Drive for Manufacturing Techniques Seamless Pipe. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2019, pp. 1-7.
11. *MATLAB Exponent. Simulink* [Electronic Resource]. URL: <https://matlab.ru/products/simulink> (accessed 11.09.2021).
12. Proskuryakov V.S., Sobolev S.V. *Elektrotehnika. Asinkhronnyi dvigatel'* [Electrical Engineering. Asynchronous Motor]. Ukhta, Izd-vo UGTU-UPI, 2008. 33 p. [in Russian].
13. Petrova M.V. *Elektricheskii privod* [Electric Drive]. Ul'yanovsk, Izd-vo UGTU, 2013. 50 p. [in Russian].



Виктория Романовна Антропова
Victoria R. Antropova

*аспирант кафедры электроэнергетики,
Тюменский индустриальный
университет,
Тюмень, Россия*



Илья Сергеевич Сухачев
Ilya S. Sukhachev

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



Валерий Валентинович Сушков
Valery V. Sushkov

*доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Энергетика»,
Нижевартовский государственный
университет,
Нижевартовск, Россия*



Антон Сергеевич Мартьянов
Anton S. Martyanov

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

УДК 621.31

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-76-85

РАЗРАБОТКА ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ НАРУШЕНИЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Актуальность

Работа посвящена экономическому обоснованию технических решений по снижению последствий провалов и сбоев напряжения в системах электроснабжения на основе определения ущерба от кратковременных перебоев в электроснабжении. Получены функции плотности глубины падения напряжения и вероятности длительности падения напряжения в системе электроснабжения нефтяных месторождений, а также определена суммарная вероятность двух независимых событий заданной глубины и длительности. На основе разработанной Марковской модели кратковременных отказов электроснабжения получены вероятности нахождения системы электроснабжения в различных состояниях, что, в конечном итоге, позволит определить ущерб от аварийных простоев технологического оборудования.

Цель исследования

Исследовать вероятность останова технологического оборудования, в частности, погружных электродвигателей добычи нефти при внезапных перерывах электропитания и провести оценку ущерба для разных способов определения вероятности останова технологического оборудования.

Методы исследования

Для определения вероятности останова технологического оборудования от кратковременных нарушений электроснабжения (КНЭ) использованы методы теории вероятности и математической статистики, теории Марковских процессов, теории устойчивости электромеханических систем и прикладные программы на ЭВМ.

Результаты

Разработана Марковская модель состояний системы электроснабжения и технологического оборудования, определена граница динамической устойчивости для установки электроприводного центробежного насоса и приведен способ оценки вероятности останова технологического оборудования в зависимости от глубины и длительности КНЭ.

Ключевые слова: ответственные нефтепромысловые потребители электроэнергии, погружной электродвигатель, нарушение электроснабжения, устойчивость, вероятностная оценка

DEVELOPMENT OF PROBABILISTIC MODEL OF SHORT-TERM POWER SUPPLY INTERRUPTIONS

Relevance

The paper is devoted to the economic justification of technical solutions to reduce the consequences of voltage dips and interruptions in power supply systems based on the determination of damage from short-term power supply interruptions. The functions of the density of the voltage drop depth and the probability of the duration of the voltage drop in the power supply system of the oil fields are obtained, and the total probability of two independent events of a given depth and duration is determined. On the basis of the developed Markov model of short-term power supply failures, the probabilities of finding the power supply system in various states are obtained, which ultimately will allow determining the damage from emergency downtime of technological equipment.

Aim of research

To investigate the probability of shutdown of technological equipment, in particular, submersible electric motors for oil production during sudden power outages and assess the damage for different methods of determining the probability of shutdown of technological equipment.

Methods

To determine the probability of stopping a technological one from short-term power supply failures, the following methods were used: the theory of probability and mathematical statistics, the theory of Markov processes, the theory of stability of electromechanical systems and computer applications.

Results

A Markov model of the states of the power supply system and technological equipment has been developed, the boundary of dynamic stability for unit of an electric centrifugal pump has been determined, and a method for assessing the probability of stopping technological equipment depending on the depth and duration of short-term power failures has been presented.

Keywords: responsible oilfield power consumers, an electric submersible motor, power failure, stability, probabilistic assessment

Статистика показывает, что доля кратковременных нарушений электроснабжения (КНЭ) от общего количества аварийных отключений в системе электроснабжения нефтяного месторождения может достигать 50 %, а недоотпуск нефти вследствие отключения нефтедобывающих скважин составляет 60 % [1–5]. Следовательно, задача повышения устойчивости асинхронных электродвигателей ответственных механизмов с преобразователями частоты, включая установки электрических центробежных насосов (УЭЦН), к провалам и прерываниям напряжения и экономическое обоснование технических решений по снижению числа их аварийных остановок являются актуальными. Экономическое обоснование технических решений требует определения ущерба от КНЭ, что невозможно осуществить без вероятностной оценки нарушений электроснабжения.

Ниже рассмотрены два вероятностных подхода к оценке ущерба от КНЭ.

Первый подход основан на вероятностной оценке кривой динамической устойчивости (КДУ), второй — на Марковской модели возникновения КНЭ.

Согласно ГОСТ 32144 и стандарту EN 50160 возмущения напряжения характеризуются следующими основными показателями:

1. глубиной (ΔU) — отклонением от опорного напряжения (U_{on} — в соответствии с ГОСТ 32144 считают равным номинальному или согласованному напряжению электропитания);
2. длительностью (τ) — временем возмущения;
3. видом (симметричные и несимметричные возмущения);
4. частотой возникновения.

Проведенный анализ надежности воздушных линий электропередачи (ВЛ) 6 и 35 кВ позволил выделить основные факторы, действующие на надежность ВЛ:

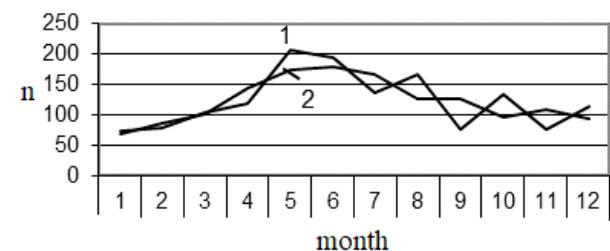
а) климатические факторы — грозовые перенапряжения, гололед, мокрый снег с ветром, схлест и обрыв проводов при ветре выше расчетного, падение деревьев на ВЛ из-за слабых грунтов, подвижки льда на озерах и т.п.;

б) случайные факторы — наезд транспортных средств или воздействие строительных механизмов, пожары, порывы водоводов и нефтепроводов, набросы на токоведущие части, бой изоляторов и другие действия посторонних лиц;

в) эксплуатационные факторы — некачественное проектирование и строительство ВЛ, старение оборудования, невыполнение в полном объеме требований и действующих правил проведения планово-предупредительных ремонтов, повреждение присоединенного оборудования и т.п.;

г) последняя группа факторов — неустановленные.

Распределение числа отказов ВЛ по месяцам представляет собой временной ряд y_i , в котором число отказов упорядочено по месяцам года в сети 35 и 6 кВ. На рисунке 1 приведено суммарное число отключений по месяцам для типового нефтегазодобывающего управления (НГДУ).



1 — кривая отключений;
2 — сглаженная кривая отключений

1 — tripping characteristic;
2 — smoothed tripping characteristic

Рисунок 1. Число аварийных отключений ВЛ

Figure 1. Number of emergency shutdowns of overhead lines

Как показал анализ аварийных отключений, пик отключений приходится на грозовой весенне-летний период.

Анализ КНЭ показал, что 90–95 % провалов напряжения, которые вызваны грозовой активностью, характеризуются относительно умеренной интенсивностью (остаточное напряжение при провалах порядка 40 % и длительность 0,15–1,10 с), при этом они затрагивают оба ввода и сопровождаются аварийными режимами, например, короткими замыканиями. Короткие замыкания являются внешними по отношению к объекту, в данном случае возможны прерывания напряжения длительностью до нескольких секунд, затрагивают они лишь один ввод.

В [6, 7] приведена классификация падений напряжения по причине возникновения, также в координатах ΔU и t показаны наиболее вероятные области с характеристиками падений напряжения энергосистемы; аварии в удаленных сетях среднего напряжения; аварии в рассматриваемой сети среднего напряжения; пуск мощных электродвигателей; короткие замыкания; срабатывание высоковольтных предохранителей.

Одной из важнейших характеристик кратковременных нарушений электроснабжения является количество нарушений, попадающих в заданный диапазон глубины ΔU и длительности t .

Для определения вероятностной характеристики кратковременных нарушений электроснабжения необходимо найти функции плотности распределения времени длительности кратковременных нарушений электроснабжения для заданного диапазона глубины ΔU и распределения глубины для заданного диапазона длительности Δt , которые, по сути, являются вероятностной моделью кратковременных нарушений электроснабжения. При этом определялись следующие параметры: проверялась статистическая

информация о глубине ΔU и длительности Δt на достоверность и однородность, определялся минимальный объем выборки, проводилась проверка нулевой гипотезы о виде закона распределения с помощью критерия Колмогорова и критерия χ^2 , критерия Пирсона, производилась оценка параметров закона распределения и оценка вероятности КНЭ по выбранному закону распределения [8, 9].

На рисунке 2 показана гистограмма количества провалов и прерываний в зависимости от длительности для различных значений остаточного напряжения в процентах от опорного.

На рисунке 3 приведены функции плотности вероятности длительности провалов для различных диапазонов остаточного напряжения, которые позволяют определить вероятность отключения потребителя при нарушении устойчивости его работы.

Анализ гистограммы частот позволил выдвинуть нулевую гипотезу H_0 о функции распределения времени длительности КНЭ для заданного диапазона глубины провала напряжения, выраженной в процентах, ΔU и функции распределения глубины ΔU для заданного диапазона длительности Δt . Так, для смешанных кабельных и воздушных электрических сетей при остаточном напряжении $70 > U_{ост} \geq 40$ В эмпирическое распределение длительности КНЭ может быть описано законом Вейбулла-Гнеденко с функцией плотности $f(t) = 0.0039 \cdot t \cdot 0.35 \cdot \exp(-0.00297 \cdot t^{1.35})$ с параметрами $\alpha = 1,35$ и $\beta = 338$.

Критерий Колмогорова $D = 0,126$, значимость равна 0,156 степеней свободы $r = 39$. Вывод: «распределение не отличается от теоретического».

Критерий $\chi^2 = 4,77$, значимость равна 0,3117, степеней свободы $r = 4$.

Согласно результирующим уровням значимости двух критериев можно принять нулевую гипотезу H_0 распределения

Вейбулла-Гнеденко. При $U_{ocm} = 0$ — нормальное.

Плотность вероятности глубины ΔU для заданного диапазона времени длительности КНЭ $0,2 < \tau \leq 0,4$ описана показательным законом с функцией плотности $f(t) = -6,7 \cdot \exp(-6,7 \cdot t)$ с параметрами $\alpha = 6,7$.

Критерий Колмогорова $D = 0,1259$, значимость равна $0,156$ степеней свободы $r = 39$.

Критерий $\chi^2 = 4,77$, значимость равна $0,3117$, степеней свободы $r = 4$.

На рисунке 1 приведены области изменения количества провалов и прерываний напряжения в координатах глубины и длительности, которые построены в стандартах по качеству электроэнергии: в ГОСТ 32144; IEEE std. 1346-1998; IEEE std. 1564-2014. Кроме того, в открытых и

закрытых статистических базах данных (БД) показателей качества электроэнергии, например, в базе данных «DPQ Database» от EPRI.

Зная плотность вероятности, по известной формуле можно определить вероятность глубины падения напряжения и вероятность длительности падения напряжения. Общая вероятность двух независимых событий заданной глубины и длительности определяется как произведение вероятностей этих событий.

В монографии Ершова М.С., Егорова А.В., Трифонова А.А. «Устойчивость промышленных электротехнических систем» предлагается для описания кривой динамической устойчивости (КДУ) при симметричных одноступенчатых провалах напряжения использовать следующую формулу:

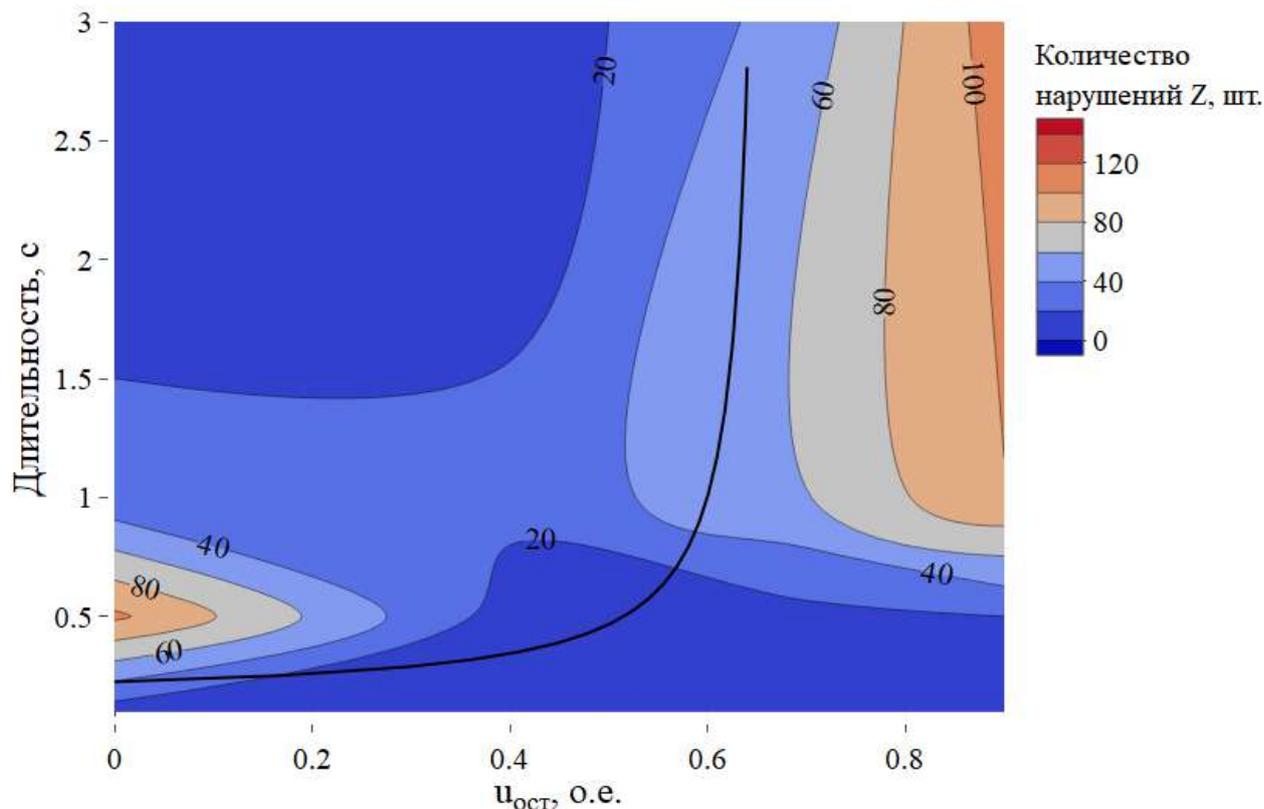


Рисунок 2. Области изменения количества провалов и прерываний напряжения в координатах глубины и длительности

Figure 2. Areas of change in the number of voltage dips and interruptions in the coordinates of depth and duration

$$\tau(U_{res}) = \tau_0 \cdot \frac{1 - U_{res}}{1 - \frac{U_{res}}{U_{ss}}}, \quad (1)$$

где τ — глубина провала напряжения, с;
 τ_0 — запас устойчивости при прерывании напряжения до нуля, с;
 U_{ocm} — остаточное напряжение, о.е.;
 U_{cy} — напряжение статической устойчивости, о.е.

