

ЭлСиК

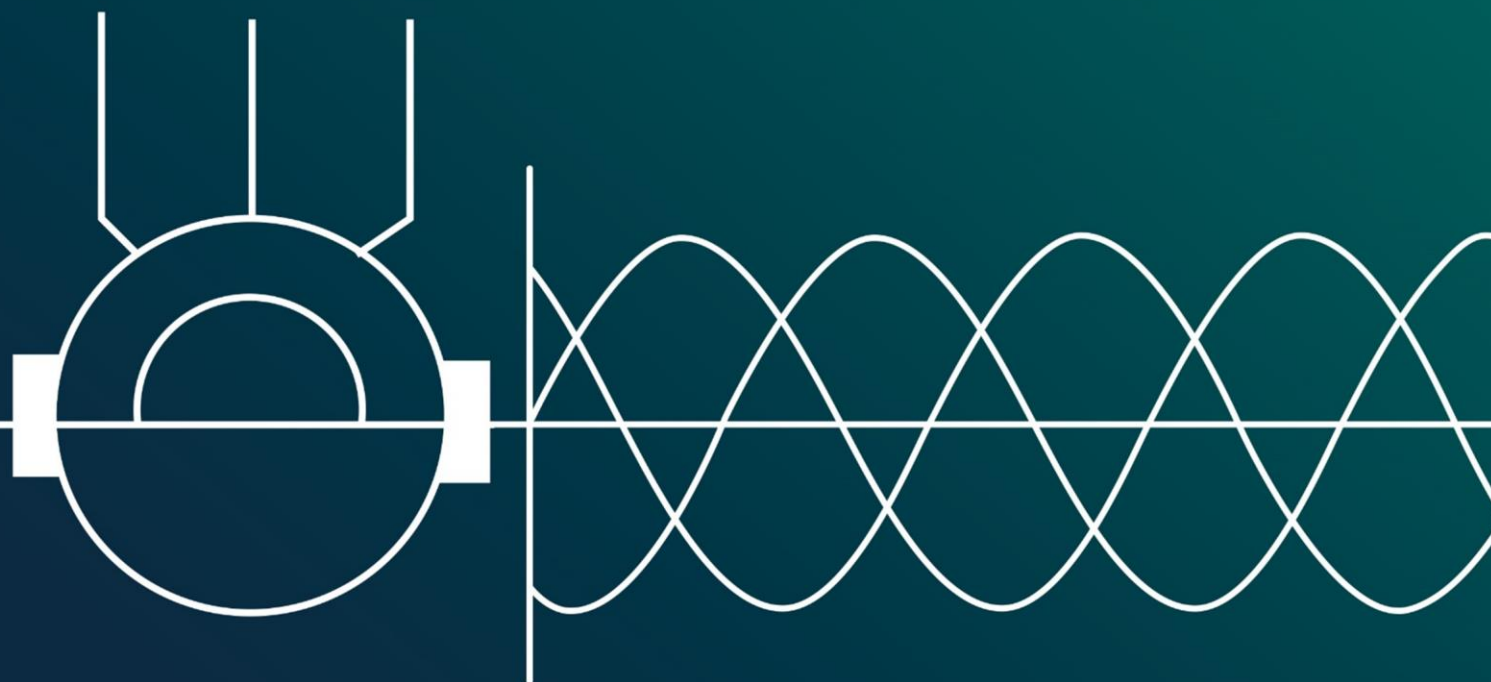
ISSN 2311-8318

ISSN (online) 2658-3151

ЭЛЕКТРО- ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

№ 3(60)

2023 г.



**31 августа 2023 г. исполнилось 80 лет
МУГАЛИМОВУ РИФУ ГАРИФОВИЧУ,
профессору кафедры электроснабжения, доктору технических наук,
руководителю научно-исследовательской лаборатории «AEDrives»**

Риф Гарифович родился в 1949 году в г. Белорецке Башкирской АССР.

В 1970 году окончил энергетический факультет Магнитогорского горно-металлургического института им. Г.И. Носова и получил квалификацию инженер-электрик по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок».

До поступления в институт обучался в техническом училище, работал электриком, электро-монтером, служил в Советской армии. В Магнитогорском государственном техническом университете Риф Гарифович работает с 1970 года, прошел все ступени карьерного роста – от ассистента до профессора. В настоящее время он профессор на кафедре электроснабжения промышленных предприятий.

В 1978 году в Белорусском государственном политехническом университете (г. Минск) защитил кандидатскую диссертацию по теме «Интенсификация режимов работы главных электроприводов обжимных станов с вертикальными и горизонтальными валками».

После аспирантуры работал на энергетическом факультете (в дальнейшем Институт энергетики и автоматизации) МГТУ старшим преподавателем, доцентом, профессором.

В 1982 году ему присвоено ученое звание доцента по кафедре общей и специальной электротехники.

В 2011 году в Магнитогорском государственном техническом университете защитил докторскую диссертацию по теме «Энергосберегающий электропривод на основе асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности».



Плодотворная работа в вузе отмечена Почетной грамотой губернатора Челябинской области и знаком «Почетный работник высшего профессионального образования РФ».

Помимо научно-исследовательской деятельности, Риф Гарифович с 2005 по 2017 годы занимался научным руководством школьников г. Магнитогорска – учащихся лицей при МГТУ, лицей РАН, Дворца творчества детей и молодежи. Школьники под его руководством участвовали и побеждали в областных и всероссийских конкурсах, пять его учащихся были награждены Министерством образования и науки РФ дипломами «Национальное достояние России» (2009-2010).

В 2007 году за большой вклад в инновационное развитие области Риф Гарифович получил благодарность губернатора Челябинской области.

Под его руководством на базе МГТУ создавалось малое инновационное предприятие ООО «МГТУ Энергосбережение+», а затем –

научно-исследовательская лаборатория перспективных электроприводов робото-технических и промышленных комплексов «AEDrives».

Юбиларом опубликовано более 300 научных статей, 50 учебно-методических трудов, 8 патентов и 5 авторских свидетельств на изобретения и программы для ЭВМ в области электротехники, промышленной электроники и энергосберегающих промышленных электроприводов.

В течение всей своей деятельности он многократно принимал участие в работе международных и всероссийских научно-технических конференций.

Научные разработки Рифа Гарифовича много раз становились лауреатами и победителями всероссийских и международных выставок и конкурсов. Его вклад в инновационную деятельность отмечен Дипломом 1-й степени с золотой медалью на Международной выставке-конкурсе «Высокие технологии, инновации, инвестиции» (Санкт-Петербург, 2006), Дипломом за лучший инновационный проект в 2006 году Российским союзом промышленных предприятий России, Дипломами с золотыми медалями на специализированных выставках «Изделия и технологии двойного назначения» в 2006 и 2007 годах (г. Москва).

Вне научной деятельности он продолжает оставаться открытым, доброжелательным, общительным человеком для друзей, искренне любящим свою семью, родных и близких, готовым прийти на помощь в любую минуту.

*Редакционная команда журнала
«Электротехнические системы и комплексы»
сердечно поздравляет Рифа Гарифовича с 80-летним юбилеем,
желает ему здоровья, творческих успехов
и дальнейшей успешной работы!*

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 3(60), СЕНТЯБРЬ 2023

Журнал входит 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, а также в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Редакционная коллегия

Главный редактор:

В.Р. Храмин – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Ответственный редактор:

Е.А. Панова – доц., канд. техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Члены редколлегии:

С.М. Андреев – доц., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

И.В. Бочкарев – проф., д-р техн. наук,
Кыргызский государственный технический
университет им. И. Раззакова, г. Бишкек,
Кыргызстан;

Н.Ф. Джагаров – проф., д-р техн. наук,
Высшее военно-морское училище
им. Николы Вапцарова, г. Варны, Болгария;

А.М. Зюев – доц., д-р техн. наук,
УрФУ им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;

Е.Н. Ишметьев – д-р техн. наук,
R&D МГТУ, г. Магнитогорск, Россия;

А.С. Карандаев – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

А.Л. Карякин – с.н.с., д-р техн. наук,
УГТУ, г. Екатеринбург, Россия;

Г.П. Корнилов – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

О.А. Кравченко – проф., д-р техн. наук,
Тульский государственный университет,
г. Тула, Россия;

Б.М. Логинов – канд. техн. наук,
ПАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия;

О.С. Логунова – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

В.Н. Мещеряков – проф., д-р техн. наук,
ЛГТУ, г. Липецк, Россия;

Р.Г. Мугалимов – доц., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Е.Г. Неишпоренко – доц., канд. техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

О.И. Осипов – проф., д-р техн. наук,
НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия;

А.В. Паздерин – проф., д-р техн. наук,
УрФУ им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;

А.А. Радионов – проф., д-р техн. наук,
Московский политехнический университет,
г. Москва, Россия;

А.С. Сарваров – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

И.М. Ячиков – проф., д-р техн. наук,
ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск, Россия.

Технические редакторы:

Н.П. Боярова – МГТУ им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия;

Е.А. Храмина – МГТУ им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия.

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2023

Подписной индекс издания 45083 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-58181 от 29 мая 2014 г.

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.10.

Адрес редакции:

455000, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. Ленина, д. 38, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
e-mail: ecis.red@gmail.com

Адрес издателя:

МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, Челябинская обл.,
г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/2,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр.

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/1,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
участок оперативной полиграфии.

Выход в свет 28.09.2023. Заказ 331. Тираж 500 экз.
Цена свободная.

ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 3(60), SEPT, 2023

The journal is included in the List of peer-reviewed scientific issues publishing main results of Ph.D. thesis in Engineering Science, doctoral thesis, and in the database of Russian Scientific Citation Index (RSCI).

Editorial Board

Editor in Chief:

V.R. Khramshin – Professor, D.Sc.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Executive Editor:

E.A. Panova – Associate Professor, Ph.D.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Editor Board Members:

S.M. Andreev – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

I.V. Bochkarev – Professor, D.Sc. (Engineering),
KSTU, Bishkek, Kyrgyzstan;

N.F. Dzhagarov – Professor, D.Sc.
(Engineering), NVNA, Varna, Bulgaria;

A.M. Zyuzev – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), UrFU named after the first
President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia;

E.N. Ishmet'ev – D.Sc. (Engineering),
of R&D NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

A.S. Karandaev – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

A.L. Karyakin – Senior Research Associate, D.Sc.
(Engineering), UFMU, Ekaterinburg, Russia;

G.P. Kornilov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

O.A. Kravchenko – Professor, D.Sc.
(Engineering), Tula State University, Tula,
Russia;

B.M. Loginov – Ph.D. (Engineering),
MMK PJSC, Magnitogorsk, Russia;

O.S. Logunova – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

V.N. Meshcheryakov – Professor, D.Sc.
(Engineering), LSTU, Lipetsk, Russia;

R.G. Mugalimov – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

E.G. Neshporenko – Associate Professor, Ph.D.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

O.I. Osipov – Professor, D.Sc. (Engineering),
MPEI, Moscow, Russia;

A.V. Pazderin – Professor, D.Sc. (Engineering),
UrFU named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia;

A.A. Radionov – Professor, D.Sc. (Engineering),
Moscow Polytech University, Moscow, Russia;

A.S. Sarvarov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

I.M. Yachikov – Professor, D.Sc. (Engineering),
SUSU (NRU), Chelyabinsk, Russia.

Technical Editors:

N.P. Boyarova – NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

E.A. Khramshina – NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

© FSBEI HE NMSTU, 2023

The subscription index of the journal is 45083 in the «Pressa Rossii» union catalog, vol. 1.

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (Roskomnadzor).

Registration certificate PI No. FS77-58181 on May 29, 2014.