Ущерб от КНЭ для вышеуказанного случая определяется выражением

$$Y = Q \cdot C \cdot P,$$

где Q — объем добычи за время T ;

C — цена на нефть,

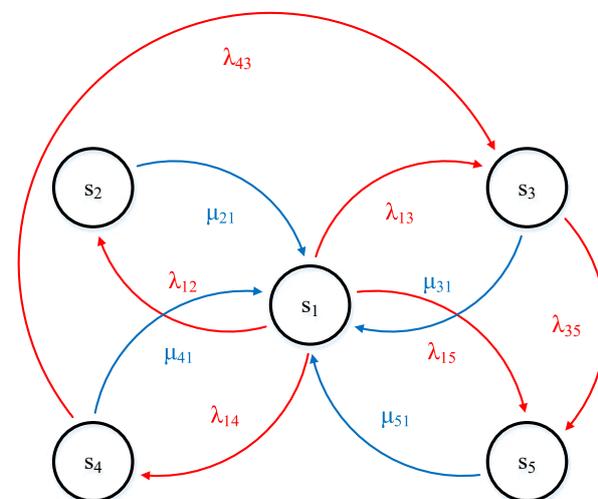
P — общая вероятность двух независимых событий заданной глубины и длительности.

Оценку вероятностей, характеризующих время пребывания в состояниях КНЭ, целесообразно определять на основе теории Марковских случайных процессов. Марковская модель КНЭ представлена на рисунке 3. Вероятности состояний как функции времени являются решением системы дифференциальных уравнений Колмогорова. Известно, что если число состояний конечно, и переходы возможны из каждого состояния в каждое другое за один или несколько шагов (эти условия выполняются в нашем случае), то на достаточном удалении от начала функционирования существуют предельные (стационарные) вероятности состояний, не зависящие от времени и начального состояния системы. Стационарные вероятности равны среднему относительному времени пребывания системы в данном состоянии.

Значения стационарных вероятностей определяются как решение системы алгебраических уравнений, которые составлены для известного графа состояния (рисунок 3).

Интервалы времени нахождения системы электроснабжения при КНЭ в различных состояниях вычисляются по

результатам решения системы уравнений Колмогорова, составленной для пяти основных состояний системы электроснабжения.



Состояние системы электроснабжения:
 S1 — работоспособное состояние системы электроснабжения; S2 — состояние успешного самозапуска электродвигателя; S3 — состояние неуспешного самозапуска; S4 — состояние отказа устройства повышения динамической устойчивости электродвигателя технического обслуживания; S5 — состояние аварийно-восстановительного ремонта системы электроснабжения

Power supply system status:
 S1 — operable state of the power supply system; S2 — state of successful self-starting of the electric motor; S3 — unsuccessful self-start state; S4 — failure state of the maintenance motor dynamic stability enhancer; S5 — the state of emergency recovery repair of the power supply system

Рисунок 3. Граф состояний системы электроснабжения

Figure 3. Power supply system state graph

Определяются следующие интенсивности переходов:

λ_{12} — интенсивность отказов системы электроснабжения, связанных с кратковременными нарушениями электроснабжения, при этом самозапуск электродвигателя успешен;

λ_{13} — интенсивность отказов системы электроснабжения, связанных с кратковременными нарушениями электроснабжения, при этом самозапуск электродвигателя неуспешен;

λ_{14} — интенсивность отказов устройства повышения динамической устойчивости электродвигателей, связанных с кратковременными нарушениями электроснабжения;

λ_{15} — интенсивность перерывов системы электроснабжения, связанных с кратковременными нарушениями электроснабжения;

λ_{43} — интенсивность отказов системы электроснабжения, если произошел отказ устройства повышения динамической устойчивости электродвигателей, при этом самозапуск электродвигателя неуспешен;

λ_{35} — интенсивность неуспешных самозапусков, приводящих к отключению системы электроснабжения;

μ_{21} — интенсивность восстановления системы электроснабжения (самозапуск электродвигателя успешен); самозапуск электродвигателя неуспешен);

μ_{31} — интенсивность восстановления (самозапуск электродвигателя неуспешен);

μ_{41} — интенсивность восстановления устройства повышения динамической устойчивости;

μ_{51} — интенсивность восстановления системы электроснабжения.

Приняты следующие показатели надежности системы электроснабжения:

t_{cy} — среднее время до возникновения кратковременных нарушений электроснабжения, при этом самозапуск электродвигателя успешен, ч;

t_{ny} — среднее время до возникновения кратковременных нарушений электроснабжения, при этом самозапуск электродвигателя неуспешен, ч;

t_{on} — среднее время наработки на отказ устройства повышения динамической устойчивости, ч;

t_{cp} — среднее время работы системы электроснабжения до возникновения кратковременных нарушений электроснабжения;

t_{ony} — среднее время отключения системы электроснабжения при отказе устройства повышения динамической устойчивости, ч;

t_y — среднее время восстановления системы электроснабжения, если самозапуск электродвигателя успешен, ч;

t_n — среднее время восстановления системы электроснабжения, если самозапуск электродвигателя неуспешен, ч;

t_{yo} — среднее время восстановления устройства повышения динамической устойчивости, ч;

t_c — среднее время аварийного восстановления системы электроснабжения, ч.

Соответствующие интенсивности переходов (рисунок 3) определяются:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{t_{cy}}; \lambda_{13} = \frac{1}{t_{ny}}; \lambda_{14} = \frac{1}{t_{on}}; \lambda_{15} = \frac{1}{t_{cp}}; \lambda_{43} = \frac{1}{t_{ony}};$$

$$\lambda_{35} = \frac{1}{t_{ny}}; \mu_{21} = \frac{1}{t_y}; \mu_{31} = \frac{1}{t_n}; \mu_{51} = \frac{1}{t_{yo}}; \mu_{41} = \frac{1}{t_c}.$$

В соответствии с графом состояний (рисунок 3) система дифференциальных уравнений будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14} + \lambda_{15}) \cdot P_1(t) + \mu_{21} \cdot P_2(t) + \mu_{31} \cdot P_3(t) + \mu_{41} \cdot P_4(t) + \mu_{51} \cdot P_5(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{12} \cdot P_1(t) - \mu_{21} \cdot P_2(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{13} \cdot P_1(t) + \lambda_{43} \cdot P_4(t) - \lambda_{35} \cdot P_3(t) - \mu_{31} \cdot P_3(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_{14} \cdot P_1(t) - \lambda_{43} \cdot P_4(t) - \mu_{41} \cdot P_4(t); \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \lambda_{15} \cdot P_1(t) + \lambda_{35} \cdot P_3(t) - \mu_{51} \cdot P_5(t). \end{cases} \quad (2)$$

Система линейных алгебраических уравнений переходов относительно ста-

ционарных вероятностей $p_i, i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ имеет вид:

$$D(t, P) = \begin{cases} -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14} + \lambda_{15}) \cdot P_1 + P_2 \cdot \mu_{21} + \\ + P_3 \cdot \mu_{31} + P_4 \cdot \mu_{41} + P_5 \cdot \mu_{51} = 0; \\ P_1 \cdot \lambda_{12} - P_2 \cdot \mu_{21} = 0; \\ P_1 \cdot \lambda_{13} + P_4 \cdot \lambda_{43} - P_3 \cdot \lambda_{35} - P_3 \cdot \mu_{31} = 0; \\ P_1 \cdot \lambda_{14} - P_4 \cdot \lambda_{43} - P_4 \cdot \mu_{41} = 0; \\ P_1 \cdot \lambda_{15} + P_3 \cdot \lambda_{35} - P_5 \cdot \mu_{51} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Система уравнений является однородной и должна решаться с условием нормировки:

$$\sum p_i = 1.$$

На рисунке 2 приведена граница динамической устойчивости для УЭЦН в координатах длительности и глубины провалов напряжения, из которой можно

по вышеуказанной методике определить вероятность останова УЭЦН и ущерб

$$Y = Q_{np} \cdot T_{сум.п} \cdot C,$$

где Q_{np} — суммарная производительность технологического оборудования во время простоя;

$T_{сум.п}$ — суммарное время пребывания системы энергоснабжения (СЭ) в различных состояниях, связанных с простоем технологического оборудования;

C — цена на нефть.

Решение системы дифференциальных уравнений определяется с помощью процедуры интегрирования системы дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты при помощи программного средства символьной математики Derive:

$$\begin{aligned} P_1 &= (\mu_{21}(\lambda_{35} + \mu_{31})(\lambda_{43} + \mu_{41})\mu_{51}) / (\lambda_{14}(\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{31})\mu_{51} + \lambda_{35}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{51})) + \\ &+ (\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{13}\mu_{21}(\lambda_{35} + \mu_{51}) + (\lambda_{35} + \mu_{31})(\lambda_{15}\mu_{21} + (\lambda_{12} + \mu_{21})\mu_{51}))); \\ P_2 &= (\lambda_{12}(\lambda_{35} + \mu_{31})(\lambda_{43} + \mu_{41})\mu_{51}) / (\lambda_{13}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{35} + \mu_{51}) + (\lambda_{35} + \mu_{31}) \times \\ &\times (\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{15}\mu_{21} + (\lambda_{12} + \mu_{21})\mu_{51} + \lambda_{14}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{31})\mu_{51}\lambda_{35}(\lambda_{43} + \mu_{51}))); \\ P_3 &= (\mu_{21}(\lambda_{14}\lambda_{43} + \lambda_{13}(\lambda_{43} + \mu_{41})\mu_{51})) / (\lambda_{13}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{35} + \mu_{51}) + (\lambda_{35} + \mu_{31}) \times \\ &\times (\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{15}\mu_{21} + (\lambda_{12} + \mu_{21})\mu_{51} + \lambda_{14}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{31})\mu_{51} + \lambda_{35}(\lambda_{43} + \mu_{51}))); \\ P_4 &= (\lambda_{14}\mu_{21}((\lambda_{43} + \mu_{41})\mu_{51})) / (\lambda_{13}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{35} + \mu_{51}) + (\lambda_{35} + \mu_{31}) \times \\ &\times (\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{15}\mu_{21} + (\lambda_{12} + \mu_{21})\mu_{51} + \lambda_{14}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{31})\mu_{51} + \lambda_{35}(\lambda_{43} + \mu_{51}))); \\ P_5 &= (\mu_{21}(\lambda_{14}\lambda_{35}\lambda_{43} + \lambda_{13}\lambda_{35}(\lambda_{43} + \mu_{41}) + \lambda_{15}(\lambda_{35} + \mu_{31})(\lambda_{43} + \mu_{41}))) / \\ &/ (\lambda_{13}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{35} + \mu_{51}) + (\lambda_{35} + \mu_{31})(\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{15}\mu_{21} + (\lambda_{12} + \mu_{21})\mu_{51} + \\ &+ \lambda_{14}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{31})\mu_{51} + \lambda_{35}(\lambda_{43} + \mu_{51}))). \end{aligned} \quad (4)$$

Суммарное время пребывания СЭ в различных состояниях (кроме состояний работоспособности) определяется по выражению:

$$t_{\Sigma П} = \int_0^T p_3(x) dx + \int_0^T p_4(x) dx + \int_0^T p_5(x) dx. \quad (5)$$

Выражение (5) определяется с помощью типовых процедур программного

средства символьной математики Mathcad.

Время T следует понимать как период нахождения СЭ в работоспособном состоянии с полученным в данном расчете коэффициентом готовности. По условию это время должно быть больше нуля и меньше (или равно) правой границе интегрирования системы уравнений (параметр b).

Время восстановления работоспособности СЭ после КНЭ определяется по выражению:

$$t_5 = \int_0^T p_5(x) dx.$$

Путем изменения показателей надежности объекта и, в частности, показателей его ремонтпригодности (которые зависят от проведения диагностирования ЦНА следует добиваться минимизации функционала эффективности системы технического обслуживания (ТО) и затрат на эксплуатацию.

Таким образом, определено, что коэффициент готовности СЭ при КНЭ равен $K_r = 0,491$. При этом через $T = 1600$ ч сле-

дует проводить полное восстановление (регенерацию) СЭ продолжительностью работ, равной $t_4 = 110,574$ ч. Рассчитанная эффективность ТО определяется функционалом отношения, величина которого равна $J = 0,492$, который недостаточно высок.