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, Magnitogorsk 455000, Chelyabinsk Region)
16+ in accordance with Federal Law no. 436-FZ dated 29.12.10

The publisher:

Nosov Magnitogorsk State Technical University
455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia
NMSTU publishing center

The editorial office:

455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University
e-mail: ecis.red@gmail.com

The printing-office:

455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University, printing section

Publication date: 28.09.2023. Order 331. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....	4
<i>Верзунов С.Н., Бочкарев И.В.</i>	
Система диагностики возникновения частичного разряда в надземных силовых электросетях на основе интеллектуального анализа данных в HF-диапазоне	4
<i>Анисимова Н.А., Варганова А.В., Мельников М.С., Петухова О.И.</i>	
Методика оптимизации режимов работы промышленных энергоузлов с собственной генерацией и внешними источниками электроэнергии	15
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	23
<i>Мещеряков В.Н., Пикалов В.В., Юрченко В.П.</i>	
Стабилизация напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты, питающего асинхронный двигатель, при просадке напряжения	23
<i>Соловьев А.Э., Кравченко О.А.</i>	
Математическая модель обобщенной трехступенной электрической машины с взаимно неподвижными обмотками	28
ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	34
<i>Охотниченко А.В., Логунова О.С., Наркевич М.Ю.</i>	
Распознавание объектов нерегулярной формы в заданной локации: формализация и постановка задачи обработки графической информации	34
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	42
<i>Николаев А.А., Буланов М.В., Ивекеев В.С., Тулупов П.Г.</i>	
Усовершенствованный способ диагностики резонансных явлений во внутриводской сети 6-35 кВ за счет тестовых воздействий активных выпрямителей	42
<i>Андреев С.М., Нужин Д.В., Бондарева А.Р.</i>	
Прогнозирующая модель распределения температуры по длине нагревательной печи с учетом взаимовлияния зон	52
<i>Шишков А.Н., Дудкин М.М., Маклаков А.С., Ле В.К.</i>	
Оптимальная гибридная последовательность переключения для трехуровневого инвертора напряжения с пространственно-векторной ШИМ..	61
МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.....	72
<i>Королёв Н.А., Булдыско А.Д., Жуковский Ю.Л.</i>	
Обнаружение ранней стадии ослабления механических креплений асинхронного двигателя на основе сингулярного разложения потребляемого тока.....	72
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....	81

CONTENT

ELECTRICAL ENGINEERING.....	4
<i>Verzunov S.N., Bochkarev I.V.</i>	
System for Diagnosing the Occurrence of a Partial Discharge in Overhead Power Networks Based on Data Mining in the HF Band	4
<i>Anisimova N.A., Varganova A.V., Melnikov M.S., Petukhova O.I.</i>	
Methodology For Optimizing Operating Modes Of Industrial Power Units With In-house Generation And External Sources Of Electric Power.....	15
THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE.....	23
<i>Meshcheryakov V.N., Pikalov V.V., Yurchenko V.P.</i>	
Voltage Stabilization in Case of Voltage Drop in DC-Link of Frequency Inverter Supplying Induction Motor.....	23
<i>Solovyev A.E., Kravchenko O.A.</i>	
Mathematical Model of a Generalized Three-Stage Electric Machine with Mutually Stationary Windings	28
TECHNICAL SYSTEMS DATAWARE AND SOFTWARE	34
<i>Okhotnichenko A.V., Logunova O.S., Narkevich M.Yu.</i>	
Irregular Shape Object Recognition in a Given Location: Formalization and Problem Statement of Graphic Information Processing.....	34
POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS	42
<i>Nikolaev A.A., Bulanov M.V., Ivekeev V.S., Tulupov P.G.</i>	
Improved Method for Diagnostics of Resonance Phenomena in 6-35 kV Internal Network due to Test Impacts of Active Rectifiers.....	42
<i>Andreev S.M., Nuzhin D.V., Bondareva A.R.</i>	
Prediction Model of Temperature Distribution Over the Length of the Furnace Taking into Account the Mutual Influence of its Zones	52
<i>Shishkov A.N., Dudkin M.M., Maklakov A.S., Le V.K.</i>	
Optimal Hybrid Switching Sequence for a Three-Level Voltage Inverter with Space-Vector PWM	61
MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ELECTRIC EQUIPMENT	72
<i>Korolev N.A., Buldysko A.D., Zhukovskiy Yu.L.</i>	
Detection of Early-Stage Mechanical Weakening of Induction Motor Based on Consumption Current Singular Value Decomposition	72
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	81

¹ Институт машиностроения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек² Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек

СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧАСТИЧНОГО РАЗРЯДА В НАДЗЕМНЫХ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ В НЧ-ДИАПАЗОНЕ

Разработана система искусственного интеллекта для диагностики возникновения частичного разряда в изоляции воздушных линий электропередач. С целью повышения точности обнаружения неисправности используется несколько этапов предобработки – разделение на частотные составляющие, балансировка, сегментация и нормализация исходных данных, представляющих собой измерения высокочастотных составляющих спектра тока и напряжения в каждой фазе линии электропередачи. В работе показано, что основную роль при идентификации частичного разряда играют электромагнитные волны, возникающие при частичном пробое изоляции с частотой 10-20 МГц. Для этого исходные данные разделяются с помощью фильтрации на две составляющие – высокочастотную и низкочастотную. Максимальная точность обученных на полном сигнале нейронных сетей и его ВЧ-составляющей отличается менее чем на 1%, при этом максимальная точность сети, обученной на НЧ-составляющей, ниже на 17%. Для проверки предложенной системы использован реальный набор данных, что позволяет говорить о возможности практического применения разработанной системы. Разработанная система искусственного интеллекта показала относительно высокую точность диагностики, составляющую около 88%. Таким образом, с помощью интеллектуального анализа данных было показано, что основную роль при идентификации ЧР играют высокочастотные составляющие, то есть электромагнитные волны, лежащие в определенном частотном диапазоне, возникающие при частичном пробое изоляции. Это открывает путь к созданию новых методов диагностики и обнаружения местоположения источника ЧР, основанных на использовании этого диапазона.

Ключевые слова: частичный разряд, система диагностики, машинное обучение нейронной сети, интеллектуальный анализ данных, нейросетевая модель, деkamетровые волны

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается быстрый рост электроэнергетической системы по размеру и сложности. Этот рост охватывает все отрасли электроэнергетики, начиная с генерации до передачи и распределения [1, 2]. Одной из важных проблем, возникающих при этом, является определение внезапного возникновения электрических неисправностей в линии, характеризующихся аномальным изменением тока и напряжения, в частности, более высокими амплитудными значениями, чем те, которые обычно ожидаются при нормальной эксплуатации. Отклонение значений напряжения и тока от штатных значений могут быть вызваны человеческими ошибками, экологическими условиями или отказом оборудования [3, 4]. Кроме того, чрезмерно большой ток в электросети может привести к повреждению преобразующих устройств и другого оборудования. Поэтому своевременное и точное обнаружение неисправностей имеет решающее значение для предотвращения повреждения оборудования, перебоев в электроснабжении, а также минимизации угроз здоровью обслуживающего персонала [5].

Как показывает статистика, каждая вторая авария на энергосетях происходит вследствие старения и повреждений их изоляции. Ухудшение эксплуатационных свойств изоляции происходит обычно постепенно, за счет воздействия целого ряда разнообразных причин: электрических, механических и тепловых нагрузок, воздействия неблагоприятных атмосферных условий, производственного брака и т.д. На практике при контроле

изоляции высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП) используются следующие методы диагностики: визуальный осмотр; инфракрасная термография; ультрафиолетовое детектирование; измерение параметров электрического поля. Большая часть этих методов удобна для контроля отдельных элементов ЛЭП, например изоляторов, но малоприменимы для контроля протяженных объектов, то есть ЛЭП в целом. Более того, для сбора и анализа данных обычно требуется непосредственное участие человека. Поэтому более предпочтительным методом является контроль параметров электрического поля. Среди способов, реализующих этот подход, основными являются контроль частичных разрядов (ЧР), измерение тангенса угла диэлектрических потерь и рефлектометрия. Как показал проведенный анализ, ключевую роль в диагностике и обслуживании воздушных линий электропередач играют частичные разряды (ЧР), так как являются одним из важнейших индикаторов начала деградации изоляции. При этом своевременное обнаружение и локализация ЧР позволит:

- оценить состояние изоляции с точки зрения наличия в ней дефектов и выявить динамику их развития от момента возникновения ЧР до установления критических параметров ЧР;
- уменьшить опасность выхода оборудования из строя;
- снизить стоимость обслуживания воздушных линий электропередач;
- предотвратить перебои в подаче электроэнергии.

Следовательно, контроль присутствия признаков частичных разрядов в напряжении линии электропередачи является весьма эффективным способом обеспечения качества работы этой линии.

Система диагностики возникновения частичного разряда, в общем случае, состоит из двух частей:

- система сбора исходных данных о текущем состоянии электрической сети;
- система обработки исходных данных с целью выявления наличия ЧР.

В данной работе исследуется, в основном, вторая часть системы диагностики, причем для этого используется интеллектуальный анализ собранной исходной информации.

Рассмотрим использование системы искусственного интеллекта для контроля признаков наличия частичных разрядов в воздушных линиях электропередач.

ЧР – это процесс кратковременного электрического разряда малой мощности, который возникает внутри или на поверхности изоляции [6-8]. Чаще всего ЧР возникают в местах неоднородности или повреждения изоляции. Конечно, единичный ЧР сам по себе особой опасности не представляет, так как не является полным коротким замыканием токопроводящих элементов. Однако при многократном возникновении такие разряды приводят к выходу изоляции из строя.

Как правило, ЧР можно обнаружить в воздушных линиях электропередач с помощью различных методов, включая коронное сканирование, акустическое обнаружение и термографию [9-11]. При этом ручная проверка повреждений изоляции путем контроля ЧР в линиях электропередач в следствие их значительной протяженности затрудняет и значительно удорожает процедуры контроля и диагностики. Более оперативным является метод обнаружения частичного разряда, основанный на применении интеллектуального анализа данных. Такой подход к контролю позволяет своевременно выявить и диагностировать проблемы без выполнения трудоемких локальных ручных измерений, предотвратить аварии и обеспечить быструю и безопасную эксплуатацию линий электропередач.

Хотя системы обнаружения электрических неисправностей, основанные на нейросетевой классификации, достаточно широко исследовались в течение последнего десятилетия, тем не менее можно говорить, что этот вопрос все еще заслуживает тщательного изучения, особенно в области автоматизации мониторинга неисправностей [12-14]. Следовательно, существует острая потребность в интеллектуальной системе, которая будет эффективно действовать в реальных энергосистемах с минимальными трудовыми затратами обслуживающего персонала, оказываясь по этой причине более дешевой в эксплуатации.

Обнаружение аномалий, подобных ЧР, с помощью интеллектуального анализа данных относится к особому классу методов обнаружения, которые направлены на выявление аномальных выборок или событий в наборе данных. По сути, аномалии (также называемые выбросами) сильно отличаются от ожидаемого набора данных и количественно немногочисленны по сравнению с большинством нормальных выборок. Точно так же электрические неисправности редко возникают в реальных энергосистемах (менее 5%), в остальное время система работает в штатном режиме. Следовательно, использование аномальных данных для обнаружения электрических неисправностей приводит к проблемам при использовании традиционной классифика-

ции, для которой необходимо достаточное количество ошибочных сигналов в наборе данных [9]. Кроме того, дополнительную сложность в оценку ЧР вносят различные дополнительные возмущения и некоррелируемые помехи, возникающие, например, при возникновении коронных разрядов, от импульсов разрядов, поступивших из соседних линий, от коммутационных процессов в электронных переключателях, от сигналов радиовещания и т.п. Все это может привести к ошибочности в реальной оценке параметров и интенсивности ЧР. Сбалансировать задачу и предотвратить смещение классификатора к «нормальному» классу можно, например, с помощью балансировки данных.

Таким образом, практическая значимость настоящей работы заключается в разработке системы искусственного интеллекта, способной эффективно действовать в реальных энергосистемах, которая будет отличаться от ранее предложенных тем, что, во-первых, неисправности выявляются по мере их возникновения в электрических сетях в режиме реального времени, во-вторых, чтобы повысить точность обнаружения неисправностей, непосредственно перед этапом обучения используется несколько этапов предобработки для разделения исходных данных на частотные составляющие. Для проверки предложенной системы используется реальный набор данных о текущем состоянии электрической сети, что позволяет протестировать возможность ее практического применения и оценить точность результатов диагностики.