Выводы

Таким образом, получены зависимости вероятности простоя технологического оборудования, которые позволяют экономически обосновать технические решения по снижению числа аварийных остановок применительно к провалам и прерываниям напряжения систем электроснабжения.

Список источников

1. Gayatri Sarman K.V.S.H., Madhu T., Mallikharjuna Prasad A. Fault Diagnosis of BLDC Drive Using Advanced Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System // *Soft Computing*. 2021. Vol. 25. No. 20. P. 12759-12774. DOI: 10.1007/s00500-021-06046-z.
2. Al-Janabi S., Rawat S., Patel A., Al-Shourbaji I. Design and Evaluation of a Hybrid System for Detection and Prediction of Faults in Electrical Transformers // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2015. 67. P. 324-335. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.12.005.
3. Losev F.A., Prokopchuk I.A., Sushkov V.V. The Stability Assessment of Responsible Oilfield Power Consumers // 13th International IEEE Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines», Dynamics 2019, Omsk, 5 November 2019 — 7 November 2019. 2019. Art. No. 8944696, DOI: 10.1109/Dynamics47113.2019.8944696.
4. Лосев Ф.А., Сушков В.В., Тимошкин В.В., Мартьянов А.С. Повышение устойчивости погружных электродвигателей установок электрических центробежных насосов при провалах напряжения с помощью адаптивной защиты минимального напряжения // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329, № 10. С. 40-48.
5. Gladkikh T.D., Sushkov V.V. The Method of Distribution of Entering Emergency Restrictions Volumes of Power Consumption of Oilfield Consumers in Western Siberia When There Is a Power Shortage in the Power System // *Industrial Power Engineering*. 2010. No. 10. P. 23-26.
6. Сушков В.В., Матаев Н.Н., Кулаков С.Г., Емелина Н.М., Басырова Т.Д. Надежность, техническое обслуживание, ремонт и диагностика нефтегазового оборудования. СПб: Нестор, 2008. 296 с.
7. Sushkov V.V., Freishteter V.P., Pukhalsky A.A. The Assessment of Technological Systems Stability of Oil Production in Case of Power Supply Failures // *Industrial Power Engineering*. 2002. No. 6. P. 44-48.
8. Пат. № 2213270 РФ. Метод определения технического состояния погружных электроустановок для добычи нефти / Н.Н. Матаев, С.Г. Кулаков, С.А. Никончук. 2003.
9. Terzija V.V. Adaptive Underfrequency Load Shedding Based on the Magnitude of the Disturbance Estimation // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2006. Vol. 21. Issue 3. P. 1260-1266.

References

1. Gayatri Sarman K.V.S.H., Madhu T., Mallikharjuna Prasad A. Fault Diagnosis of BLDC Drive Using Advanced Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System. *Soft Computing*, 2021, Vol. 25, No. 20, pp. 12759-12774. DOI: 10.1007/s00500-021-06046-z.
2. Al-Janabi S., Rawat S., Patel A., Al-Shourbaji I. Design and Evaluation of a Hybrid System for Detection and Prediction of Faults in Electrical Transformers. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2015, 67, pp. 324-335. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.12.005.
3. Losev F.A., Prokopchuk I.A., Sushkov V.V. The Stability Assessment of Responsible Oilfield Power Consumers. *13th International IEEE Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines», Dynamics 2019, Omsk, 5 November 2019 — 7 November 2019*. 2019. Art. No. 8944696, DOI: 10.1109/Dynamics47113.2019.8944696.
4. Losev F.A., Sushkov V.V., Timoshkin V.V., Martyanov A.S. Povyshenie ustoichivosti pogruzhnykh elektrodvigatelyei ustanovok elektricheskikh tsentrobezhnykh nasosov pri provalakh napryazheniya s pomoshch'yu adaptivnoi zashchity minimal'nogo napryazheniya [Increasing Stability of Electric Centrifugal Pumps in Submersible Electromotor to Voltage Sags with Adaptive Undervoltage Protection]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov* — *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2018, Vol. 329, No. 10, pp. 40-48. [in Russian].
5. Gladkikh T.D., Sushkov V.V. The Method of Distribution of Entering Emergency Restrictions Volumes of Power Consumption of Oilfield Consumers in Western Siberia When There Is a Power Shortage in the Power System. *Industrial Power Engineering*, 2010, No. 10, pp. 23-26.
6. Sushkov V.V., Mataev N.N., Kulakov S.G., Emelina N.M., Basyrova T.D. *Nadezhnost', tekhnicheskoe obsluzhivanie, remont i diagnostika neftegazopromyslovogo oborudovaniya* [Reliability, Maintenance, Repair and Diagnostics of Oil and Gas Field Equipment]. Saint-Petersburg, Nestor Publ., 2008. 296 p. [in Russian].
7. Sushkov V.V., Freishteter V.P., Pukhalsky A.A. The Assessment of Technological Systems Stability of Oil Production in Case of Power Supply Failures. *Industrial Power Engineering*, 2002, No. 6, pp. 44-48.
8. Mataev N.N., Kulakov S.G., Nikonchuk S.A. *Metod opredeleniya tekhnicheskogo sostoyaniya pogruzhnykh elektrostanovalok* [Method for Determining the Technical Condition of Electric Submersible Installations for Oil Production]. Patent No. 2213270 RF, 2003. [in Russian].
9. Terzija V.V. Adaptive Underfrequency Load Shedding Based on the Magnitude of the Disturbance Estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, Vol. 21, Issue 3, pp. 1260-1266.



Дмитрий Сергеевич Бухаров
Dmitry S. Bukharov

*кандидат технических наук, заместитель начальника службы —
начальник отдела, Служба автоматизированных систем
диспетчерского управления, Филиал АО «СО ЕЭС»
«Региональное диспетчерское управление энергосистемы
Иркутской области», Иркутск, Россия*

УДК 004.021

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-86-91

ОБ АЛГОРИТМЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ СРАБАТЫВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Актуальность

Выбор уставок дистанционной защиты в большой степени ручная работа, содержащая в себе совокупность однотипных операций, что благоприятно способствует автоматизации этого процесса. При настройке дистанционной защиты необходимо соблюсти основные требования, существенно влияющие на выбор параметров срабатывания защиты: селективность и чувствительность. Любая настройка параметров дистанционной защиты — компромисс выбора между этими двумя требованиями. Выбранные по условию чувствительности уставки должны обеспечивать надежную работу дистанционной защиты при повреждениях оборудования. При этом должна обеспечиваться селективность защиты: параметры настройки дистанционной защиты не должны допускать возможности её ложной работы в нормальном режиме.

Цель исследования

В настоящей работе представлен алгоритм вычисления области срабатывания дистанционной защиты в форме эллипса, который позволяет разместить область срабатывания относительно областей отстроек от утяжеленных нагрузочных режимов на комплексной плоскости активного и реактивного сопротивления. Области отстроек представляют собой окружности. Область срабатывания размещается так, чтобы не пересекаться с областями отстроек (селективность) и иметь максимальный размер (чувствительность). Разработанный алгоритм представляем собой итеративную процедуру, на каждом шаге которой выполняется поиск наилучшего решения, удовлетворяющего заданным начальным условиям. Вычисление области срабатывания состоит из следующих этапов: выбор начального угла наклона линии максимальных моментов, на которой размещается большая ось искомого эллипса; вычисление предварительных размеров осей эллипса; корректировка угла наклона линии максимальных моментов и малой оси эллипса с целью выявления наибольшего размера области срабатывания с учетом требования селективности.

Методы исследования

Используется итерационный метод с поиском на каждом шаге наилучшего решения, удовлетворяющего заданным начальным условиям.

Результаты

Разработанный алгоритм протестирован на различных модельных задачах и на реальных данных. Полученные результаты соотносятся с реальными уставками дистанционных защит. Для повышения точности расчетов необходимо уменьшить шаг расчетов. Уменьшение шага расчетов ведет к пропорциональному увеличению времени вычисления области срабатывания дистанционной защиты.

Ключевые слова: алгоритм, дистанционная защита, область срабатывания, уставка, задача размещения, пусковой орган, утяжеленный режим, итеративный метод, наилучшее решение, сопротивление

ON ALGORITHM FOR COMPUTING OF ELLIPTIC OPERATION REGION OF DISTANCE PROTECTION DEVICES

Relevance

Setting of distance protection devices is more manual process, which consist of a homogenous operations pool. The one is valuable opportunity for the computer aided calculations. In setting of distance protection devices we need to introduce the key requirements: the selectivity and the sensitivity. These requirements are having the significant influence in setting of operating values of distance protection. Any setting of distance protection devices is compromise between the requirements. Selected by the sensitivity condition sets are duty to error-free operation of the distance protection with equipment damages. In this case is duty to the selectivity of the distance protection and the distance protection works with no faulty actuations in normal mode.

Aim of research

In the present work is showed the algorithm for computing of the operation region of distance protection devices with elliptic shape. The algorithm allows to locate the operation region about offset regions of heavy conditions on the complex plane of active and reactive resistance. Offset regions are circles on the complex plane. The operation region is located so that do not cross offset regions (the selectivity requirement) and has maximum size (the sensitivity requirement). The developed algorithm is iterative procedure. On every step of the algorithm we search the best solution, which satisfy the initial requirements. Computation of the operation region consist of the next phases: selecting of the pitch helix angle of the breakdown torque line, on which is line up major axis of the ellipse; computing of previous sizes of ellipse axes; adjusting of the pitch helix angle of the breakdown torque line and minor axis of the ellipse for the purpose of maximum size calculating of the operation region taking account of the selectivity requirement.

Research methods

The iterative method is used with the search at each step for the best solution that satisfies the given initial conditions

Results

The developed algorithm is tested on sets of model tasks and actual data. Obtained results are comparable with actual sets of distance protection devices. For increasing of calculations accuracy we need to decrease calculation steps. Decreasing of calculation steps results in proportional increasing of the computing time of the operation region.

Keywords: algorithm, distance protection, operation region, setting, location problem, fault detector, heavy condition, iterative method, the best solution, resistance

Введение

Модернизация и ввод в работу новых объектов диспетчеризации — основание для актуализации параметров уставок дистанционной защиты (ДЗ). Выбор новых уставок ДЗ может выполняться на основе вычисления точек нагрузок в утяжеленных режимах или с использованием статической характеристики нагрузки [1–4].

Вычисление максимально утяжеленных нагрузочных режимов основывается на моделировании топологии сети комплексным изменением коммутационных состояний оборудования, наиболее пагубно влияющего на нормальный режим работы энергосистемы.

Некорректная настройка пусковых органов ДЗ в случаях реальных коротких

замыканий в электрической сети может привести к несрабатыванию защиты в силу появления больших зон нечувствительности и непопадания параметров аварийного режима в область срабатывания.

Задача выбора уставок ДЗ сводится к задаче размещения области срабатывания ДЗ D с наибольшим размером относительно областей отстройки в утяжеленном режиме на комплексной плоскости активного R и реактивного X сопротивления [5, 6], при этом пересечения областей отстройки и D не допускаются:

$$D \rightarrow \max,$$

$$D \cap D_{y,i} = \emptyset \quad (i = \overline{1, k}),$$

где k — количество расчетных точек нагрузок в условном утяжеленном режиме $ТН_i$ (рисунок 1);

$D_{y,i}$ — область отстройки с радиусом $\varepsilon_i = \mu \cdot Z_{ТН_i}$ ($i = \overline{1, k}$);

μ — коэффициент отстройки от нагрузки;

$Z_{ТН_i} = \sqrt{R_{ТН_i}^2 + X_{ТН_i}^2}$ — полное сопротивление в точке нагрузки $ТН_i$ ($i = \overline{1, k}$).

Из рисунка 1 видно, что размещение области срабатывания дистанционной

защиты D выполняется в достаточно ограниченном пространстве.

Рисунок 1 получен из разрабатываемого программного обеспечения [7], в которое интегрирован нижеописанный алгоритм вычисления области срабатывания ДЗ.

Алгоритм вычисления области срабатывания

Рассмотрим алгоритм вычисления эллиптической области срабатывания на модельном примере.

На рисунке 2 изображены только те области отстройки $D_{y,i}$ ($i = \overline{1, k}$), которые фактически ограничивают максимальные размеры области срабатывания D , $\mu = 0,5$, $k = 40$.

Алгоритм вычисления области срабатывания D состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Вычисляется отрезок с наибольшей длиной, который образуется в результате пересечения прямой линии, проходящей через начало системы координат $O(0; 0)$, и ближайших к $O(0; 0)$ окружностей: границ областей отстройки $D_{y,i}$ ($i = \overline{1, k}$). Выбирается угол наклона φ ЛММ, который

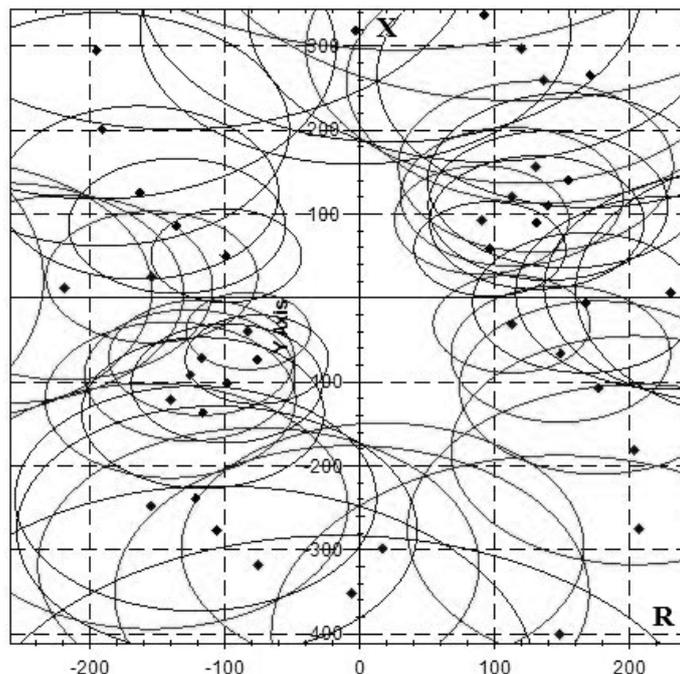


Рисунок 1. Области отстройки от утяжеленных режимов

Figure 1. Areas of detuning from weighted modes

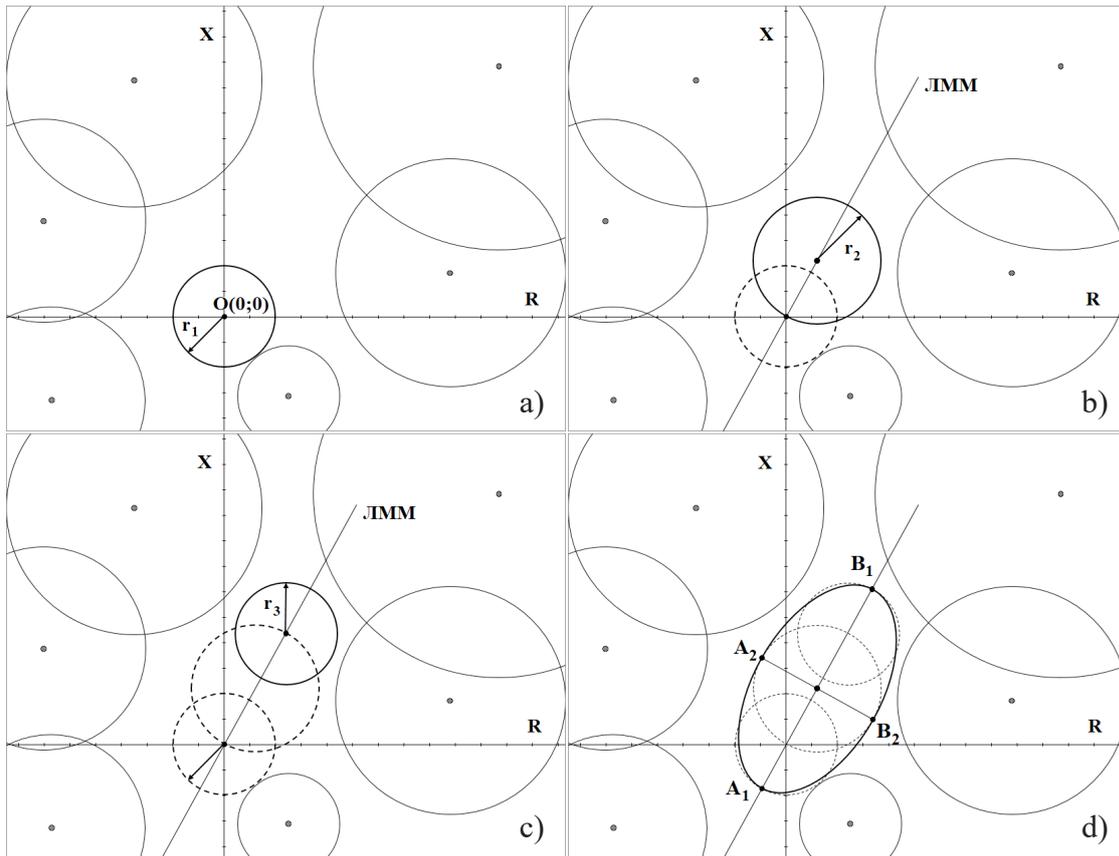


Рисунок 2. Вычисление предварительной формы области срабатывания

Figure 2. Calculation of the preliminary shape of the trigger area

соответствует отрезку с наибольшей длиной ($\varphi = 61^\circ$). Таким образом определяется предварительный угол наклона большой оси области срабатывания D .

Шаг 2. Откладывается окружность радиуса r_1 с центром в $O(0;0)$ — расстояние от $O(0;0)$ до ближайшей границы области отстройки (рисунок 2, a , $r_1 = 20$ Ом).

Шаг 3. Откладывается окружность радиуса r_2 , проходящая через $O(0;0)$, с центром, расположенным на ЛММ (рисунок 2, b , $r_2 = 24,85$ Ом). Радиус r_2 — расстояние от $O(0;0)$ до ближайшей границы области отстройки в угле зрения $\varphi \pm 45^\circ$.

Шаг 4. Откладывается окружность радиуса $r_3 = r_1$ с центром, расположенным на ЛММ на расстоянии $2 \cdot r_2$ от $O(0;0)$ (рисунок 2, c , $r_3 = 20$ Ом). Если окружность с радиусом r_3 пересекается с $D_{y,i}$ ($i = \overline{1,k}$), то r_3 уменьшается так, чтобы исключить пересечения (итерационное уменьшение размера на заданный шаг).

Шаг 5. Строится эллипс с осями $A_1B_1 = r_1 + r_3 + 2 \cdot r_2$, $A_2B_2 = 2 \cdot r_2$ (рисунок 2, d) — предварительная область срабатывания.

Шаг 6. Вычисляется конечный угол наклона φ_1 ЛММ и размер оси A_2B_2 : в угле зрения $\varphi \pm 45^\circ$ с шагом в один градус и фиксированным размером A_1B_1 выполняется расчет таких областей срабатывания, чтобы не было пересечений D с $D_{y,i}$ ($i = \overline{1,k}$) и $A_2B_2 \rightarrow \max$. Выбирается наилучший результат.

Результаты вычислительного эксперимента

На рисунке 3, a представлены одинаковые области срабатывания D_1 и D_2 , полученные на шаге 5. Длина осей составляет $A_1B_1 = 89,7$ Ом, $A_2B_2 = 49,7$ Ом, $\varphi_{D_1} = 71^\circ$, $\varphi_{D_2} = 56^\circ$. При таких параметрах возможно множество вариантов размещения области срабатывания: любой угол наклона φ_1 в диапазоне $[\varphi_{D_2}; \varphi_{D_1}]$.

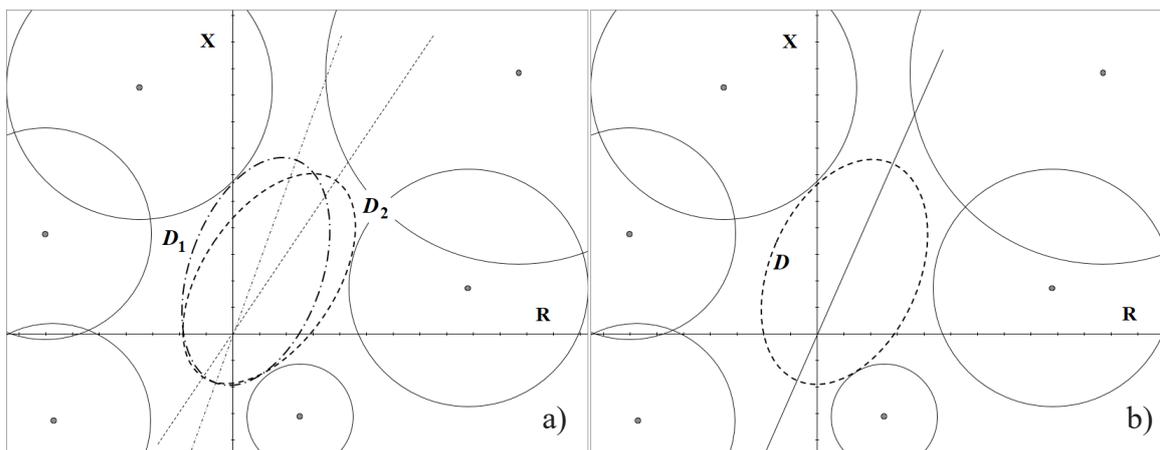


Рисунок 3. Результаты вычислений

Figure 3. Calculation results

На рисунке 3, *b* представлен конечный результат вычислений: $A_1B_1 = 89,7$ Ом, $A_2B_2 = 56$ Ом, $\varphi_1 = 66^\circ$. Для вычисления оси A_2B_2 (итерационное увеличение размера) использовался шаг в 1 Ом с округлением до целых.

Общее время вычислений, выполненных на компьютере с процессором Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ CPU 2.80 GHz под управлением операционной системы Windows 10, составило 13 с.

Уменьшение шага вычисления оси A_2B_2 или угла наклона φ_1 пропорционально увеличивает время вычисления области срабатывания.

Выводы

Разработанный алгоритм расчёта уставок ДЗ, реализованный в рамках ранее упомянутого программного обеспечения [7], позволяет освободить специалистов по релейной защите от выполнения рутинных вычислений и предоставить начальные параметры для настройки уставок ДЗ, которые при необходимости могут быть скорректированы вручную.

В процессе выполнения вычислительных экспериментов на модельных и реальных данных выявлены следующие особенности.

— Радиус r_1 , вычисляемый на шаге 2, может сразу определить конечный размер области срабатывания с формой в виде

окружности, $r_1 \approx 2 \cdot r_2$, $r_3 \rightarrow 0$, изменение угла наклона φ практически не влияет на результат.

— Радиус r_2 , вычисляемый на шаге 3, приближенно равен радиусу r_1 , и $r_3 \rightarrow 0$, при этом изменение угла наклона φ не дает существенного улучшения конечного результата.

— Радиус r_2 , вычисляемый на шаге 4, на реальных данных (например, как на рисунке 1) практически не требует своего изменения, поскольку пространство, доступное для размещения области срабатывания, имеет существенно вытянутую форму.

— Угол зрения $\varphi \pm 45^\circ$, используемый на шаге 6, может быть существенно уменьшен при расчетах на реальных данных, поскольку отсутствует необходимая степень свободы. На практике установлено, что достаточным является угол зрения равный $\varphi \pm 15^\circ$.

Поскольку представленный алгоритм на шагах 1, 3 и 6 содержит переборные компоненты поиска наилучшего решения, мы можем ускорить алгоритм, введя в него некоторые компоненты направленного поиска. Однако в текущей ситуации вычисление области срабатывания ДЗ выполняется за приемлемое время и не доставляет дискомфорта при работе с программным обеспечением.

Список источников

1. Kondrashov M.A., Popov M.G., Bukharov D.S., Petrushin D.E. Development of a Cluster Analysis Method for Solving the Problem of Identifying Static Voltage Load Characteristics // 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1546. 2020. P. 012085. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012085.

2. Kondrashov M., Pankratov A., Batseva N. The Architecture and Functionality of the Software to Identify the Actual Voltage Static Load Characteristics of Large Consumers // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2019. P. 1–5. DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729660.

3. Кондрашов М.А., Кондрашова А.Ю. Программное обеспечение для идентификации фактических статических характеристик нагрузки по напряжению крупных потребителей // Прикладная информатика. 2018. № 5. С. 44-50.

4. Расчеты и анализ режимов работы сетей: учеб. пособие для вузов / Под ред. В.Л. Веникова. М.: Энергия, 1974. 336 с.

5. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1991. 496 с.

6. Чернобровов Н.В. Релейная защита: учеб. пособие для техникумов. М.: Энергия, 1971. 624 с.

7. Гусев Р.А., Бухаров Д.С. К вопросу о разработке программного обеспечения для мониторинга и анализа работы дистанционной защиты // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2020. № 1. С. 40-46. DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-40-46.

2. Kondrashov M., Pankratov A., Batseva N. The Architecture and Functionality of the Software to Identify the Actual Voltage Static Load Characteristics of Large Consumers. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729660.

3. Kondrashov M.A., Kondrashova A.Yu. Программное обеспечение для идентификации фактических статических характеристик нагрузки по напряжению крупных потребителей [Software to Identify the Actual Voltage Steady State Load Characteristics Identification of Large Consumers]. *Prikladnaya informatika — Journal Applied Informatics*, 2018, No. 5, pp. 44–50. [in Russian].

4. *Raschety i analiz rezhimov raboty setey: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Calculating and Analyzing of Network Modes: Manual for Universities]. Under the Editorship of V.L. Venikov. Moscow, Energiya Publ, 1974. 336 p. [in Russian].

5. Andreev V.A. *Releynaya zashhita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Relay Protection and Automation Control of Electricity Supply Systems: Manual for Universities]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 496 p. [in Russia].

6. Chernobrovov N.V. *Releynaya zashhita: uchebnoe posobie dlya tekhnikumov* [Relay Protection: Manual for Colleges]. Moscow, Energiya Publ., 1971. 624 p. [in Russia].

7. Gusev R.A., Bukharov D.S. К вопросу о разработке программного обеспечения для мониторинга и анализа работы дистанционной защиты [Revisiting the Development of a Software for Monitoring and Analyzing of Distance Protection Devices]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2020, No. 1, pp. 40–46. DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-1-40-46. [in Russian].

References

1. Kondrashov M.A., Popov M.G., Bukharov D.S., Petrushin D.E. Development of a Cluster Analysis Method For Solving the Problem of Identifying Static Voltage Load Characteristics. *2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1546*, 2020, pp. 012085. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012085.



Артём Сергеевич Родионов
Artyom S. Rodionov

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Физика»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
Уфа, Россия



Юрий Александрович Жаринов
Yuri A. Zharinov

кандидат педагогических наук,
доцент кафедры
«Информационные технологии»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет, филиал,
Салават, Россия



Елена Вячеславовна
Старцева
Elena V. Startseva

студент кафедры
«Информационные
технологии»,
Уфимский
государственный
нефтяной технический
университет, филиал,
Салават, Россия



Никита Сергеевич
Суслов
Nikita S. Suslov

студент кафедры
«Информационные
технологии»,
Уфимский
государственный
нефтяной технический
университет, филиал,
Салават, Россия



Ольга Юрьевна
Шишкина
Olga Yu. Shishkina

студент кафедры
«Информационные
технологии»,
Уфимский
государственный
нефтяной технический
университет, филиал,
Салават, Россия

УДК 004.04

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-92-99

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Актуальность

Нефтегазовая отрасль в настоящее время является неотъемлемой частью экономики многих стран. Топливные ресурсы постоянно используются в промышленной сфере, а также оказывают влияние почти на все сферы человеческой жизни. В отрасли с каждым годом внедряется всё больше технологий, которые предлагают различные способы объединения цифрового и реального мира на различных вариантах

погружения. Использование подобных технологий позволяет не только в значительной степени увеличить возможности персонала, но и повысить уровень обучения персонала, например технике безопасности.