В литературе было опубликовано множество исследований в области обнаружения и классификации неисправностей линий электропередач. Классификатор на основе искусственной нейронной сети (ИНС) применялся во многих предыдущих работах для мониторинга неисправностей. Например, в работе [15] разработана система искусственного интеллекта для обнаружения и классификации неисправностей трехфазной линии электропередач. Авторы использовали смоделированные в PSCAD/EMTDC данные и получили хорошие результаты. Похожие результаты с использованием модельного набора данных и нескольких моделей ИНС с различной структурой получены в работе [16].

Другие авторы смоделировали двухконтурную линию передачи с помощью MATLAB и применили нейронную сеть к смоделированным данным с целью обнаружения и классификации неисправностей [17]. Обнаружение и локализация неисправностей в системах с различным напряжением исследовались с использованием разных моделей искусственного интеллекта и смоделированного набора данных в работе [18].

При этом использовались различные архитектуры нейронных сетей, в частности древовидные варианты модели ИНС, которые представляют собой адаптивную сетевую систему нечеткого вывода (ANFIS), вероятностные нейронные сети (PNN) и обобщенные регрессионные нейронные сети (GRNN). Эти архитектуры использовались для решения различных задач, а именно обнаружение неисправностей, классификация и определение местонахождения неисправностей. Предложенные модели были обучены и протестированы с использованием смоделированного набора данных в Simulink [19]. Авторы Jarndal A. и Alsyouf I. расширили предыдущее исследование, используя

нейросетевую модель PNN для классификации неисправностей и метод упругого распространения (RPROP) для определения местоположения неисправностей [20]. В работе [21] определение типа неисправности и ее местоположения реализовано с использованием параллельной нечеткой логики и применялось на данных различных модельных линиях электропередач.

Частотные преобразования, такие как вейвлет-преобразование [22], также использовались для обнаружения неисправностей. Например, Шарма Р. с соавторами предложили гибридный метод для классификации неисправностей, локализации неисправностей и задач обнаружения неисправностей [23]. В методе, предложенном в этом исследовании, использовалось вейвлет-преобразование вместе с модульной моделью ИНС для решения этих задач в смоделированных многофазных линиях передачи. Также исследовалась эффективность использования вейвлет-преобразования и различных архитектур ИНС на смоделированных данных для этих задач.

Еще одним широко используемым методом машинного обучения для обнаружения ошибок является метод опорных векторов (SVM). Например, три модели SVM с различными функциями ядра использовались для обнаружения ошибок с использованием модельных данных. В этом исследовании сообщалось, что модель SVM, основанная на гауссовской радиальной базисной функции ядра (RBF), превосходит другие модели SVM. Авторы работы [24] выполнили обнаружение и классификацию неисправностей с помощью классификатора SVM. Они также смоделировали трехфазную линию электропередачи в среде MATLAB и использовали модельные данные для проверки своей SVM-модели.

В работе [25] была предложена новая сезонная и трендовая декомпозиция с использованием метода локально подогнанных регрессионных моделей (STL), а модель SVM с ядром RBF использовалась для распознавания ЧР. Авторы обучили и протестировали свою модель на наборе данных VSB, о котором подробно написано далее. В результате они получили значение точности определения реальных сигналов ЧР, равное 88%. В другой работе предлагается и исследуется уникальный метод обнаружения неисправностей на основе аномалий с использованием моделей на основе аномалий OC-SVM и PCA [26]. Две модели проверены на наборе данных VSB и показали хорошие результаты с точностью 80%.

Таким образом, для обнаружения и классификации неисправностей в линиях электропередач использовались различные методы, такие как ИНС, SVM, вейвлет-преобразование и т. д. Модели, использующие эти методы, применялись для имитации наборов данных, а также реальных наборов данных, таких как набор данных VSB. Результаты, полученные с помощью этих моделей, показывают, что они эффективны для обнаружения и классификации неисправностей, а также для определения их местоположения. Однако реальное практическое внедрение этих методов вызывает большие сложности. Вызвано это тем, что система сбора данных о напряжении большой амплитуды и их первичной обработки с высокой частотой дискретизации по понятным причинам оказывается весьма сложной и дорогостоящей.

СИСТЕМЫ СБОРА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Очевидно, что для диагностики возникновения ЧР в данной конкретной высоковольтной электрической сети необходима система сбора исходных данных о ее текущем состоянии, работающая в режиме реального времени. Такая система должна обеспечить регистрацию высокочастотных составляющих спектра тока и напряжения в каждой фазе линий электропередачи, поэтому применение традиционных систем измерения на базе измерительных трансформаторов тока и напряжения невозможно.

Известны различные системы сбора первичной информации, описанные, например, в [27, 28]. В данной работе для разработки и оценки эффективности работы нейронной сети для контроля возникновения частичного разряда в надземных силовых электросетях был использован готовый набор данных VSB, собранный в Остравском технологическом центре Технического университета г. Остравы в Чехии [29]. Его преимущество в том, что это реальный набор данных, подходящий для обучения системы мониторинга неисправностей на базе интеллектуального анализа, поскольку его объем достаточно велик. Он был создан VSB с использованием разработанного инновационного устройства для контроля импульсных составляющих электрических сигналов, генерируемых ЧР в системе изоляции реальной линии электропередач, и дает данные с достаточно высокой частотой дискретизации. Данное устройство представляет собой однослойную катушку C_{coil} , намотанную вокруг проводника линии для регистрации импульсной составляющей напряжения электрического поля рассеяния вдоль этой линии. Временная характеристика этой составляющей последовательно согласуется по амплитуде с помощью емкостного делителя напряжения с фиксированным коэффициентом деления, обеспечиваемым конденсаторами C_1 и C_2 (рис. 1). Емкостной делитель совместно с катушкой индуктивности R_1-L_1 образует фильтр нижних частот, требуемая амплитудная характеристика которого обеспечивается подбором величины сопротивления резистора R_1 . Информационный сигнал U_{PO} снимается с выходной емкости емкостного делителя, параллельно которой подключена указанная катушка индуктивности [30]. Предложенное устройство прикрепляется к изолированному проводнику ЛЭП для получения данных о ЧР.

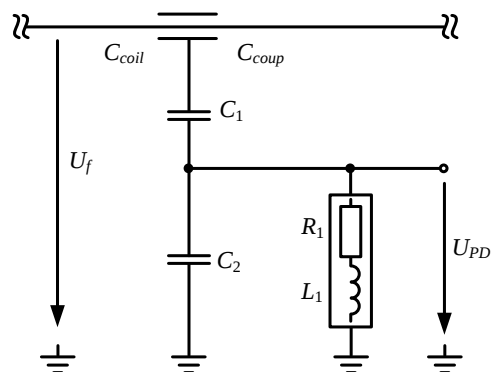


Рис. 1. Принципиальная схема измерительного устройства VSB для контроля импульсной составляющей сигнала напряжения

По сравнению с другими возможными решениями, которые бесконтактным методом измеряет ток в проводнике с использованием датчиков на основе эффекта Холла или катушки Роговского, метод VSB экономически кажется более оправданным.

Набор данных VSB содержит 8712 выборок, и каждая выборка представляет собой временной ряд, в котором 800 000 измерений напряжения хранятся в виде целых чисел с точностью 8 бит. Эти сигналы передаются из реальной трехфазной электросети, работающей на частоте 50 Гц, и все фазы записываются в течение одного полного цикла сети (20 миллисекунд). То есть частота дискретизации составляет 40 МГц. Кроме того, в наборе данных VSB есть поле под названием «Класс», которое определяет тип каждого сигнала, то есть «Норма» или «Неисправность», сигналы помечены как «0» и «1» соответственно. С другой стороны, большинство отсчетов в наборе данных VSB относятся к нормальным сигналам (8187 образцов), а остальные (525 образцов) – к сигналам, содержащим данные о ЧР. Сильный разрыв между количеством нормальных и «неисправных» образцов в наборе данных VSB может привести к плохим результатам классификации, поскольку классификаторы будут смещаться к мажоритарному классу («Норма»). Следовательно, необходима балансировка данных, что и выполняется в предложенной ниже методике.

Следует отметить, что при использовании разработанной системы диагностики для определения возникновения ЧР, описанной ниже, может быть использован любой способ регистрации высокочастотных составляющих спектра тока и напряжения исследуемой ЛЭП, позволяющий формировать набор данных с требуемой частотой дискретизации, достаточной для дальнейшей обработки.

МЕТОДОЛОГИЯ И МОДЕЛИ

Предлагаемая система искусственного интеллекта предназначена для определения возникновения ЧР по данным напряжения в трехфазной линии электропередач. Методология формирования этих данных подробно описана выше в предыдущем разделе статьи. Поскольку модели искусственного интеллекта не могут работать, оперируя измерениями напряжения в исходном виде из-за очень большой длины, исходный сигнал проходит предварительную обработку, при которой измерения напряжения разрезаются на фрагменты. После этого выполняется процесс извлечения признаков, чтобы выделить определенную частотную составляющую данных. Затем эти составляющие помещаются в тензор, нормализуются и разделяются на обучающую и тестовую выборки. Эти данные используются для многократного обучения сети с целью определения оптимального вектора гиперпараметров выбранной модели классификации (количества слоев, нейронов и др.), которая соответствует оптимальному количеству эпох обучения с наибольшим количеством верно выполненных классификаций. После этого оптимизированная по гиперпараметрам модель классификации обучается на записях полных данных без разделения на частотные составляющие. Это дает базовую модель для оценки эффективности разделения входных данных на частотные составляющие. А затем две другие нейронные сети аналогичной архитектуры обучаются на частотных составляющих по отдельности.

На **рис. 2** показана схема обучения предлагаемой системы обнаружения ЧР. Поясним процедуры методики обучения нейронных сетей, реализующей данную схему. Видно, что используемая методика состоит из 4 последовательных этапов, а именно: предварительная обработка данных, предварительная подготовка нейросетевой модели, обучение, тестирование. Рассмотрим подробно процедуры на каждом из указанных этапов.

1. Предварительная обработка данных. Исходные данные, которые формируются в специальном файле по результатам измерения напряжения по трем фазам в контролируемой линии электропередач (процедура формирования аналогична той, которая описана выше в разделе «Набор данных VSB»), загружаются из этого файла и балансируются путем удаления случайных образцов, соответствующих классу «Норма», так, чтобы в выборке получилось равное количество образцов, относящихся к двум классам. Далее образцы разделяется на сегменты длиной 400 измерений, и для каждого сегмента конструируется вектор признаков, содержащий нормализованные данные напряжения по всем трем фазам, или их частотные составляющие, сконструированные с помощью фильтрации. В качестве примера на **рис. 3** показаны исходные данные, взятые из упомянутого выше набора данных VSB.

2. Предварительная подготовка модели. Она необходима для определения оптимальных гиперпараметров (количества слоев, нейронов) нейросети, которые соответствуют балансу между недостаточно обученной и переобученной сетью, при приемлемом по времени количестве эпох обучения.

3. Обучение. ИНС обучается с использованием исходных и сконструированных ранее признаков и оптимальных гиперпараметров.

4. Тестирование. Затем модель проверяется на тестовом наборе данных для оценки ее производительности. Данные разделяются в отношении 3:1. Большая часть используется для обучения нейронной сети, меньшая для оценки качества ее работы.

Описанные этапы методики обучения нейронных сетей детализированы на **рис. 4**.

Для фильтрации с целью выделения высокочастотной и низкочастотной составляющих исходного сигнала на этапе предобработки использовался алгоритм Кули-Тьюки, широко известный как быстрое преобразование Фурье (БПФ).

Чтобы выделить требуемую составляющую сигнала выполнялось прямое преобразование Фурье, затем амплитуды ненужных частот обнулялись, и выполнялось обратное преобразование Фурье:

$$\hat{U} = FFT(U);$$

$$\hat{U}_{hp} = \hat{U}[f] = 0, f < 10^7 \text{ Гц};$$

$$\hat{U}_{lp} = \hat{U}[f] = 0, f > 10^4 \text{ Гц};$$

$$U_{hp} = IFFT(\hat{U}_{hp});$$

$$U_{lp} = IFFT(\hat{U}_{lp}),$$

где f – частота составляющей, Гц; U_a, U_b, U_c – значения напряжения по 3-м фазам.

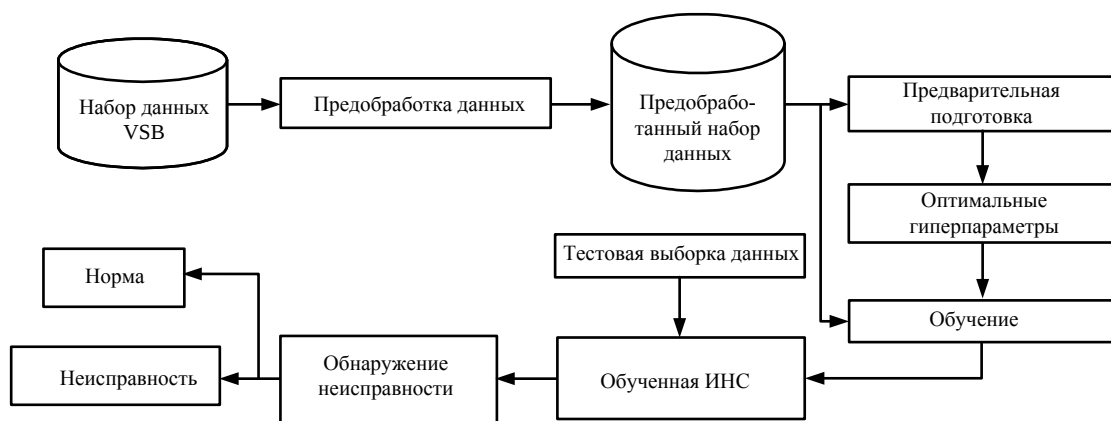


Рис. 2. Методика обучения предлагаемой системы обнаружения неисправностей

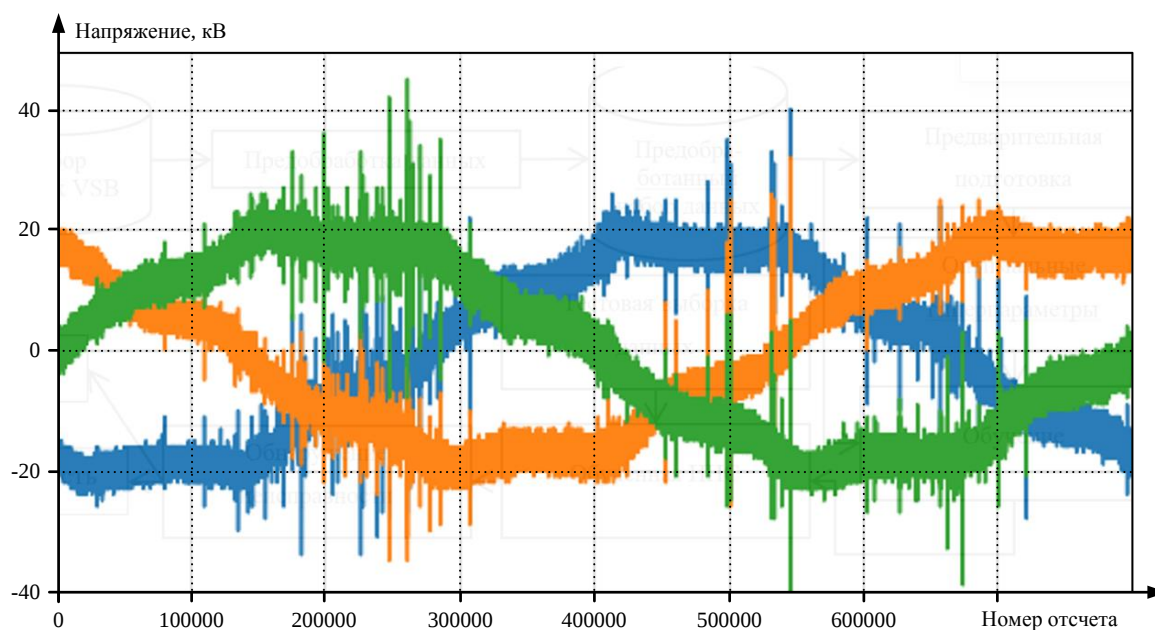


Рис. 3. Пример образца исходных данных, содержащих информацию о ЧР

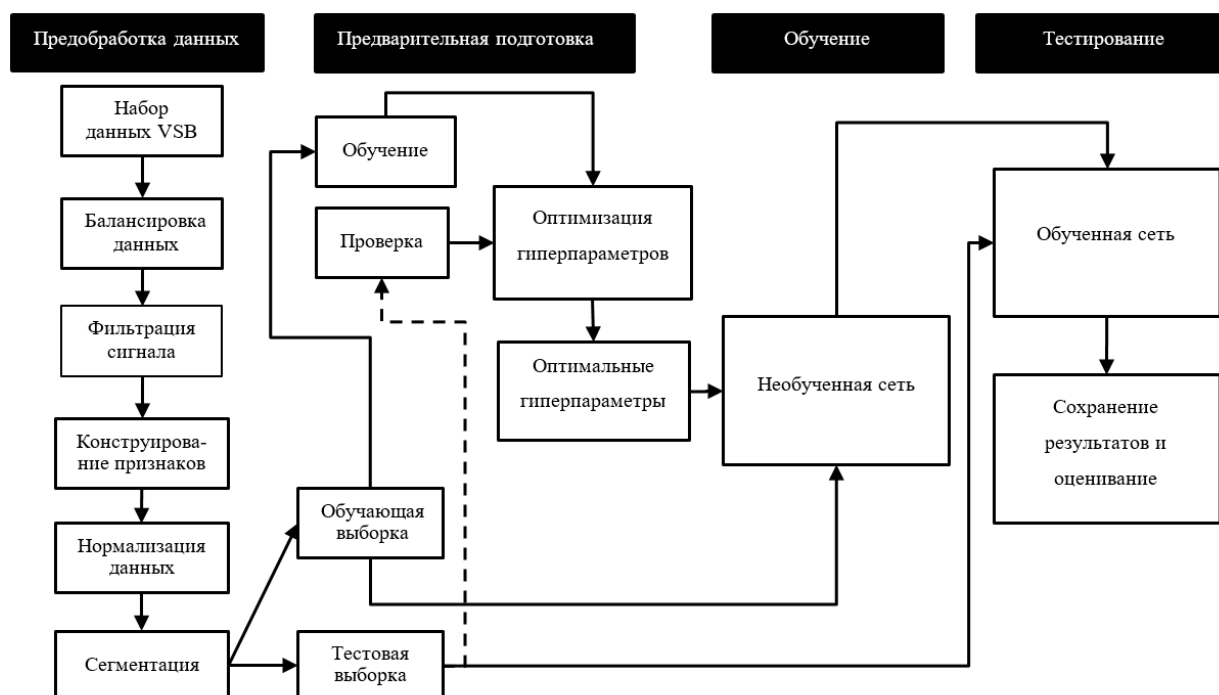


Рис. 4. Схема предлагаемой методики обнаружения неисправностей на основе анализа частотных составляющих

Таким образом, формируется три набора признаков для обучения нейронной сети:

- 1) исходный сигнал;
- 2) высокочастотная составляющая (ВЧ);
- 3) низкочастотная составляющая (НЧ).

На рис. 5 показаны спектры сигнала и его составляющих, полученные с помощью применения приведенных выше формул, в диапазоне частот от 50 Гц, а также высокочастотной составляющей.

В качестве НЧ используются составляющие с частотой ниже 10 кГц, а ВЧ, соответственно, выше 10 МГц.

Сегментация данных необходима для разделения больших образцов на более мелкие фрагменты, в которых легче обнаружить информацию, свидетельствующую о возникновении неисправности. Это позволяет сократить диапазон изменения напряжения в каждом фрагменте и способствует более быстрому обучению нейронной сети. Наконец, входные данные нормируются обычным образом с помощью z-оценок и далее используются для обучения нейросетевых моделей.

На рис. 6 показан пример образцов сконструированных признаков, полученных в результате применения фильтров на основе БПФ, то есть выделенные НЧ- и ВЧ-составляющие исходного сигнала.

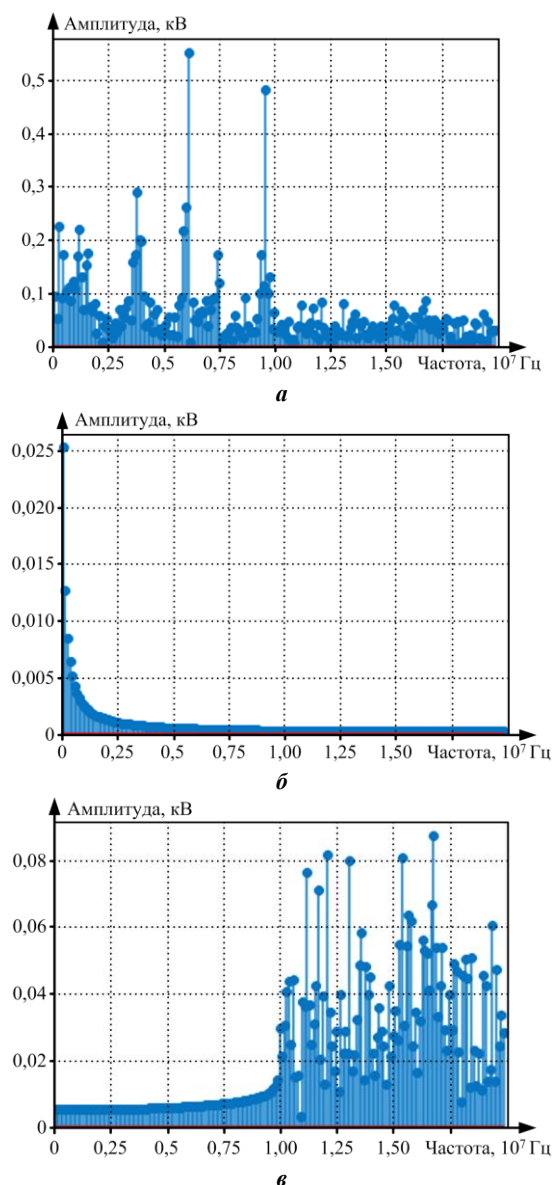


Рис. 5. Спектр сигнала (а) и его низкочастотная (б) и высокочастотная (в) составляющие

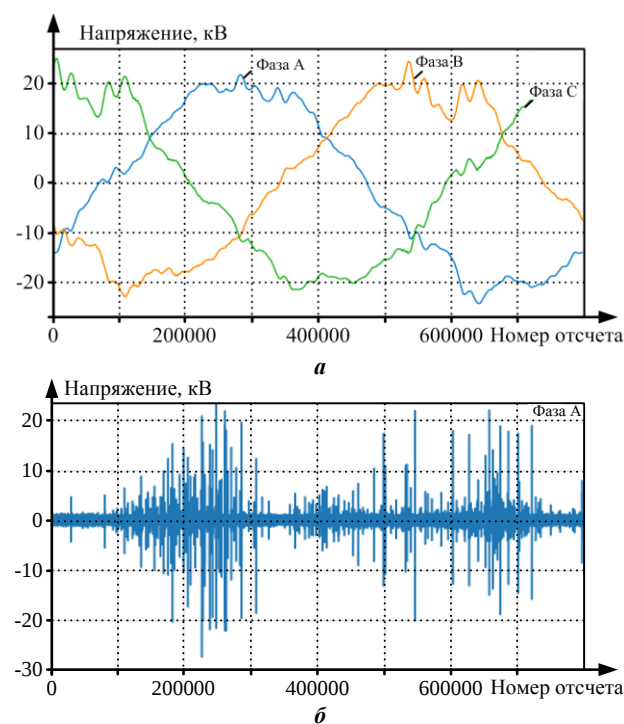


Рис. 6. Пример образцов сконструированных признаков: НЧ-составляющей по 3-м фазам (а) и ВЧ-составляющей по 1-й фазе сигнала, содержащего данные о ЧР (б)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки результатов необходима базовая модель. Она важна для понимания результатов работы ИНС, поскольку обеспечивает реперную точку для сравнения производительности нейронных сетей и служит эталоном для оценки результатов работы нейросетевых моделей, что позволяет показать, насколько обучение на разных наборах входных данных влияет на результаты работы сети. Это, в частности, помогло выявить, что основную роль при идентификации ЧР играет именно ВЧ-составляющая. Для этого в качестве входных данных для базовой модели использовался только исходный сигнал, а две другие модели обучались на сконструированных нами дополнительно признаках – ВЧ- и НЧ-составляющих сигнала. При этом архитектура используемых ИНС одинакова и показана на рис. 7.