Цель исследования

В статье ставится цель рассмотреть возможности использования дополненной реальности как новой современной технологии в разработке программного комплекса обучения для высших учебных заведений. Анализируется актуальность проблемы разработки технологии дополненной реальности в сфере нефтегазовой отрасли и образования.

Методы исследования

Были использованы следующие методы: обзор научной литературы, анализ использования существующих методов дополненной реальности в образовании.

Результаты

Обоснована целесообразность использования технологии дополненной реальности при профессиональной подготовке студентов к работе с зарубежными специалистами на нефтехимических предприятиях. Предложена методика применения дополненной реальности при изучении английского языка в техническом вузе.

Ключевые слова: дополненная реальность, технология, образование программный продукт, архитектура, иностранный язык

SOFTWARE COMPLEX OF TRAINING BASED ON AUGMENTED REALITY TECHNOLOGIES

Relevance

The oil and gas industry is currently an integral part of the economy of many countries. Fuel resources are constantly used in the industrial sphere, and also have an impact on almost all areas of human life. More and more technologies are being introduced in this industry every year, which offer different ways of combining the digital and real world on different immersion options. The use of such technologies allows not only to significantly increase the capabilities of personnel, but also will improve the level of personnel training, for example, in safety.

Aim of research

The article aims to consider the possibilities of using augmented reality as a new modern technology in the development of a software training complex for universities. The urgency of the problem of developing augmented reality technology in the oil and gas industry and education is analyzed.

Research methods

The following methods were used: a review of scientific literature, an analysis of the use of existing augmented reality methods in education.

Results

The expediency of using augmented reality technology in the professional training of students for working with foreign specialists at petrochemical enterprises has been substantiated. A method of using augmented reality in learning English at a technical university is proposed.

Keywords: augmented reality, technology, education software product, architecture, foreign language

В современном мире нефтегазовая отрасль является неотъемлемой частью экономики многих стран. Топливные ресурсы постоянно используются в промышленной сфере, а также оказывают влияние почти на все сферы человеческой жизни. В отрасли с каждым годом внедряется всё больше технологий, которые предлагают различные способы объединения цифрового и реального мира на различных вариантах погружения. Использование подобных технологий позволяет не только в значительной степени увеличить возможности персонала, но и повысить уровень обучения персонала, например технике безопасности. Одной из таких технологий является дополненная реальность — Augmented reality (AR).

Так, например, дополненную реальность в нефтегазовой отрасли применяет компания GE Oil & Gas, используя AR-приложение для удаленного контроля над трубопроводами на предмет утечек нефти и газа на труднодоступных месторождениях. Дополненная реальность может позволить решить большое количество задач, так как при использовании данной технологии улучшается всё производство в целом: повышается производительность рабочего персонала, а значит, и производственных процессов, увеличиваются возможности, которые может выполнить персонал [1].

Дополненная реальность довольно медленно входит в нефтегазовую отрасль, сейчас она находится только в самом начале своего пути, но тем не менее данная технология развивается, и в ближайшем будущем (через 3–5 лет) она сможет изменить все имеющиеся на данный момент традиционные операционные функции. Крупнейшие предприятия нефтяной промышленности уже сотрудничают с такими компаниями, как Microsoft и Google для внедрения решений производственных задач с использо-

ванием технологии AR. Технологические стартапы тоже не отстают и разрабатывают индивидуальные решения для конкретных предприятий [2].

Рост применения современных информационных технологий может объяснить история развития нефтегазовых компаний. Так, в 2000-х годах произошёл скачок в области цифровых технологий, главное последствие того времени — резкое повышение количества данных, и, как следствие, увеличение количества методов для их обработки и дальнейшей работы с ними.

Крупные нефтяные компании начинают использовать цифровые технологии: прибегают к использованию роботов и дронов, используют 3D визуализацию, применяют Интернет вещей, технологии искусственного интеллекта, а также технологии виртуальной и дополненной реальности [3].

Все эти системы похожи между собой по основным целям и локальным задачам: они призваны с высокой степенью достоверности моделировать различные сценарии развития ситуации на нефтегазовом производстве и предоставлять возможность выбора наиболее оптимальных решений (в том числе и по увеличению эффективности использования высококвалифицированных специалистов компании).

Неудивительно, что в сложившейся ситуации цифровые технологии находят все большее применение и в нефтегазовом секторе. Ведущие игроки рынка пришли к консенсусу, который заключается в том, что цифровизация приносит им новые ощутимые конкурентные преимущества. Поэтому для подготовки будущих специалистов в высших учебных заведениях нефтегазовой отрасли необходимо использовать технологии дополненной реальности.

Использование концепций дополненной реальности становится все более рас-

пространственным в области образования, о чем можно судить по количеству новых создаваемых приложений в данной отрасли [4]. Данные приложения нацелены на обучение дисциплинам за счёт использования технологии визуализации, они охватывают различные области образования.

Данная работа направлена на анализ, обработку и создание методики изучения иностранного языка с использованием AR в высших учебных заведениях. В статье рассмотрены методы и технологии создания дополненной реальности. Помимо этого, в статье представлены наработки приложения с поддержкой дополненной реальности, а именно, программы самопроверки по иностранному языку для технических вузов.

На данный момент аналогами для разрабатываемого приложения являются продукты, использующие технологию дополненной реальности в методике обучения иностранному языку: Toy stories: English for kids, Tokyo Shoseki, Moondly AR, Animal 4D+ [5].

Данные приложения, использующие технологию дополненной реальности для обучения английскому языку, преимущественно направлены на обучение детей дошкольного возраста, младших и средних классов образовательных учрежде-

ний и не включают в себя программу для студентов высших учебных заведений. Также перечисленные выше приложения не содержат в себе термины, необходимые для изучения технического английского языка, который можно использовать на предприятиях нефтегазовой отрасли.

На рисунке 1 изображена архитектура, описывающая процесс работы программы с использованием технологии дополненной реальности.

Для работы приложения необходим смартфон на ОС Android и ПК, работающий под управлением ОС Windows. После запуска программ на обеих платформах установленное на смартфоне приложение обращается к базе данных Vuforia и распознаёт таргет, изображённый на экране компьютера, который сохранён в этой базе данных; маркеры распознаются камерой с помощью алгоритма поиска ключевых точек на изображении, что и делает его маркером в базе данных Vuforia. После этого приложение использует модель из этой базы данных, привязанную к этому маркеру.

Затем пользователь может увидеть 3D модель на экране своего смартфона, наведя его на маркер из приложения на ПК. Когда это происходит, приложение на смартфоне обращается к базе данных,



Рисунок 1. Схема работы приложения

Figure 1. Scheme of the application

сверяет маркер и показывает соответствующую 3D модель. Предлагаемое решение состоит из программы-самопроверки (рисунок 2), содержащей задания для самостоятельной проверки знаний по английскому языку, и мобильного приложения для операционной системы Android, которое позволяет использовать элементы дополненной реальности при изучении иностранного языка.

Одним из таких заданий (рисунок 3) является задача о сопоставлении наименования предмета с самим предметом, а именно с периферийным устройством.

При наведении камеры смартфона на QR-коды появляется 3D модель объекта, обучающемуся предлагается сопоставить ее со словом из предложенного списка.

При верном расположении слов в ячейках под картинками текст изменяет свой

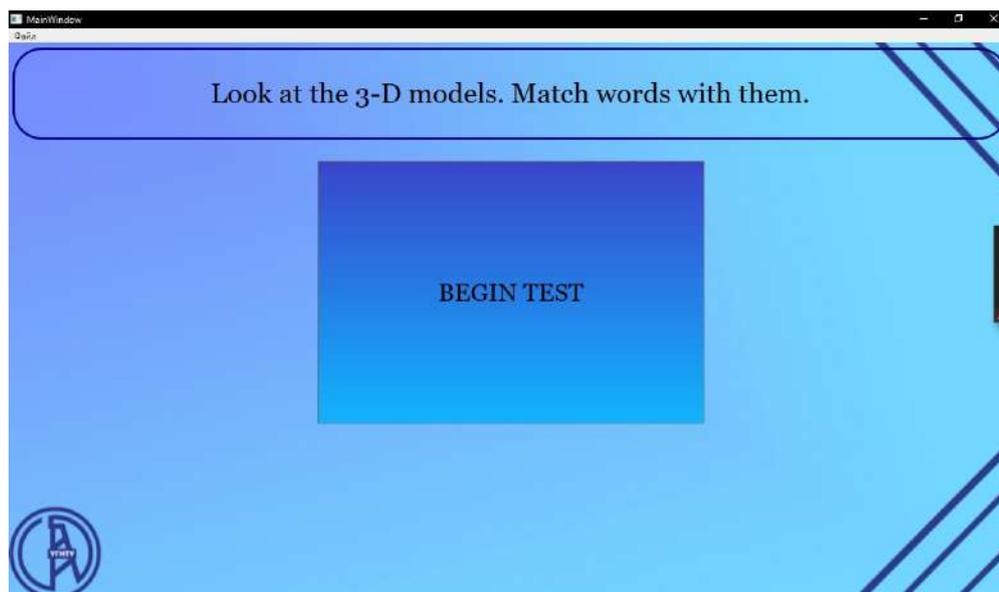


Рисунок 2. Пример задания учебника

Figure 2. An example of a textbook task



Рисунок 3. Работа программы с поддержкой дополненной реальности

Figure 3. Work of the program with support for augmented reality

цвет: на красный, если ответ является неверным, и на зеленый при верном сопоставлении слова с предметом (рисунок 4).

При нажатии на кнопку «Check» выводится окно обработки результатов. В данном окне можно увидеть количество

совершенных попыток, количество ошибок и верных ответов. Это поможет пользователю проанализировать свои знания и пробелы в них (рисунок 5).

Основные ожидаемые результаты от внедрения описанного программного



Рисунок 4. Проверка на правильность ввода слова

Figure 4. Checking for the correct word input



Рисунок 5. Обработка результатов

Figure 5. Processing of results

комплекса при изучении английского языка, а в перспективе и в других социально-гуманитарных дисциплин следующие:

- увеличение вовлечения в обучение до 30 %;
- упрощение запоминания информации в области социально-гуманитарных наук благодаря использованию технологии дополненной реальности;
- закрепление информации благодаря методу визуализации, и, как следствие, развитие у обучающихся пространственного мышления;
- упрощение проверки знаний в области социально-гуманитарных наук;
- проявление междисциплинарных связей за счет изучения 3D моделей параллельно с изучением английских терминов.

Список источников

1. Особенности нефтегазовой отрасли [Электронный ресурс]. URL: <https://www.neftegaz-expo.ru/ru/articles/osobennosti-neftegazovoj-otrasli> (дата обращения 20.09.2021).
2. Анализ развития и эффективность внедрения цифровизации в нефтегазовую отрасль [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-razvitiya-i-effektivnost-vnedreniya-tsifrovizatsii-v-neftegazovuyu-otrasl> (дата обращения 20.09.2021).
3. VR/AR — технологии будущего в образовательном процессе студентов сельскохозяйственного вуза [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35434744> (дата обращения 20.09.2021).
4. Топ-25 приложений дополненной реальности в 2020 году [Электронный ресурс]. URL: <https://spark.ru/user/76366/blog/68576/top-25-prilozhenij-dopolnennoj-realnosti-v-2020-godu> (дата обращения 20.09.2021).
5. Цифровизация нефтяной промышленности: базовые подходы и обоснова-

При дальнейшей разработке и редактировании программы будут применены методики обучения подобного типа, основанные на дополненной реальности. Благодаря этому, предложенный учебник и мобильное приложение, поддерживающее дополненную реальность, может помочь обучающимся стать более активными во время занятий.

Выводы

Обоснована целесообразность использования технологии дополненной реальности при профессиональной подготовке студентов к работе с зарубежными специалистами на нефтехимических предприятиях. Предложена методика применения дополненной реальности при изучении английского языка в техническом вузе.

ние «интеллектуальных» технологий [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-neftyanoy-promyshlennosti-bazovye-podhody-i-obosnovanie-intellektualnyh-tekhnologiy> (дата обращения 20.09.2021).

References

1. *Osobennosti neftegazovoi otrasli* [Features of the Oil and Gas Industry] [Electronic Resource]. URL: <https://www.neftegaz-expo.ru/ru/articles/osobennosti-neftegazovoj-otrasli> (accessed 20.09.2021). [in Russian].
2. *Analiz razvitiya i effektivnost' vnedreniya tsifrovizatsii v neftegazovuyu otrasl'* [Analysis of Development and the Effectiveness of the Implementation of Digitalization in the Oil and Gas Industry] [Electronic Resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-razvitiya-i-effektivnost-vnedreniya-tsifrovizatsii-v-neftegazovuyu-otrasl> (accessed 20.09.2021). [in Russian].
3. *VR/AR — tekhnologii budushchego v obrazovatel'nom protsesse studentov sel'skokhozyaistvennogo vuza* [VR/AR — Technologies of the Future in the Educational

Process of Students of an Agricultural University] [Electronic Resource]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35434744> (accessed 20.09.2021). [in Russian].

4. *Top-25 prilozhenii dopolnennoi real'nosti v 2020 godu* [Top 25 Augmented Reality Applications in 2020] [Electronic Resource]. URL: <https://spark.ru/user/76366/blog/68576/top-25-prilozhenij-dopolnennoj-realnosti-v-2020-godu> (accessed 20.09.2021). [in Russian].

5. *Tsifrovizatsiya neftyanoi promyshlennosti: bazovye podkhody i obosnovanie «intellektual'nykh» tekhnologii* [Digitalization of the Oil Industry: Basic Approaches and Substantiation of «Intelligent» Technologies] [Electronic Resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-neftyanoy-promyshlennosti-bazovye-podhody-i-obosnovanie-intellektualnyh-tehnologiy> (accessed 20.09.2021). [in Russian].



**Иван Юрьевич
Холодилин
Ivan Yu. Kholodilin**

*аспирант,
Южно-Уральский
государственный
университет
(Национальный
исследовательский
университет),
Челябинск, Россия*



**Дмитрий Юрьевич
Хрюкин
Dmitry Yu. Khriukin**

*аспирант,
Южно-Уральский
государственный
университет,
(Национальный
исследовательский
университет),
Челябинск, Россия*



**Максим Анатольевич
Григорьев
Maksim A. Grigorev**

*доктор технических наук,
профессор,
заведующий кафедрой
«Автоматизированный
электропривод»,
Южно-Уральский
государственный
университет
(Национальный
исследовательский
университет),
Челябинск, Россия*

УДК 621.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-100-109

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ПОЛУЦИЛИНДРОВ ТРУБЫ СТАНА 1020

Актуальность

В настоящее время особенно актуально усовершенствование производственного оборудования. От степени модернизации производственных мощностей зависят затраты времени на производство единицы продукции, время полезной работы станков, рентабельность использования оборудования, и, самое важное, качество производимой продукции. В условиях нормальной рыночной конкуренции на рынке металлургической продукции качество выпускаемой продукции является ключевым фактором успеха предприятия в борьбе за потребителя, в расширении завоеванных рынков. Отсутствие определенных характеристик, удовлетворяющих, по мнению потребителей, определенным параметрам качества, как правило, становится причиной потери существующих покупателей и отсутствия возможностей завоевания новых. Доля существующих измерительных систем установок контроля геометрии полуцилиндров трубы стана имеют ряд недостатков: низкие энергетические показатели установки; длительное время выполнения технологического процесса; сложность и неоднозначность функционирования алгоритмов контроля геометрии полуцилиндра.

Цель исследования

Обеспечение высоких энергетических показателей и быстродействия системы контроля геометрии полуцилиндров трубы Стана 1020, что реализуется за счет корректной интерпретации информации, получаемой от датчиков в метрическую информацию о геометрии полуцилиндра.

Методы исследования

Для сравнения модернизированной измерительной системы с существующей разрабатываемые методы тестируются в виртуальной среде (программы Unity и Matlab), повторяющей реальный технологический процесс. В реальных экспериментах существует неопределенность измерений, что усложняет сравнение методов между собой. Кроме того, в реальных условиях трудно или невозможно оценить значения определенных параметров: местоположение, ориентацию лазерной плоскости или значение радиуса полуцилиндра, тогда как в среде моделирования они известны. Виртуальная среда, в свою очередь, позволяет устранить данные проблемы.

Результаты

Разработана и изготовлена система технического зрения, позволяющая достичь высоких энергетических показателей и быстродействие системы. Данная измерительная система содержит меньшее количество электрических элементов и механических соединений по сравнению с исходной измерительной системой, что, в свою очередь, увеличивает надежность системы. Более того, посредством предложенного решения сечение полуцилиндра может регистрироваться непрерывно, не требуется останов тележки, а, следовательно, повышаются энергетические показатели установки за счет уменьшения времени выполнения технологического процесса. Также рассмотрен вопрос важности калибровки измерительной системы. Калибровка системы позволила произвести измерение сечения полуцилиндра в допустимых в соответствии с техническим заданием пределах. С помощью разработанной имитационной виртуальной среды удалось добиться улучшенных метрологических характеристик.

Ключевые слова: всенаправленная камера, структурированный свет, семантические данные, unity, среда программирования

MILL 1020 TUBE HALF-CYLINDER GEOMETRY CONTROL SYSTEM

Relevance

Currently, the improvement of production equipment is especially important. The degree of modernization of production facilities determines the time spent on the production of a unit of production, the time of the useful work of the mills, the profitability of the use of equipment, and most importantly, the quality of the products. In the conditions of normal market competition in the market of metallurgical products, the quality of products is a key factor in the success of the enterprise in the struggle for the consumer, in the expansion of the conquered markets. The lack of certain characteristics that satisfy, in the opinion of consumers, certain quality parameters, as a rule, becomes the reason for the loss of existing customers and the lack of opportunities to conquer new ones. The share of existing measuring systems of installations for controlling the geometry of the half-cylinders of the mill pipe have a number of disadvantages: low energy indicators of the installation; long lead time of the technological process; the complexity and ambiguity of the functioning of the algorithms for controlling the geometry of the half-cylinder.

Aim of research

To investigate and optimize the technical implementation of the system in order to ensure high energy performance and speed of the system. As well as investigate and ensure the correct interpretation of the information received from the sensors into metric information about the geometry of the half-cylinder.

Research methods

In order to compare the modernized measuring system with the existing one, the proposed theories and methods are tested on the basis of the developed virtual environment (unity and Matlab programs), which recreates the real technological process. In real experiments, there is measurement uncertainty, which complicates the comparison of methods with each

other. In addition, in real conditions it is difficult or impossible to estimate the values of certain parameters: location, orientation of the laser plane or the value of the radius of a half-cylinder, whereas in the simulation environment they are known. The virtual environment, in turn, eliminates these problems.

Results

An original technical vision system has been developed and manufactured, which allows to achieve high energy indicators and system performance. This measuring system contains fewer electrical components and mechanical connections than a standard measuring system, which in turn increases the reliability of the system. Moreover, by means of the proposed system, the cross-section of the half-cylinder can be scanned continuously, there is no need to stop the measurement equipment, and therefore, the energy parameters of the system increase and the time of the technological process decreases. The issue of the importance of calibrating the measuring system was also raised, which was not touched upon earlier. Calibration of the system made it possible to measure the cross-section of the half-cylinder within the permissible limits, in accordance with the terms of reference. With the help of the developed simulation virtual environment, it was possible to achieve the above results.

Keywords: omnidirectional camera, structured light, semantic data, unity, matlab

Введение

Типовая установка для контроля геометрии полуцилиндров имеет следующий принцип работы: после подачи рольгангом полуцилиндра включается двигатель датчика, осуществляется перемещение датчика с установившейся скоростью. По окончании снятия сечения двигатель датчика останавливается, происходит запуск двигателя тележки, осуществляется перемещение тележки с установившейся рабочей скоростью. Переместившись на заданную длину, двигатель повторно останавливается. Затем регистрируется следующее сечение. Так происходит фиксация шести сечений, после чего включается двигатель для движения в обратную сторону, тележка возвращается в исходное положение. Затем происходит подача следующего полуцилиндра. Однако данная установка имеет ряд недостатков, ниже обозначены основные из них:

— *завышенное время измерения.* Перед снятием сечения полуцилиндра необходима полная остановка тележки. После чего для снятия сечения полуцилиндра необходимо осуществлять и контролировать вращение датчика в пределах измеряемого сечения. Частые пуско-тормозные режимы двигателя тележки и электропривода вращения датчика ведут к повышенному потреблению электроэнергии, а

также данные процессы увеличивают время, затрачиваемое на снятие сечения полуцилиндра. Уменьшить расход электроэнергии можно путем непрерывного движения тележки, что станет возможным за счет уменьшения времени обработки данных измерительного датчика;

— *усложненная конфигурация системы.* Текущая конфигурация элементов, предназначенных для регистрации данных сечения полуцилиндра, содержит: датчик расстояния, двигатель датчика, редуктор, датчик положения, а также усложненную механику. В свою очередь, избыточное количество элементов снижает надежность системы, усложняет режимы программирования системы, увеличивает энергопотребление и повышает требования к техническому обслуживанию эксплуатируемого объекта;

— *невысокие метрологические характеристики.* Текущая система регистрации сечения полуцилиндра содержит механические узлы, за счет чего положение установленного измерительного датчика будет иметь отклонение от требуемого. Следовательно, расчетное и реальное сечения будут отличаться, и, в свою очередь, измерения будут неверны. Для проведения достоверных измерений необходимо определить реальное отклонение датчика.

Данное отклонение может быть получено посредством калибровки системы. В исходной схеме такая задача не решалась.

С учетом сказанного, актуальными являются научно-технические задачи: обеспечение высоких энергетических показателей, быстродействия, а также повышение надежности системы контроля геометрии полуцилиндров за прессом окончательной формовки трубы стана. Процесс модернизации также мотивирован широким использованием системы технического зрения, построенной на базе камеры с широким углом обзора и источником структурированного света [1–3]. Использование данной камеры дает широкий угол обзора, следовательно, больше информации извлекается из окружающей среды, что является преимуществом по сравнению со стандартными камерами [4–6]. Основным преимуществом использования структурированного света для анализа данных является его простой механизм обнаружения и извлечения из исходного изображения [7, 8].

Таким образом, данная система технического зрения получила широкое внимание в научных кругах благодаря своему широкому углу обзора и высокой эффективности измерений [9, 10]. В данной статье также рассматриваются калибровка системы и дальнейшая оценка качества калибровочных параметров посредством измерения геометрии полуцилиндра. Отличительной особенностью данных методов является то, что за счет одного изображения становится возможным произвести калибровку системы и измерение сечения полуцилиндра.

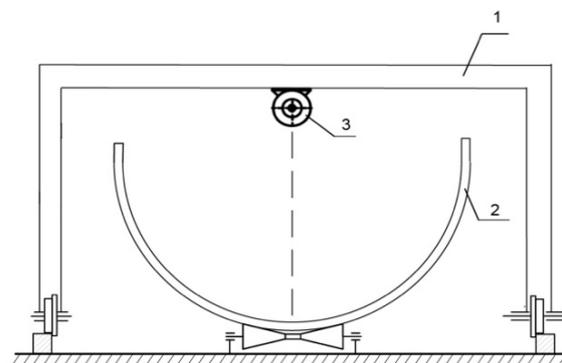
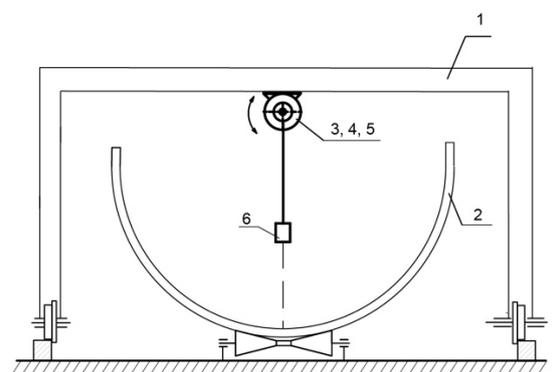
2. Описание предлагаемой измерительной системы и ее преимущества

2.1 Описание предлагаемой измерительной системы

В ходе анализа технологического процесса, а также недостатков типовых уста-

новок контроля геометрии полуцилиндров выявлено, что измерительная система требует существенной модернизации.

Измерительная часть представляет собой систему технического зрения, включающую в свой состав камеру с широким углом обзора, а также лазерный излучатель (структурированный свет). Предлагаемая конфигурация позволила сократить количество электрических и механических элементов по сравнению с исходной системой (рисунок 1).



- 1 — тележка; 2 — полуцилиндр;
3 — двигатель датчика/система
технического зрения; 4 — редуктор;
5 — датчик положения;
6 — измерительный датчик

- 1 — cart; 2 — half-cylinder; 3 — motor
of the sensor/vision system; 4 — reducer;
5 — encoder; 6 — measuring sensor

Рисунок 1. Кинематическая схема типовой и предлагаемой установки контроля геометрии полуцилиндров

Figure 1. Kinematic diagram of a typical and proposed installation for controlling the geometry of half-cylinders

2.2 Модель системы

Для тестирования предлагаемой системы и демонстрации ее возможностей при помощи программной среды Unity разработана виртуальная экспериментальная среда, ориентированная на осуществление контроля геометрии полуцилиндров (рисунок 2).

Разработанный симулятор также поддерживает коммуникационный интерфейс, который может быть использован при работе со сторонними программами, поддерживающими ТСР. Более того, фотореализм современных игровых платформ открывает новые возможности в разработке и оценке методов решения разнообразных задач, устраняя разрыв между виртуальной и реальной средой. Также следует отметить то, что разрабатываемые симуляторы приближаются не только к фотореализму, но и к реалистичному физическому моделированию, которое поддерживается в Unity, тем самым сокращается разрыв между моделируе-

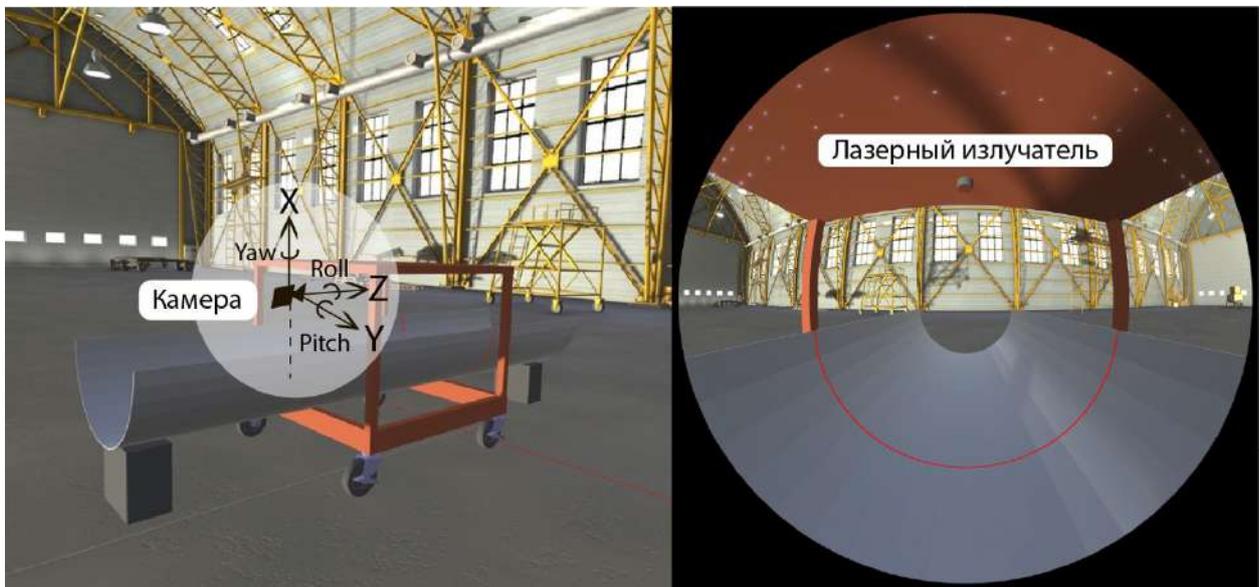
мыми приложениями и реальными миром.