Идея объединения слоев Conv1D и LSTM, заложенная в этой архитектуре, была предложена многими исследователями [31]. Вход представляет собой последовательность трехмерных тензоров с формой (образцы, временные интервалы, признаки). Первый слой – это слой TimeDistributed Conv1D с 64 фильтрами свертки размером 3 и функцией активации ReLU.

Второй слой представляет собой слой TimeDistributed Conv1D с 64 фильтрами размером 3 и активацией ReLU. Третий слой – это слой TimeDistributed Dropout с коэффициентом прореживания 0.5. Четвертый слой – это слой TimeDistributed MaxPooling1D с размером пула 2. Пятый слой – это слой TimeDistributed Flatten. Шестой слой – это слой LSTM со 100 нейронами. Последний слой Dense с 1 нейроном необходим для формирования выхода сети.

Нейронные сети оценивались путем сравнения их производительности на тестовом наборе данных, со-

ставляющем 1/3 от всех полученных после балансировки данных, при этом первая модель обучалась на полном сигнале, вторая и третья на ВЧ- и НЧ-составляющей соответственно. Оцениваемые показатели – точность, верность, чувствительность, специфичность, оценка F_1 и AUC. Подробно определение этих характеристик дано в работе [32].

Чувствительность S_e определяется как процент образцов, которые верно диагностированы как неисправные, и выражается как

$$S_e = \frac{T_p}{P} 100\% = \frac{T_p}{T_p + F_n} 100\%,$$

где T_p – количество неисправных образцов, правильно диагностированных как неисправные; P – общее количество образцов в тестовой выборке; F_n – количество неисправных образцов, правильно диагностированных как исправные.

Специфичность S_p определяется как процент образцов, в которых отсутствуют данные о неисправности, правильно диагностированных как исправные:

$$S_p = \frac{T_n}{N} 100\% = \frac{T_n}{T_n + F_p} 100\%,$$

где T_n – количество исправных образцов, правильно диагностированных как исправные; N – общее количество образцов, не содержащих данные о неисправности; F_p – количество исправных образцов, ошибочно диагностированных как неисправные.

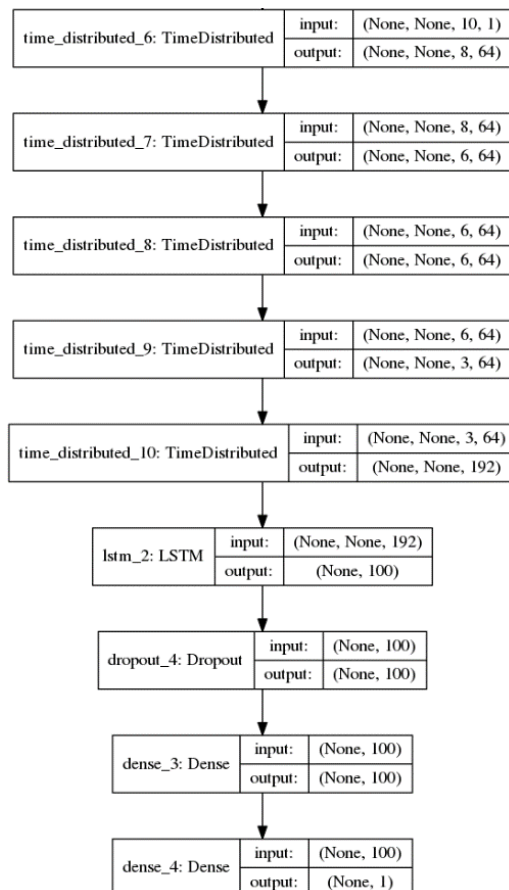


Рис. 7. Архитектура используемой глубокой нейронной сети

Точность A_c классификации определяется как

$$A_c = \frac{T_p + T_n}{P + N} 100\%.$$

Верность P_r классификации определяется как

$$P_r = \frac{T_p}{T_p + F_p} 100\%.$$

Оценка F_1 определяется как среднее гармоническое между точностью и чувствительностью:

$$F_1 = \frac{2T_p}{2T_p + F_p + F_n}.$$

ROC представляет собой график, отображающий соотношение между T_p и F_p при варьировании порога решающего правила, а AUC представляет собой меру производительности системы диагностики, представляющую собой площадь, ограниченную сверху ROC-кривой и осью абсцисс снизу. Чем выше AUC, тем лучше система диагностирует неисправности, отличая их от образцов, не содержащих данные о неисправности. Для идеальной системы, например, $AUC=1$, а $AUC=0,5$ показывает, что система диагностики работает случайным образом. В качестве неисправности здесь подразумевается ЧР.

В таблице показаны результаты оценки моделей, обученных на разных признаках на протяжении 30 эпох обучения, по всем названным выше оцениваемым показателям качества работы нейронной сети – точности, чувствительности, специфичности, оценки F_1 и AUC.

В качестве функции потерь применялась обычно используемая в случае классификации по двум классам бинарная кроссэнтропия, а в качестве оптимизатора – Adam с параметрами по умолчанию [33]. Он позволяет быстро найти минимум функции потерь, близкий к глобальному, при приемлемом времени обучения модели. При этом обучающие данные были разделены на пакеты по 16 образцов в каждом, для того чтобы распараллелить вычисления на множестве процессоров. Каждая итерация обучения по всем пакетам, как известно, называется эпохой. Для контроля обучения использовался параметр точности модели, отражающий процент верно выполненных классификаций. Графики изменения этого параметра на протяжении 30 эпох обучения показаны на рис. 8.

Результаты оценки нейронных сетей, обученных на разных признаках в течении 30 эпох обучения

Характеристики	Полный сигнал	ВЧ-составляющая	НЧ-составляющая
Максимальная точность, достигнутая в течении 30 эпох обучения, %	89,34	88,47	72,33
Точность A_c , %	88,47	84,14	71,18
Чувствительность S_e , %	98,13	82,42	90,75
Специфичность S_p , %	80,1	85,71	51,72
Верность P_r , %	81,02	84,30	65,14
Оценка F_1	0,8876	0,8529	0,7584
AUC	0,8912	0,8561	0,7123

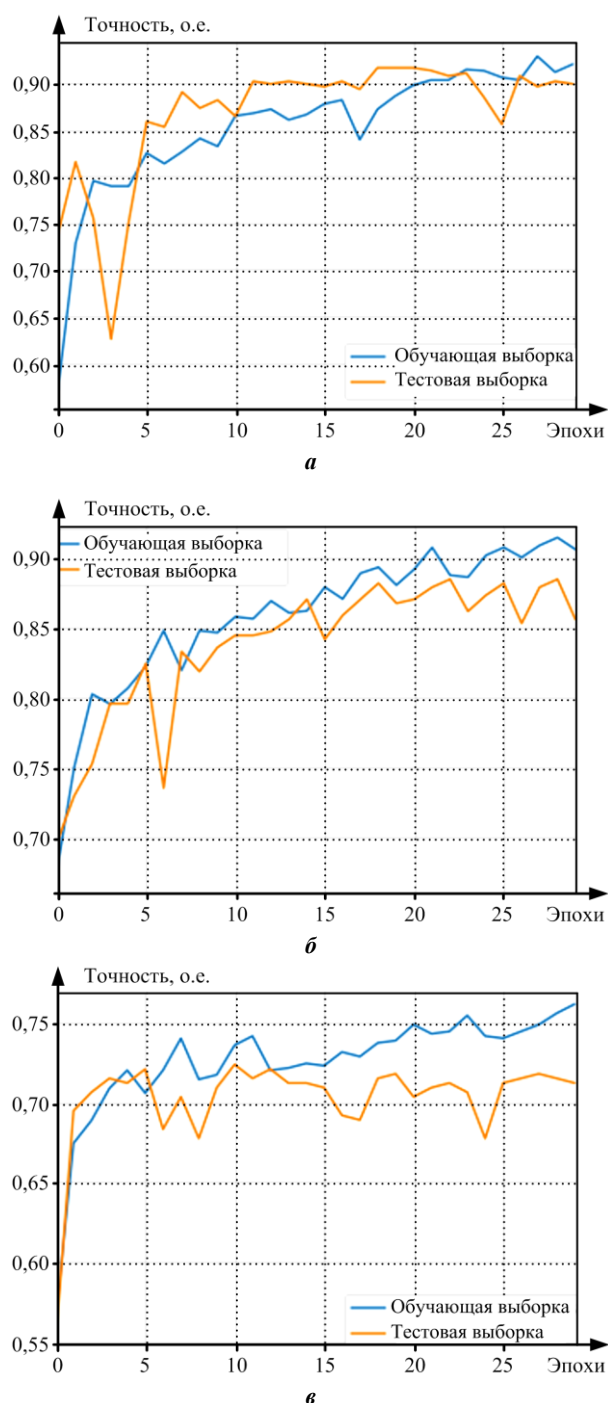


Рис. 8. Изменение точности сетей при обучении на разных признаках:
а – полный сигнал; б – ВЧ-составляющая;
в – НЧ-составляющая

Максимальная точность, достигнутая сетью на протяжении обучения, показана в **таблице**.

Обучающие и тестовые выборки необходимы при обучении нейронной сети, поскольку они помогают заметить переобучение. Переобучение происходит, когда нейронная сеть начинает просто запоминать обучающие данные и не может больше выявить закономерности, которые можно было бы обобщить на новые данные. Разделив данные на обучающую и тестовые выборки, как это обычно принято делать, можно оценить производительность сети на данных, которые она раньше не видела, что будет ближе к результатам, полученным в ее реальном практическом применении.

Как видно из **таблицы** и **рис. 8**, максимальная точность ИНС, обученных на полном сигнале и его ВЧ-составляющей, отличается менее чем на 1%, при этом максимальная точность сети, обученной на НЧ-составляющей, ниже на 17%. Все остальные показатели сети, обученной на НЧ-составляющей, также гораздо ниже.

Это позволяет утверждать, что основную роль при идентификации ЧР играет высокочастотная составляющая, то есть электромагнитные волны, возникающие при частичном пробое изоляции и имеющие частоту 10-20 МГц. Если сравнивать эти результаты с другими работами, то можно говорить, что ранее ВЧ-составляющая электромагнитной волны ЧР исследовалась только в диапазонах 85-110, 600-700 МГц [34]. Однако в этом диапазоне точной диагностики могут мешать помехи, создаваемые эфирным телерадиовещанием.

Также в других работах ВЧ-составляющая ЧР была отмечена в диапазоне 50-800 МГц. Использование более низкого частотного диапазона, как предлагается в настоящей работе, позволит удешевить конструкцию приемника за счет упрощения блока преобразователя частоты. В работе [35] исследовался спектр ЧР в диапазонах 10-210, 1800-2000 МГц, однако не было показано, что сигнал ЧР в этих диапазонах можно отличить от разрядов естественного происхождения, например грозовых.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложенная система диагностики на основе интеллектуального анализа данных в HF-диапазоне позволяет установить факт возникновения частичного разряда в надземных силовых электросетях.

2. Показано, что большую роль в диагностике ЧР играет частотная составляющая в HF-диапазоне с частотой 10-20 МГц. В работе приводятся доказательства того, что этот частотный диапазон можно использовать для достаточно надежной диагностики ЧР на базе интеллектуального анализа данных, так как разработанная система искусственного интеллекта показала относительно высокую точность диагностики, составляющую около 88%. За счет более совершенных методов диагностики в будущих работах указанную точность планируется повысить.

3. Полученные результаты открывают путь к созданию новых устройств для диагностики возникновения ЧР. Данные в указанном диапазоне частот можно достаточно просто получить дистанционно с помощью относительно недорогих радиотехнических средств. Разработка таких устройств является следующим самостоятельным этапом проводимых работ, где планируется создание устройства, с помощью которого, используя принцип радиопеленгации, можно будет также определять местоположение источника ЧР.