В данной статье рассматривается модель системы компьютерного зрения, включающая в свой состав камеру с широким углом обзора и источник структурированного света. Модель камеры была ранее описана в работе [11].

Принимая во внимание данную информацию, уравнение проекции лазерной плоскости можно записать следующим образом:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ f(\rho) \end{bmatrix} \times [r_1^c \ r_2^c \ r_3^c] [r_1^l \ r_2^l \ r_3^l \ t^l] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = 0, \quad (1)$$

где u, v — координаты пикселей изображения; r_1^c, r_2^c, r_3^c — векторы матрицы поворота камеры; параметры r_1^l, r_2^l, r_3^l, t^l представляют матрицу перехода лазерной плоскости. Полином $f(\rho)$ может быть расписан как:



a) виртуальная модель установки контроля геометрии полуцилиндров; б) снимок камеры

a) virtual model of the half-cylinder geometry control unit; b) snapshot of a camera

Рисунок 2. Виртуальная экспериментальная среда, ориентированная на осуществление контроля геометрии полуцилиндров

Figure 2. Virtual experimental environment focused on the control of the half-cylinder geometry

$$f(\rho) = a_0 + a_2\rho^2 + \dots + a_N\rho^N, \quad (2)$$

$$\rho = \sqrt{(u - u_c)^2 + (v - v_c)^2}, \quad (3)$$

где a_i — коэффициенты;

N — степень полинома;

u_c, v_c — координаты центра изображения.

Лазерная плоскость расположена на фиксированном расстоянии от оптического центра камеры: вдоль оси Z (рисунок 2). Данное расстояние соответствует 3-й строке вектора t^l , следовательно, глобальные координаты вдоль оси Z не изменяются. Таким образом, в уравнении (1) $Z = 0$, и это уравнение можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ f(\rho) \end{bmatrix} \times [r_1^c \ r_2^c \ r_3^c][r_1^l \ r_2^l \ t^l] \begin{bmatrix} Y \\ 1 \end{bmatrix} = 0. \quad (4)$$

2.3 Анализ работы системы

В данном разделе приводится описание того, как решаются проблемы исход-

ной системы измерения за счет применения новых подходов.

Оптимизация по критерию времени технологического процесса. Предлагаемая система технического зрения способна функционировать и передавать изображения в реальном времени и не требует останова двигателя тележки для снятия сечения полуцилиндра, за счет чего уменьшается время технологического процесса, а также снижаются потери в электроприводе.

На рисунке 3 показана нагрузочная диаграмма описанного технологического процесса.

По сравнению с диаграммой, представленной на рисунке 4, видно, что становится возможным сократить время выполнения технологического процесса посредством предлагаемой измерительной системы.

Упрощение конфигурации измерительной системы. Предлагаемая измерительная система, построенная на базе техни-

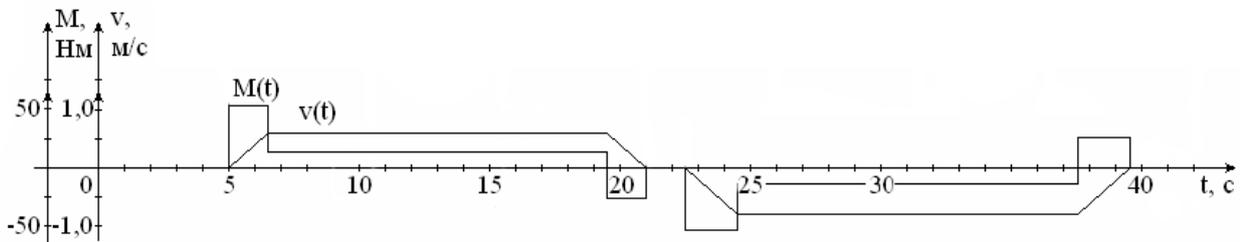


Рисунок 3. Нагрузочные диаграммы скорости и момента предлагаемой установки контроля геометрии полуцилиндров

Figure 3. Load diagrams of speed and moment of the proposed system for controlling the geometry of half-cylinders

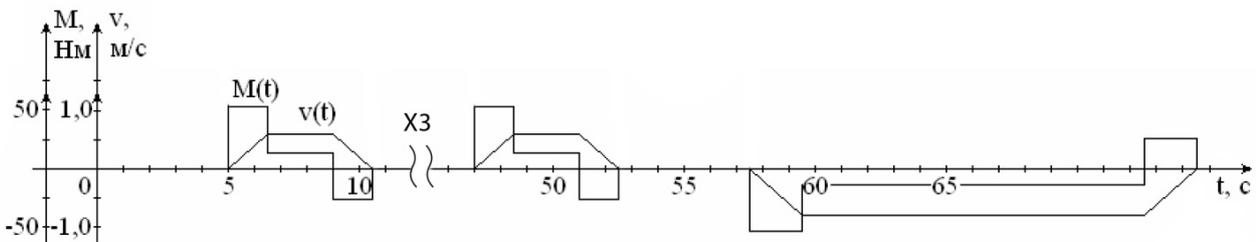


Рисунок 4. Нагрузочные диаграммы скорости и момента типовой установки контроля геометрии полуцилиндров

Figure 4. Load diagrams of speed and torque of a typical system for controlling the geometry of half-cylinders

ческого зрения, содержит меньшее количество электрических элементов с упрощенной механикой, за счет чего увеличивается надежность системы и снижается энергопотребление. Упрощенная механика позволяет существенно снизить объем технического обслуживания измерительной системы в процессе эксплуатации.

Калибровка системы. Ранее обращалось внимание на необходимость выполнения калибровки измерительной системы, что позволит существенно повысить достоверность получаемых результатов, поэтому в разрабатываемой системе добавляется калибровочная мишень и предусматривается алгоритм калибровки датчиков.

2.4 Синтез методики измерения сечения полуцилиндра

В данном подразделе для предлагаемой системы технического зрения описывается алгоритм измерения сечения полуцилиндра, схема которого изображена на рисунке 5. Методика измерений содержит несколько этапов.

1. *Подготовка изображения.* На первом этапе необходимо сделать снимок сцены, содержащей полуцилиндр и лазерный луч:

2. *Обнаружение лазера на изображении.* Далее осуществляется сегментация лазерного луча с применением морфологической операции, такой как скелетонизация.

3. *Проекция точек лазера.* После того, как лазерный луч был извлечен, данные точки проецируются в глобальные координаты по системе уравнений (4).

4. *Определение радиуса полуцилиндра.* На последнем этапе осуществляется вписание окружности в облако точек, после чего определяется радиус полуцилиндра.

5. *Контроль геометрии полуцилиндра.* Отличительной особенностью предлагаемой системы является то, что она способна регистрировать данные сечения полуцилиндра по мере движения тележки в режиме реального времени, а это, в свою очередь, позволяет непрерывно выполнять контроль качества геометрии полуцилиндра.

3. Экспериментальные исследования предлагаемой системы

3.1 Описание эксперимента

Основная задача, которую решает система технического зрения, состоит в корректной интерпретации исходной информации от датчиков в метрическую информацию о геометрии полуцилиндра. Для проверки качества и метрологических характеристик интерпретации данных преобразований в ходе эксперимента проводились измерения радиуса полуцилиндра. В ходе эксперимента регистрировалось 40 различных конфигураций системы технического зрения, созданных средой моделирования. Ориентации камеры и лазерной плоскости были уста-

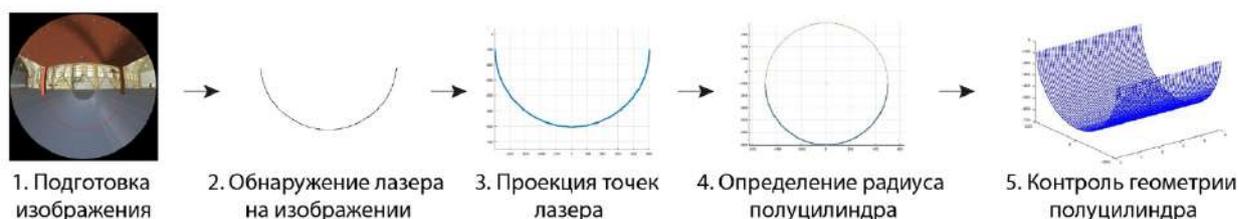


Рисунок 5. Алгоритм измерения сечения полуцилиндра

Figure 5. Algorithm for measuring the cross-section of a half-cylinder

новлены случайным образом в диапазоне от -10°

3.2 Обсуждение результатов

В данном разделе приводятся рассчитанные для всех конфигураций средняя абсолютная (MAE) и среднеквадратичная (RMSE) ошибки. Качество измерений оценивалось по показателю неопределенности измерений с учетом среднеквадратичного отклонения (STDEV):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (5)$$

где x_i — текущее измеренное значение;

\bar{x} — среднее измеренное значение;

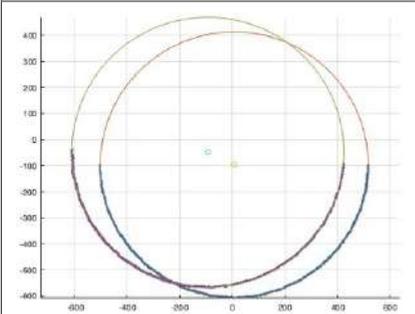
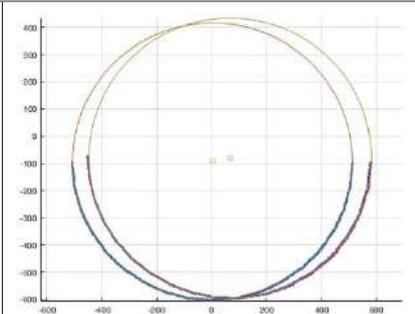
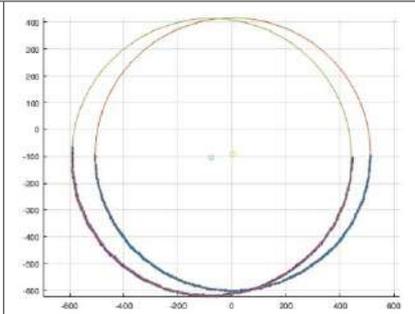
Таблица 1. Оценка результатов измерений

Table 1. Evaluation of measurement results

	Полуцилиндр ($\varnothing = 1020$ мм)	Полуцилиндр ($\varnothing = 1220$ мм)
MAE, мм	1,18	1,59
RMSE, мм	1,09	1,26
STDEV ($\bar{R} \pm \sigma$), мм	509,22 \pm 0,64	608,96 \pm 0,65

Таблица 2. Оценка результатов измерений

Table 2. Evaluation of measurement results

Конфигурация № 1	Конфигурация № 2	Конфигурация № 3
Измеренное значение радиуса полуцилиндра откалиброванной системы, мм		
509,71	509,44	509,27
Абсолютная ошибка, мм		
0,29	0,56	0,63
Измеренное значение радиуса полуцилиндра неоткалиброванной системы, мм		
518,32	514,82	517,98
Абсолютная ошибка, мм		
8,32	4,82	7,98
Визуальное отображение сечения полуцилиндра (оранжевая окружность — откалиброванная система; зеленая окружность — неоткалиброванная система)		
		

n — индекс эксперимента.

Данные расчеты сведены в таблицу 1.

По данным таблицы 1 видно, что при увеличении диаметра трубы также возрастает MAE и RMSE. Однако рассчитанное значение среднеквадратичного отклонения (STDEV) показало приблизительно близкие значения для разных диаметров полуцилиндров.

В таблице 2 также приводится визуальный анализ для выборочных конфигураций для полуцилиндра с диаметром 1020 мм. Визуальный анализ позволил подтвердить актуальность обязательного этапа калибровки измерительной системы.

Из таблицы 2 видно, что откалиброванная система рассчитывает радиус с метрологической ошибкой, допустимой по условиям технологического процесса.

Выводы

Предлагаемая система технического зрения позволила повысить энергетические показатели системы за счет изменения принципа измерения, когда режим контроля геометрии полуцилиндра с остановкой тележки был заменен на непрерывный безостановочный режим тележки. Предложенная измерительная система отличается улучшенными показателями надежности и метрологиче-

скими показателями, что достигается за счет снижения элементов и упрощения механики.

Полученные метрологические показатели измерения разработанной системы достигаются только при условии параллельного расположения устройства измерения и контролируемой трубы. При нарушении этого условия полученные точностные показатели достигаться не будут. Рассматриваемая проблема может быть решена внедрением следящих электроприводов, регулирующих положение измеряемой трубы, что будет детально изучено и рассмотрено в последующей работе.