Список источников

1. Ушаков В.Я. Современная и перспективная энергетика: технологические, социально-экономические и экологические аспекты. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 469 с.
2. IEA (2020), Power Systems in Transition, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/power-systems-in-transition>, License: CC BY 4.0. (дата обращения 19.05.2023)
3. Menthula J. A Review on power system faults and protection // International Journal of Engineering Research &

- Technology (IJERT). 2022. Vol. 11, Issue 4. Pp. 395-398. doi: 10.17577/IJERTV11IS040201
4. Характеристики и параметры технического состояния воздушных линий электропередачи / О.Я. Солёная, А.В. Рысин, С.В. Солёный, В.П. Кузьменко, Е.С. Квас // Известия вузов. Приборостроение. 2021. № 7(64). С. 583-588.
5. Арбузов Р.С., Овсянников А.Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи. Новосибирск: Наука, 2009. 135 с.
6. Suhas Aithal. VSB Power Line Fault Detection. <https://suhaskvaithal.medium.com/vsb-power-line-fault-detection-47f9e94d11d2> (дата обращения 19.05.2023)
7. Исследование частичных разрядов в опорных изоляторах / Д.А. Поляков, К.И. Никитин, Н.А. Терещенко, А.С. Новосёлов, Я.П. Билевич // Омский научный вестник. 2020. № 1(169). С. 32–38. doi: 10.25206/1813-8225-2020-169-32-38
8. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007. 155 с.
9. Foorthuis R. On the nature and types of anomalies: a review of deviations in data. *Int. J. Data Sci. Anal.* 2021. No. 12(4). Pp. 297-331. doi: 10.1007/s41060-021-00265-1
10. Катков В.И. Аналитический обзор методов и систем контроля электрических разрядов в изоляторах высоковольтных линий электропередач // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых): материалы Международной молодёжной научной конференции, 7–8 ноября 2019 года, Казань, В 6 т. Казань: Изд-во ИП Сагеева А.Р., 2019. Т. 3. С. 274-277.
11. Регистрация и анализ параметров частичных разрядов на высоковольтной линии электропередачи напряжением 35 кВ и выше / А.М. Гатауллин, М.Н. Бадретдинов, Д.Ф. Губаев, В.Л. Матухин // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2007. № 7-8. С. 44-50.
12. Deep learning techniques in intelligent fault diagnosis and prognosis for industrial systems: a review / S. Qiu, X. Cui, Z. Ping, N. Shan, Z. Li, X. Bao, X. Xu // *Sensors*. 2023. No. 23. 1305. doi: 10.3390/s23031305
13. Обалдин М.Д., Колобанов П.А. Интеллектуальный алгоритм одностороннего определения места повреждения на линиях электропередачи // Интеллектуальная электроника. 2018. № 1. С. 84-92.
14. Дементьев С.С., Блохина М.И. Диагностика воздушных линий электропередачи с применением системы интеллектуальной импульсной рефлектометрии // Энерго- и ресурсосбережение: Промышленность и транспорт. 2020. № 2(31). С. 6-10.
15. Верзунов С.Н. Система искусственного интеллекта для онлайн-мониторинга подземных силовых кабельных линий на основе технологий глубокого обучения // Проблемы автоматизации и управления. 2021. № 3(42). С. 83-94.
16. Application of using fault detection techniques in different components in power systems / M.Y. Abd-alkader, A.M.Dr. Ebid, I. Mahdi, I.A. Nossair // *Future Engineering Journal*. 2021. No. 2(2). Pp. 1-8.
17. Yadav A., Thoke A.S., Patel R. N. Fault classification of double circuit transmission line using artificial neural network // *International Journal of Systems Science*. 2008. No. 1(4). P. 750-755.
18. Intelligent Fault Detection and Classification Based on Hybrid Deep Learning Methods for Hardware-in-the-Loop Test of Automotive Software Systems / M. Abboush, D. Bamel, C. Knieke, A. Rausch // *Sensors*. 2022. No. 22. 4066. doi:10.3390/s22114066
19. Wang S., Dehghanian P. On the use of artificial intelligence for high impedance fault detection and electrical safety // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2020. No. 6(56). Pp. 7208-7216. doi: 10.1109/TIA.2020.3017698.
20. Jarndal A., Alsyouf I. On the usefulness of pre-processing methods in rotating machines faults classification using artificial neural network // *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2020. No. 7(1). doi: 10.22055/JACM.2020.35354.2639
21. Adhikari S., Sinha N., Dorendrajit T. Fuzzy logic based on-line fault detection and classification in transmission line // *Springer Plus*. 2016. No. 5. P. 1002. doi: 10.1186/s40064-016-2669-4
22. Верзунов С.Н. Вейвлет-преобразование как инструмент анализа магнитовариационных данных // Проблемы автоматизации и управления. 2014. № 2(27). С. 52-61.
23. Sharma P., Saini D., Saxena A. Fault detection and classification in transmission line using wavelet transform and ANN // *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2016. No. 4(5). Pp. 456-465. doi:10.11591/eei.v5i3.537
24. Zen H., Tokuda K., Alan W. Black A.W. Statistical parametric speech synthesis. *Speech Communication*. 2009. Vol. 51. Iss. 11. Pp. 1039-1064. doi: 10.1016/j.specom.2009.04.004
25. Dong M., Sun Z., Wang C. A pattern recognition method for partial discharge detection on insulated overhead conductors // *Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. IEEE, 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/CCECE.2019.8861809
26. Wadi M., Elmasry W. An anomaly-based technique for fault detection in power system networks // *Proceedings of the International Conference on Electric Power Engineering – Palestine (ICEPE-P)*. IEEE, 2021. Pp. 1–6. doi: 10.1109/ICEPE-P51568.2021.9423479
27. Innovative partial discharge measurement and analysis technique for the evaluation of the reliability of insulation systems / F. Sciocchetti, A. Caprara, F. Puletti, G.C. Montanari, A. Cavallini // *Proceedings of Grid and Cooperative Computing (GCC)*. 2005. <https://studylib.net/doc/5917238/innovative-partial-discharge-measurement> (дата обращения 19.05.2023)
28. Система сбора данных для мониторинга состояния изоляции кабелей из сшитого полиэтилена / Д.А. Поляков, В.Н. Пугач, К.И. Никитин, Д.А. Юрчук // Омский научный вестник. 2017. № 4 (154). С. 70-73.
29. <https://www.kaggle.com/c/vsb-power-line-fault-detection/data> (дата обращения 19.05.2023)
30. Misak S., Pokorny V. Testing of a covered conductor's fault detectors // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015. No. 3(30). Pp. 1096-1103. doi: 10.1109/TPWRD.2014.2357072
31. Шолле Ф. Глубокое обучение на Python. СПб.: Питер, 2018. 400 с.
32. Верзунов С.Н., Раимжанов Х.А. Сравнение глубоких нейронных сетей на основе различных предварительно обученных CNN для диагностики COVID-19 по рентгеновским снимкам // Проблемы автоматизации и управления. 2021. № 1(40). С. 12-25.
33. <https://strathprints.strath.ac.uk/56089/> (дата обращения 19.05.2023)
34. Perotoni M.B., Marconi K. SDR-based spectrum analyzer based in open-source GNU radio // *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. 2021. No. 20(3). Pp. 542-555. doi: 10.1590/2179-10742021v20i31194
35. IEC TS 62478. High Voltage Test Techniques – Measurement of Partial Discharges by Electromagnetic and Acoustic Methods. International Electrotechnical Commission. 2016. 54 p.

Поступила в редакцию 19 мая 2023 г.

Принята к печати 26 июня 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SYSTEM FOR DIAGNOSING THE OCCURRENCE OF A PARTIAL DISCHARGE IN OVERHEAD POWER NETWORKS BASED ON DATA MINING IN THE HF BAND

Sergey N. Verzunov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Leading Research Scientist, Laboratory of Information and Measuring Systems, Institute of Machine Science and Automation, National Academy of Science of Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic, verzunov@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3130-2776>

Igor V. Bochkarev

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electrical Engineering, Power Faculty, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic, elmech@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>

An artificial intelligence system has been developed for diagnosing the occurrence of a partial discharge in the insulation of overhead power lines. In order to improve the accuracy of fault detection, several stages of preprocessing are used, such as separation into frequency components, balancing, segmentation and normalization of the initial data, which are measurements of the high-frequency components of the current and voltage spectrum in each phase of the power line. The paper shows that the main role in the identification of a partial discharge is played by electromagnetic waves that occur during a partial breakdown of insulation with a frequency of 10-20 MHz. To do this, the source data is divided by filtering into two components - high-frequency and low-frequency. The maximum accuracy of neural networks trained on the full signal and its high-frequency component differ by less than 1%, while the maximum accuracy of the network trained on the low-frequency component is 17% lower. To test the proposed system, a real data set was used, which makes it possible to speak about the possibility of practical application of the developed system. The developed artificial intelligence system showed a relatively high diagnostic accuracy of about 88%. Thus, with the help of data mining, it was shown that the main role in the identification of the PD is played by high-frequency components, that is, electromagnetic waves that lie in a certain frequency range and occur during a partial breakdown of the insulation. This opens the way to the creation of new methods for diagnosing and detecting the location of a PD source based on the use of this range.

Keywords: partial discharge, diagnostic system, neural network machine learning, data mining, neural network model, decimeter waves.

REFERENCES

- Ushakov V.Ya. *Sovremennaya i perspektivnaya energetika: tekhnologicheskie, sotsialno-ekonomicheskie i ekologicheskie aspekty*. [Modern and prospective energy: technological, socio-economic and environmental aspects]. Tomsk, Publishing House of TPU, 2008. 469 p. (In Russian)
- IEA (2020), Power Systems in Transition, IEA, Paris. Available at: <https://www.iea.org/reports/power-systems-in-transition>, License: CC BY 4.0. (accessed 19 May 2023)
- Menthula J. A Review on Power System Faults and Protection, International journal of engineering research & technology (IJERT). 2022, vol. 11, Iss. 04, pp. 395-398. doi: 10.17577/IJERTV11IS040201
- Solyonaya O.Ya., Rysin A.V., Soleny S.V., Kuzmenko V.P., Kvas E.S. Characteristics and parameters of the technical condition of overhead power lines. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*. [Journal of Instrument Engineering], 2021, vol. 64, no. 7, pp. 583-588. (In Russian)
- Arbuzov R.S., Ovsyannikov A.G. *Sovremennye metody diagnostiki vozduzhnykh liniy elektropredachi* [Modern methods of diagnostics of overhead power lines]. Novosibirsk, Nauka, 2009. 135 p. (In Russian)
- Suhas Aithal. VSB Power Line Fault Detection. 2021. Available at: <https://suhaskvaithal.medium.com/vsb-power-line-fault-detection-47f9e94d11d2> (accessed 19 May 2023)
- Polyakov D.A., Nikitin K.I., Tereshchenko N.A., Novoselov A.S., Bilevich Ya.P. Study of partial discharges in support insulators. *Omskiy nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2020, no. 1 (169), pp. 32-38. doi: 10.25206/1813-8225-2020-169-32-38 (In Russian)
- Vdoviko V.P. *Chatsichnye razryady v diagnostirovani vysokovoltnogo oborudovaniya* [Partial discharges in the diagnosis of high-voltage equipment]. Novosibirsk, Nauka, 2007. 155 p. (In Russian)
- Foorthuis R. On the nature and types of anomalies: a review of deviations in data. *Int J Data Sci Anal*. 2021, Iss. 12(4), pp. 297-331. doi:10.1007/s41060-021-00265-1
- Katkov V.I. Analytical review of methods and systems of control of electric discharges in high-voltage electric transmission insulators. *XXIV Tupolevskie chteniya (shkola molodykh uchenykh): Materialy Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii, 7-8 noyabrya 2019 goda, Kazan*. [XXIV Tupolev Readings (school of young scientists): Proceedings of the international youth scientific conference, November 7-8, 2019, Kazan]. Kazan, Sagieva A.R. Publ., 2019, vol. 3, pp. 274-277. (In Russian)
- Gataullin A.M., Badretdinov M.N., Gubaev D.F., Matukhin V.L. Registration and analysis of the parameters of partial discharges on a high-voltage power line with a voltage of 35 kV and higher. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki* [Power engineering: research, equipment, technology], 2007, no. 7-8, pp. 44-50. (In Russian)
- Qiu S., Cui X., Ping Z., Shan N., Li Z., Bao X., Xu X. Deep Learning Techniques in Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Industrial Systems: A Review. *Sensors*. 2023, no. 23, pp. 1305. doi:10.3390/s23031305
- Obaldin M.D., Kolobanov P.A. Intelligent algorithm for unilateral fault location on power lines. *Intellectualnaya elektronika* [Smart Electrical Engineering], 2018, no. 1, pp. 84-92. (In Russian)
- Dementiev S.S., Blokhina M.I. Diagnosis of overhead power lines using an intelligent pulse reflectometry system. *Energo- i resursosberezhenie: Promyshlennost i transport* [Energy and Resource Saving: Industry and Transport], 2020, no. 2(31), pp. 6-10. (In Russian)
- Verzunov S. N. Artificial intelligence system for online monitoring of underground power cable lines based on deep learning technologies. *Problemy avtomatiki i upravleniya* [Automation and control problems], 2021, no. 3(42), pp. 83-94. (In Russian)
- Abd-Elkader M.Y., Ebid A.M. Dr., Mahdi I., Nosseir I.A. Application of using fault detection techniques in different components in power systems. *Future Engineering Journal*. 2021, vol. 2, Iss. 2, pp. 1-8.
- Yadav A., Thoke A.S., Patel R. N. Fault classification of