Список источников

1. Deng J., Chen B., Cao X., Yao B., Zhao Z., J. Yu. 3D Reconstruction of Rotating Objects Based on Line Structured-Light Scanning // Proc. of the International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC). 2018. P. 244-247.
2. Ruvo P., Ruvo G., Distanto A., Nitti M., Stella E., Marino F. An Omnidirectional Range Sensor for Environmental 3-D Reconstruction // Proc. of the 2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2010. P. 396-401.
3. Lian X., Liu Z., Wang X., Dou L. Reconstructing Indoor Environmental 3D Model Using Laser Range Scanners and Omnidirectional Camera // Proc. of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2008. Vol. 1, No. 23. P. 1640-1644.
4. Fernandez-Labrador C., Perez-Yus A., Lopez-Nicolas C., Guerrero J. Layouts from Panoramic Images with Geometry and Deep Learning // IEEE Robotics and Automation Letters. 2018. Vol. 3, No. 4. P. 3153-3160.
5. Fernandez-Labrador C., Facil J., Perez-Yus A., Demonceaux C., Civera J., Guerrero J. Corners for Layout: End-to-End Layout Recovery from 360 Images // IEEE Robotics and Automation Letters. 2020. Vol. 5, No. 2. P. 1255-1262.
6. Shah S., Aggarwal J. Mobile Robot Navigation and Scene Modeling Using Stereo Fish-Eye Lens System // Machine Vision and Applications. 1996. Vol. 10. P. 159-173.
7. Kawasaki H., Sagawa R., Yagi Y., Furukawa R., Asada N., Sturm P. One-Shot Scanning Method Using an Uncalibrated Projector and Camera System // Proc. of the 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition — Workshops. 2010. P. 104-111.
8. Jia T., Wang B., Zhou Z., Meng H. Scene Depth Perception Based on Omnidirectional Structured Light // IEEE Transactions on Image Processing. 2016. Vol. 25, No. 9. P. 4369-4378.
9. Lian X., Liu Z., Wang X., Dou L. Reconstructing Indoor Environmental 3D Model Using Laser Range Scanners and Omnidirectional Camera // Proc. of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2008. Vol. 1, No. 23. P. 1640-1644.
10. Orghidan R., Mouaddib E., Salvi J. Omnidirectional Depth Computation from a Single Image // Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2005. P. 1222-1227.
11. Scaramuzza D., Martinelli A., Siegwart R. A Flexible Technique for Accurate Omnidirectional Camera Calibration and Structured from Motion //

Proc. IEEE International Conference on Computer Vision Systems. January 5-7, 2006, St. Johns University, Manhattan, NY, USA. DOI: 10.1109/ICVS.2006.3.

12. Kholodilin I., Li Y., Wang Q. Omnidirectional Vision System with Laser Illumination in a Flexible Configuration and its Calibration by One Single Snapshot // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020. Vol. 69, No. 11. P. 9105-9118.

References

1. Deng J., Chen B., Cao X., Yao B., Zhao Z., J. Yu. 3D Reconstruction of Rotating Objects Based on Line Structured-Light Scanning. *Proc. of the International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC)*, 2018, pp. 244-247.

2. Ruvo P., Ruvo G., Distante A., Nitti M., Stella E., Marino F. An Omnidirectional Range Sensor for Environmental 3-D Reconstruction. *Proc. of the 2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2010, pp. 396-401.

3. Lian X., Liu Z., Wang X., Dou L. Reconstructing Indoor Environmental 3D Model Using Laser Range Scanners and Omnidirectional Camera. *Proc. of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2008, Vol. 1, No. 23, pp. 1640-1644.

4. Fernandez-Labrador C., Perez-Yus A., Lopez-Nicolas C., Guerrero J. Layouts from Panoramic Images with Geometry and Deep Learning. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, Vol. 3, No. 4, pp. 3153-3160.

5. Fernandez-Labrador C., Facil J., Perez-Yus A., Demonceaux C., Civera J., Guerrero J. Corners for Layout: End-to-End Layout Recovery from 360 Images. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, Vol. 5, No. 2, pp. 1255-1262.

6. Shah S., Aggarwal J. Mobile Robot Navigation and Scene Modeling Using Stereo Fish-Eye Lens System. *Machine Vision and Applications*, 1996, Vol. 10, pp. 159-173.

7. Kawasaki H., Sagawa R., Yagi Y., Furukawa R., Asada N., Sturm P. One-Shot Scanning Method Using an Uncalibrated Projector and Camera System. *Proc. of the 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition — Workshops*, 2010, pp. 104-111.

8. Jia T., Wang B., Zhou Z., Meng H. Scene Depth Perception Based on Omnidirectional Structured Light. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, Vol. 25, No. 9, pp. 4369-4378.

9. Lian X., Liu Z., Wang X., Dou L. Reconstructing Indoor Environmental 3D Model Using Laser Range Scanners and Omnidirectional Camera. *Proc. of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2008, Vol. 1, No. 23, pp. 1640-1644.

10. Orghidan R., Mouaddib E., Salvi J. Omnidirectional Depth Computation from a Single Image. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, pp. 1222-1227.

11. Scaramuzza D., Martinelli A., Siegwart R. A Flexible Technique for Accurate Omnidirectional Camera Calibration and Structured from Motion. *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision Systems*, January 5-7, 2006, St. Johns University, Manhattan, NY, USA. DOI:10.1109/ICVS.2006.3.

12. Kholodilin I., Li Y., Wang Q. Omnidirectional Vision System with Laser Illumination in a Flexible Configuration and its Calibration by One Single Snapshot. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, Vol. 69, No. 11, pp. 9105-9118.

ОБ АВТОРАХ

Антропова Виктория Романовна

аспирант кафедры электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Белов Александр Владимирович

инженер по метрологии отдела поверки средств измерений электромагнитных величин, ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Республики Башкортостан», Уфа, Россия

Бухаров Дмитрий Сергеевич

кандидат технических наук, заместитель начальника службы — начальник отдела, Служба автоматизированных систем диспетчерского управления, Филиал АО «СО ЕЭС» «Региональное диспетчерское управление энергосистемы Иркутской области», Иркутск, Россия

Гильманов Эдуард Ахнафович

кандидат технических наук, главный энергетик — начальник службы МУП «Уфаводоканал», Уфа, Россия

Григорьев Максим Анатольевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизированный электропривод», Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

Жаринов Юрий Александрович

кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Информационные технологии», Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал, Салават, Россия

Иванов Максим Дмитриевич

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Ле Суан Хонг

кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электрический транспорт», Хошиминский университет транспорта, Хошимин, Социалистическая Республика Вьетнам

Мартьянов Антон Сергеевич

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

Мартынов Борис Анатольевич

инженер научно-исследовательской лаборатории, ООО НИЦ «Энергодиагностика», Уфа, Россия

Мухаметшин Андрей Валерьевич

инженер кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Родионов Артём Сергеевич

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Сафиуллин Рузил Ахнафович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Технические дисциплины», Башкирский государственный университет, филиал, Нефтекамск, Россия

Старцева Елена Вячеславовна

студент кафедры «Информационные технологии», Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал, Салават, Россия

Суслов Никита Сергеевич

студент кафедры «Информационные технологии», Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал, Салават, Россия

Сухачев Илья Сергеевич

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

Сушков Валерий Валентинович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Энергетика», Нижневартовский государственный университет, Нижневартовск, Россия

Хазиева Регина Тагировна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Хакимьянов Марат Ильгизович

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Холодилин Иван Юрьевич

аспирант, Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

Хрюкин Дмитрий Юрьевич

аспирант, Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

Шишкина Ольга Юрьевна

студент кафедры «Информационные технологии», Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал, Салават, Россия

Янгиров Ильгиз Флюсович

доктор технических наук, доцент кафедры электромеханики, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

Яшин Антон Николаевич

аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Antropova Victoria R.

Post-Graduate Student of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Belov Alexandr V.

Metrology Engineer of the Department for Verification of Measuring Instruments of Electromagnetic Quantities, FBI «The State Regional Center for Standardization, Metrology and Testing in the Republic of Bashkortostan», Ufa, Russia

Bukharov Dmitry S.

Candidate of Engineering Sciences, Deputy Head of Service – Head of Department, Service of Automated Dispatch Control Systems, Branch of RPSO JSC Regional Dispatch Office of the Irkutsk Region Power System, Irkutsk, Russia

Gilmanov Eduard A.

Candidate of Engineering Sciences, Chief Power Engineer – Head of Service MUP «Ufavodokanal», Ufa, Russia

Grigorev Maksim A.

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Automated Electric Drive Department, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

Ivanov Maksim D.

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Khakimyanov Marat I.

Doctor of Engineering Sciences, Associated Professor, Head of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

Khazieva Regina T.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kholodilin Ivan Yu.

Post-Graduate Student, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

Khriukin Dmitry Yu.

Post-Graduate Student, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

Le Xuan Hong

Candidate of Engineering Sciences, Head of Electric Transport Department, Ho Chi Minh City University of Transport, Ho Chi Minh City, Socialist Republic of Vietnam

Martyanov Anton S.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Martynov Boris A.

Engineer of the Laboratory for Non-Destructive Testing, Research Center «Energodiagnostika» LLC, Ufa, Russia

Mukhametshin Andrey V.

Engineer of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Rodionov Artyom S.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Physics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Safiullin Ruzil A.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Technical Disciplines Department, Bashkir State University, Branch, Neftekamsk, Russia

Shishkina Olga Yu.

Student of Information Technologies Department, Ufa State Petroleum Technological University, Branch, Salavat, Russia

Startseva Elena V.

Student of Information Technologies Department, Ufa State Petroleum Technological University, Branch, Salavat, Russia

Sukhachev Ilya S.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Sushkov Valery V.

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Suslov Nikita S.

Student of Information Technologies Department, Ufa State Petroleum Technological University, Branch, Salavat, Russia

Yangirov Ilgiz F.

Doctor of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

Yashin Anton N.

Post-Graduate Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Zharinov Yuri A.

Candidate of Pedagogical Sciences, Assistant Professor of Information Technologies Department, Ufa State Petroleum Technological University, Branch, Salavat, 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 5 источников) на русском и английском языках.
9. Автор дает согласие на воспроизведение на безвозмездной основе в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВО «УГНТУ» электронной версии своей статьи, опубликованной в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы».
10. Графический и табличный материал должен быть представлен в черно-белом варианте в приложении к WORD, например, Microsoft Graph, без использования сканирования; для диаграмм применять различную штриховку, размер шрифта 10 или 11 pt, математические формулы оформляются через редактор формул Microsoft Equation, а их нумерация проставляется с правой стороны. Таблицы, диаграммы, рисунки подписываются 12 шрифтом в правом верхнем углу.
11. Сокращение слов, имен и названий, как правило, не допускается. Разрешаются лишь общепринятые сокращения мер физических, химических и математических величин и терминов и т. д.
12. Поступившие в редакцию статьи в обязательном порядке будут проходить рецензирование. Рецензии отклоненных работ высылаются авторам и содержат аргументированный отказ от публикации. В рецензиях работ, отправленных на доработку, указываются замечания к статье.
13. Все статьи, поступившие в редакцию, в обязательном порядке проходят проверку в системе «Антиплагиат».
14. С аспирантов плата за публикацию не взимается. При отправлении статьи на электронный адрес также необходимо отправить отсканированную справку из аспирантуры, заверенную отделом кадров.

Памятка авторам

В статье настоятельно рекомендуется:

- НЕ использовать табуляцию (клавиша Tab);
- НЕ устанавливать свои стили абзацев (кроме принятых по умолчанию);
- НЕ расставлять автоматические списки (при нумерации строк и абзацев);
- НЕ ставить двойные, тройные и т. д. пробелы между словами.

Рекомендуется применять в статье только один тип кавычек («»).

Помнить о том, что необходимо различать дефис и тире. Тире выставляется сочетанием двух клавиш («Ctrl» + «-»).

Все цитаты в статье должны быть соотнесены со списком литературы, при прямом цитировании обязательно указывать номера страниц. Список литературы не следует смешивать с примечаниями, которые должны располагаться перед списком литературы.

Статьи, не соответствующие требованиям, отклоняются для доработки.

Requirements for the materials, provided for publication in the journal:

1. Articles provided by the authors in the Journal should match the profile of the magazine, be new, be interesting for a wide range of scientific community.
2. Revision accepted for publication only open materials in Russian and English (for foreign authors).
3. Fields — 2.5 cm on each side; font — Times New Roman, font size — 14, line spacing — one and a half; References in square brackets. If there is a list of literature references is required (in order of citation in accordance with GOST R 7.05-2008).
4. In the upper right corner in bold italics: surname, name, patronymic of the author (certainly in full), academic degree, academic rank, position, name of organization (in full), country, city.
5. Centered, bold capital letters: title of the article. UDC — in the upper right corner.
6. At the end of the article specify the e-mail address with ZIP code, name and initials of the recipient (the address will be sent to the magazine), telephone (mobile), e-mail of the contact person. Article File Contents: Surname N.P.doc (or docx). Send to the address: uop-ugaes@mail.ru.
7. Be sure to send color photos of the authors in separate files (at least 1 MB and not more than 5 MB).
8. To the article must be accompanied by the Russian and English languages: the article title, abstract (240 words, determine the theoretical value and practical novelty of the article), keywords (at least 10), references required (at least 5 sources).
9. Author agrees to play free of charge on the Internet at the website FSBEI HE «USPTU» electronic version of his article published in the journal «Electrical and data processing facilities and systems».
10. Graphical and table material should be presented in the annex to the WORD. For example, Microsoft Graph, without scanning; diagrams for applying a different shading, font size 10 or 11 pt, mathematical formulas should be made through the formula editor Microsoft Equation, and their numbers stamped on the right side. Table signed by the 12th print in the upper right corner, diagrams, drawings — at the bottom center.
11. Reductions of words of names usually are not permitted. Allowed only standard abbreviations measures, physical, chemical and mathematical quantities and terms, etc.
12. Received articles will necessarily be reviewed. Reviews of rejected papers are sent to the authors and contain a reasoned rejection of the publication. In reviews of works sent for revision, specify comments on the article.
13. All articles received by the editorial compulsorily tested in the «Anti-plagiarism».
14. Article volume with the summary and the list of references shouldn't exceed 12 pages.

Memo to authors

The article is highly recommended:

- NOT TO use the tab key (Tab);
- NOT TO place your paragraph styles (other than the defaults);
- NOT TO set automatic lists (with line numbers and paragraphs);
- NOT TO put double, triple and so. D. The spaces between words.

Recommended in the article is only one type of quotes («») or (“”).

Remember that it is necessary to distinguish hyphens and dashes. Dash is exhibited by a combination of two keys («Ctrl» + «-»).

All quotations in the article should be correlated with the list of literature, with direct quotations necessarily indicate page numbers. References should not be confused with the notes that must be placed before the bibliography.

Articles that do not meet the requirements will be rejected for revision.