- double circuit transmission line using artificial neural network. International Journal of Systems Science. 2008, no. 1(4), pp. 750-755.
 18. Abboush M., Bamal D., Knieke C., Rausch A. Intelligent Fault Detection and Classification Based on Hybrid Deep Learning Methods for Hardware-in-the-Loop Test of Automotive Software Systems. Sensors. 2022, no. 22, p. 4066. doi: 10.3390/s22114066
 19. Wang S., Dehghanian P. On the Use of Artificial Intelligence for High Impedance Fault Detection and Electrical Safety. IEEE Transactions on Industry Applications. 2020, no. 6(56), pp. 7208-7216. doi: 10.1109/TIA.2020.3017698
 20. Jarndal A., Alsyouf I. On the Usefulness of Pre-processing Methods in Rotating Machines Faults Classification using Artificial Neural Network. Journal of Applied and Computational Mechanics. 2020, no. 7(1). doi: 10.22055/JACM.2020.35354.2639
 21. Adhikari S., Sinha N., Dorendrajit T. Fuzzy logic based on-line fault detection and classification in transmission line. Springer Plus. 2016, no. 5, p. 1002. doi: 10.1186/s40064-016-2669-4
 22. Verzunov S.N. Wavelet transform as a tool for analyzing magnetovariational data. *Problemy avtomatiki i upravleniya* [Automation and control problems], 2014, no. 2(27), pp. 52-61. (In Russian)
 23. Sharma P., Saini D., Saxena A. Fault Detection and Classification in Transmission Line Using Wavelet Transform and ANN. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2016, no. 4(5), pp. 456-465. doi: 10.11591/eei.v5i3.537
 24. Zen H., Tokuda K., Alan W. Black A.W. Statistical parametric speech synthesis. Speech Communication. 2009, vol. 51, Iss. 11, pp. 1039-1064. doi: 10.1016/j.specom.2009.04.004
 25. Dong M., Sun Z., Wang C. A Pattern Recognition Method for Partial Discharge Detection on Insulated Overhead Conductors. Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE).IEEE, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/CCECE.2019.8861809
 26. Wadi M., Elmasry W. An anomaly-based technique for fault detection in power system networks. Proceedings of the International Conference on Electric Power Engineering – Palestine (ICEPE-P). IEEE, 2021, pp. 1–6. doi:10.1109/ICEPE-P51568.2021.9423479
 27. Sciocchetti F., Caprara A., Puletti F., Montanari G.C., Cavallini A. Innovative Partial Discharge measurement and analysis technique for the evaluation of the reliability of insulation systems. Proceedings of Grid and Cooperative Computing (GCC). 2005. Available at: <https://studylib.net/doc/5917238/innovative-partial-discharge-measurement> (accessed 19 May 2023)
 28. Polyakov D.A., Pugach V.N., Nikitin K.I., Yurchuk D.A. Data collection system for monitoring the state of XLPE cable insulation. *Omskiy nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2017, no. 4 (154), pp. 70-73. (In Russian)
 29. Kaggle.com. Available at: <https://www.kaggle.com/c/vsb-power-line-fault-detection/data> (accessed 19 May 2023)
 30. Misak S., Pokorný V. Testing of a Covered Conductor's Fault Detectors. IEEE Transactions on Power Delivery. 2015, no. 3(30), pp. 1096-1103. doi: 10.1109/TPWRD.2014.2357072
 31. Chollet F. *Glubokoe obuchenie na Python* [Deep learning with python]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2018. 400 p. (In Russian)
 32. Verzunov S.N., Raimzhanov Kh.A. Comparison of deep neural networks based on various pre-trained CNNs for diagnosing COVID-19 using X-rays. *Problemy avtomatiki i upravleniya* [Automation and control problems], 2021, no. 1(40), pp. 12-25. (In Russian)
 33. Strathprints.strath.ac.uk. Available at: <https://strathprints.strath.ac.uk/56089/>. (accessed 19 May 2023)
 34. Perotoni M.B., Marconi K. SDR-Based Spectrum Analyzer Based in Open-Source GNU Radio. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. 2021, no. 20(3), pp. 542-555. doi: 10.1590/2179-10742021v20i31194
 35. IEC TS 62478. High Voltage Test Techniques – Measurement of Partial Discharges by Electromagnetic and Acoustic Methods. International Electrotechnical Commission, 2016. 54 p.
- Верзунов С.Н., Бочкарев И.В. Система диагностики возникновения частичного разряда в надземных силовых электросетях на основе интеллектуального анализа данных в HF-диапазоне // *Электротехнические системы и комплексы*. 2023. № 3(60). С. 4-14. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-4-14](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-4-14)
- Verzunov S.N., Bochkarev I.V. System for Diagnosing the Occurrence of a Partial Discharge in Overhead Power Networks Based on Data Mining in the HF Band. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 3(60), pp. 4-14. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-4-14](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-4-14)

Анисимова Н.А., Варганова А.В., Мельников М.С., Петухова О.И.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭНЕРГОУЗЛОВ С СОБСТВЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ И ВНЕШНИМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Системы электроснабжения промышленных предприятий с целью обеспечения надежности электроснабжения и повышения экономичности, как правило, имеют собственную генерирующую базу и внешнее энергоснабжение. Изменение нагрузки в течение суток ставит задачу определения и прогнозирования оптимальной мощности покупаемой из энергосистемы. Важной задачей в таких условиях является также разработка плановых ремонтов основного генерирующего оборудования промышленной системы электроснабжения. Данная работа посвящена разработке алгоритма определения оптимальной мощности, покупаемой из энергосистемы, при учете собственной мощности от местных тепловых электростанций. Методика расчета учитывает основные особенности промышленных энергоузлов, а именно использование нескольких видов топлива в условиях одной электростанции, наличие нескольких крупных промышленных электростанций, передачу мощности в системе электроснабжения (потери активной мощности в системе), передаточную способность элементов, соблюдение условий по допустимым напряжениям в узлах. Алгоритм основан на методе динамического программирования в сочетании с методом последовательного эквивалентирования, что обеспечивает возможность поиска целого набора оптимальных управлений при множестве возможных вариантов решений. Особую сложность при расчетах представляла разработка моделей энергосистемы и собственных источников энергии. В данной работе модели источников представлены в табличном виде и имеют зависимость мощности на клеммах генератора от себестоимости тонны свежего пара. Для энергосистем модели представляют собой зависимость мощности, принимаемой из энергосистемы, от тарифа на электроэнергию. Эквивалентная модель внешних источников учитывает условия работы рынка электроэнергии. По результатам исследования определены затраты и рекомендуемые мощности на прием из энергосистемы в условиях промышленного энергоузла.

Ключевые слова: электроснабжение, энергоузел, промышленная электростанция, энергосистема, оптимизация, динамическое программирование, рынок электроэнергии, тариф на электроэнергию, среднесрочное планирование, технико-экономическая модель

ВВЕДЕНИЕ

Российская Федерация обладает огромным потенциалом по энергосбережению. Существующий исторически сложившийся подход к ценообразованию и тарифу, а также экономически нецелесообразное использование энергетических ресурсов является, с одной стороны, важной проблемой национальной экономики, но с другой – активизирует задачи энергосбережения и увеличения эффективности [1].

Структура генерирующих мощностей России такова, что из установленной мощности существующих энергоблоков на атомных электростанциях производится 10 % всей электроэнергии, а на гидроэлектростанциях приходится 20% мощности. Остальная часть генерирующих мощностей работают на не возобновляемых источниках электроэнергии. Из тепловых станций 63% – газовые и 20% – угольные, которые работают с очень низким электрическим КПД. В европейской доле России на газе вырабатывается более 80% электроэнергии.

По мировым исследованиям, Россия является лидером по количеству применяемого газа на производство единицы продукции. Для сравнения в США потребление газа в 6 раз ниже, в Германии в 8 раз. В соответствии с анализом энергоэффективности, проведенным институтом энергетического проектирования, был сделан вывод, что Россия тратит лишние 40-50 миллиардов метров кубических газа. Например, в Европе 210–250 г условного топлива приходится на 1 кВт·ч выработанной электроэнергии, в России средний удельный расход

топлива на выработку электроэнергии составляет 335 и 140 г условного топлива на 1 кВт·ч.

Если выбирать между увеличением производственных мощностей генерации и осуществлением энергосберегающих мероприятий у потребителей, то последний метод потребует в 3-4 раза меньше инвестиций.

Задачи повышения эффективности режимов работы систем электроснабжения промышленных предприятий актуальны с начала восьмидесятых годов прошлого столетия. Так, авторами работы [2] Утарбаевым С.С., Яшковым В.А., Курыло Д.А., Сибикиным Ю.Д. был собран и описан опыт работы по оптимизации потребления энергоресурсов, полученный на примере Гурьевской энергосистемы.

Доктором экономических наук Денисовым В.И. был предложен метод расчёта, основанный на анализе термодинамических свойств отборного пара, с целью увеличения энергосбережения топлива, при комбинированном способе производства электрической и тепловой энергии [3]. В данном методе автором разработан упрощенный пример оценки фактической экономии топлива на действующей ТЭЦ, а также соответствующее распределение полученной экономии между производством тепла и электроэнергией. Статья содержит порядок расчета удельных расходов топлива на производство каждого вида энергии.

В статье Байбакова С.А. отражены применяемые способы распределения тепла топлива на ТЭЦ между выработкой тепла и электроэнергией, предложен алгоритм расчета текущей экономии тепла и топлива для конкретной ТЭЦ при использовании и изменении параметров ее теплофикационного отбора. Предложен

облегченный метод деления тепла и топлива, выполненный на описанном алгоритме, и приведен пример расчета с использованием рассматриваемого способа и сравнение итогов расчета по различным способам [4].

В своей работе Боровков В.М., Галковский В.А. и Михайлов В.А. предлагают метод применения собственных источников электроэнергии предприятий, основанный на эксергетопологическом анализе [5].

Копцев Л.А., Зуевский В.В. и Седельников С.В. опубликовали статью о возможностях по энергосбережению ресурсов в ПАО «ММК» [6]. На предприятии применяются меры по энергосбережению при изменяющихся условиях, что обусловлено колебаниями объема производства продукции, связанными с изменением состава производственных мощностей и структуры производимой продукции, а также ситуацией на рынках сбыта.

Веников В.А., Будзко И.А., Левин М.С., Блохина Е.Л., Петров В.А. рассмотрели методы решения электроэнергетических многокритериальных оптимизационных задач с неопределенными величинами [7].

В статье Манусова В.З. и Павлюченко Д.А. представлено применение генетических алгоритмов для нахождения оптимума режима энергосистем по активной мощности. Рассмотрены традиционные подходы решения. Проанализированы основные принципы эволюционных вычислений. Проведен сравнительный анализ метода нелинейного программирования и предложенного генетического алгоритма [8].

На Международной конференции по европейскому энергетическому рынку в 2017 году в документе [9] был опубликован подробный анализ рыночных структур в Европе, Северной Америке и Австралии, а также определены препятствия и возможности для полной рыночной интеграции возобновляемых и распределенных источников энергии. Сравнение правил и принципов работы рынка с разных континентов, разработанных на примерах наиболее развитых рынков, показывает, как различные технологии могут выиграть от предложения рыночных продуктов на основе нескольких временных рамок. В этой связи недавние европейские документы устанавливают рамки для недискриминационного доступа к рынку для всех организаций. Поскольку максимальные преимущества для новых участников гарантируются в случае совместной оптимизации участия на нескольких рынках, в документе обсуждается, как внедрение сегментов и концепций рынков США и Австралии может помочь в достижении этого в Европе.

Статья [10] посвящена роли и влиянию законодательства и политики в развитии рынка электроэнергии. В Китае проводится реформирование рынка электроэнергии, введены новые рыночные субъекты, такие как продавцы электроэнергии, усилилась конкуренция на рынке электроэнергии. Появление новых субъектов рынка и усиление рыночной конкуренции привели к возникновению новых взаимоотношений и новых проблем между различными субъектами рынка, и для обеспечения стабильного развития и упорядоченного функционирования рынка электроэнергии необходима соответствующая правовая система. Однако соответствующая правовая система рынка электроэнергии Китая недостаточно надежна, чтобы соответствовать

требованиям реформирования рынка электроэнергии. В этой статье, сочетающей в себе процесс маркетинга электроэнергии в США, принимая ключевые законы и распоряжения, структуру рынка электроэнергии и конкретные правила рынка электроэнергии в качестве объектов исследования, анализируется взаимосвязь между развитием рынка электроэнергии и созданием правовой системы. Основываясь на реформировании рынка электроэнергии Китая, в статье выдвигаются некоторые предложения по правовой базе рынка электроэнергии Китая.

В работе [11] также отражается процесс реформ рынка электроэнергии в Китае. Реструктуризация электроэнергетики началась с розничного рынка, а именно созданием спотового рынка электроэнергии и долгосрочной торговли электроэнергией. Задачей реформы китайского рынка электроэнергии является переход от планового экономического режима к рыночному и применение изменений в централизованной электроэнергетике.

Инвестиции и ценообразование в условиях неопределенности поставок на рынке электроэнергии, общий взгляд на оптовый и розничный рынок были проведены в работе [12]. В этой статье электроэнергия на рынке подразделяется на два типа: электроэнергия со стабильным снабжением и электроэнергия с нестабильным снабжением. Исследуются инвестиционные и ценовые стратегии в условиях неопределенности поставок электроэнергии на оптовом и розничном рынке электроэнергии. В частности, авторы разработали модель, которая объединяет оптовый и розничный рынок и фиксирует доминирующих игроков, то есть потребителей, электростанцию (энергооператора) и поставщика электроэнергии. Чтобы вывести рыночное поведение этих игроков, авторы сформулировали задачи рыночных решений в виде многоэтапной игры Штакельберга. Решая игровую модель, была получена оптимальная в закрытой форме стратегия оптового инвестирования и розничного ценообразования для оператора. Также был получен максимально выгодный ценовой механизм поставщика энергии в числовом виде при определенном допущении.

В статье [13] было проведено прогнозирование нагрузки рынка электроэнергии на нейронной сети с выгодной коррелированной регуляризацией. На рынке на сутки вперед организации, обслуживающие потребителей, должны предоставлять оператору рынка свой будущий график загрузки. В результате расчета стоимости авторы обнаружили несоответствие между точностью нагрузки и стоимостью покупки электроэнергии. Это означает, что более точная модель прогнозирования нагрузки может, наоборот, привести к повышению стоимости покупки электроэнергии. Точность модели прогнозирования нагрузки может не соответствовать решению с оптимальной выгодой. Столкнувшись с такой проблемой, в этой статье инициируется полезная коррелированная регуляризация для прогнозирования нагрузки нейронной сети. Учебная цель нейронной сети содержит как раздел точности, так и раздел стоимости мощности. Кроме того, в этой статье устанавливаются виртуальный нейрон и модифицированный алгоритм Левенберга-Марквардта для обучения нейронной сети.

Механизм и практика раскрытия информации при регулировании рынка электроэнергии были отражены в материалах [14], представленных в 2022 году на Китайской международной конференции по распределению электроэнергии. Улучшение механизма раскрытия информации о рынке электроэнергии в рамках регулирования рынка электроэнергии поможет предоставить участникам рынка достаточно информации, направит участников рынка к рациональному участию в торгах и будет способствовать оптимальному распределению ресурсов. Авторский механизм раскрытия информации о рынке электроэнергии создан для постепенного определения объема и метода раскрытия информации на рынке электроэнергии. С постепенным развитием спотового рынка частота сделок будет выше и информация о сделках будет увеличиваться, а субъекты рынка будут предъявлять более высокие требования к раскрытию информации.

На Международном симпозиуме по силовой электронике для систем распределенной генерации в 2018 году в своей работе авторы [15] описали структуру рынка электроэнергии с индивидуальным механизмом ценообразования. Последние тенденции на современных рынках электроэнергии включают активную трансформацию программ регулирования спроса в так называемое интеллектуальное реагирование на спрос. Это в основном обеспечивается наличием и более широким внедрением передовых инструментов управления спросом, включая различные технологии интеллектуального измерения, датчиков и автоматизации. Более широкое проникновение данных систем влечет за собой более высокую гибкость спроса, что создает благоприятную среду для рынков электроэнергии с высоким использованием возобновляемых источников энергии. Однако оценить и измерить реальный эффект гибкости нагрузки в контексте действующих рыночных механизмов непросто. В частности, вклад гибких потребителей в формирование цен на электроэнергию четко не отражен. В этой статье авторы предлагают новый механизм рынка электроэнергии с централизованным пулом, что отражено в предлагаемой схеме индивидуального выставления счетов. Предлагаемое решение позволяет заранее определить вклад каждого потребителя в достижение целей системы. Проведено подробное сравнение эффективности разработанной модели рынка электроэнергии на сутки вперед с традиционными рыночными схемами в условиях разного уровня наличия гибких нагрузок, отражены в предлагаемой индивидуальной схеме выставления счетов.

Проанализировав статью [16] о достижениях в области сенсорных технологий для умных городов и электросетей, можно сделать вывод о том, что совершенствованные системы датчиков и интеллектуальные датчики используются для повышения эффективности работы электросетей и городских служб. Цель статьи состоит в описании новых функций и идей в области датчиков и систем датчиков, предназначенных для интеллектуальных электрических сетей, сетей электропитания и интеллектуальных систем города.

Главная цель статьи [17] состоит в описании структуры автоматического управления генерацией

для интеллектуальных электрических сетей. Интеллектуальные электрические сети с высоким количеством неравномерных, нерегулируемых распределенных энергоресурсов и электроэнергетические сети с ценообразованием в режиме реального времени требуют новых инструментов для автоматического управления генерацией. Основными недостатками дискретности являются повышенное использование резервов, агрегатов, обычно работающих на газе, и их износ из-за пульсирующих режимов работы турбин паровых агрегатов для регулирования нагрузки. В этой статье представлена новая структура автоматического управления генерацией для преодоления недостатка неравномерности потребления в интеллектуальных электрических сетях. Паровые турбины, гидрогенераторы управляются так, чтобы следовать низкочастотной динамике нагрузки на основе целевого значения нагрузки на один шаг вперед.

На сегодняшний день подавляющее большинство промышленных предприятий имеют собственные источники электроэнергии, что позволяет им снизить зависимость от государственной энергосистемы, а также себестоимость электроэнергии. Однако при включении в систему электроснабжения (СЭС) собственных источников электроэнергии это так или иначе приводит к её усложнению, вызывает необходимость контроля и анализа режима работы с учётом перетоков мощности, возможному увеличению эксплуатационных расходов и потерь электроэнергии, снижению эффективности работы СЭС.

Таким образом, анализ эксплуатационных режимов работы промышленных СЭС с собственными источниками является актуальным и востребованным направлением, затрагивающим области энергоэффективности и энергосбережения промышленных предприятий.

МЕТОДИКИ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ

Алгоритм определения оптимальной мощности и распределения собственной выработки на промышленных тепловых электростанциях основан на методе динамического программирования. Более подробно данный алгоритм рассмотрен в работах [18-20]. В работе [21] приведено подробное описание алгоритма внутристанционной оптимизации в условиях промышленных систем электроснабжения.

С целью оптимального распределения покупаемой электроэнергии необходимо сформировать функцию затрат. В качестве оптимизируемой функции затрат будем рассматривать оплату электроэнергии, приобретаемой из энергосистемы, потери активной мощности в электрических сетях.

При прямом ходе оптимизационной задачи определяется эквивалентная характеристика объема электроэнергии для внешних источников (1).

На обратном ходе находятся рекомендуемая мощность каждого внешнего источника и стоимость затрат при заданном значении суммарного объема покупаемой электроэнергии. И, таким образом, рекомендуемая мощность каждого следующего источника определится как

$$3 = (3_{\text{ЭС}} + 3_{\Delta W} + 3_{\text{пр}}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $3_{\text{ЭС}}$ – затраты на производство электроэнергии собственными электростанциями; $3_{\Delta W}$ – затраты на потери мощности в электроэнергетической системе; $3_{\text{пр}}$ – затраты на прием мощности из энергосистемы.

На целевую функцию накладываются ограничения:

$$\begin{cases} \sum P_{\text{ист}} + \sum P_{G_N} = P_{\text{нагрузки}} + \Delta P_{\text{СЭС}}; \\ U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max}; \\ S_{i\min} \leq S_i \leq S_{i\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\sum P_{\text{ист}}$ – суммарная мощность источников распределенной генерации, кВт; $\sum P_{G_N}$ – активная мощность собственных генерирующих мощностей системы электроснабжения, кВт; $P_{\text{нагрузки}}$ – нагрузка системы электроснабжения с распределенной генерацией, кВт; $\Delta P_{\text{СЭС}}$ – потери активной мощности в системе электроснабжения с учетом мощности, принимаемой от внешнего источника, кВт; $U_{i\max}, U_{i\min}$ – предельно допустимые потери напряжения в узле ($\pm 10\%$ от номинального значения согласно ГОСТ 32144-2013), кВ; $S_{i\min}, S_{i\max}$ – минимально и максимально допустимое значение мощности, протекающей по элементам электрической сети, определяется нагрузочной способностью, кВА.

Получая эквивалентную функцию затрат, обязательно сохраняем результаты всех шагов эквивалентирования, данная функция полностью учитывает топологию сети, технико-экономические характеристики собственных источников электроэнергии и внешних источников, а также вклад каждого источника в потери мощности. Эквивалентная функция приведена на **рис. 1**. На данной структурной схеме $P_{\text{пр}}$ – мощность, принимаемая из энергосистемы, $\Delta P_{\text{пр}}$ – потери мощности в сети внешнего источника электроэнергии при

передаче $P_{\text{пр}}$, n – порядковый номер источника электроэнергии.

Блок-схема алгоритма среднесрочного планирования оптимального режима работы промышленных систем электроснабжения с внешними и собственными источниками электрической энергии приведена на **рис. 2**. В алгоритме предусмотрен запуск трех циклов. Если запускается цикл по формированию эквивалентной характеристики турбогенераторов, то n – количество турбогенераторов. Если осуществляется цикл по формированию эквивалентной характеристики внешних источников, то n – количество точек присоединения к внешним источникам электроэнергии. В последнем цикле n – любой источник в эквивалентной характеристике в соответствии с **рис. 1**. На **рис. 3** изображена блок-схема методики среднесрочного планирования оптимального режима работы промышленных предприятий с собственными ЭС.

Разработанная методика реализована в оригинальном программном продукте «КАТРАН-OptActivePower» [22].

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

С использованием разработанного алгоритма получены затраты на прием, передачу и потери мощности в условиях промышленного энергоузла, располагающего тремя собственными электрическими станциями и тремя точками подключения к энергосистеме.

Результаты расчета (**табл. 1**) определены для различных нагрузок энергоузла и исходя из оптимального распределения мощности между отдельными источниками электроэнергии, как внешними, так и собственными.

На **рис. 4** в качестве примера приведено оптимальное распределение мощностей между различными внешними источниками электроэнергии, соответствующее результатам, рассмотренным в **табл. 1**.

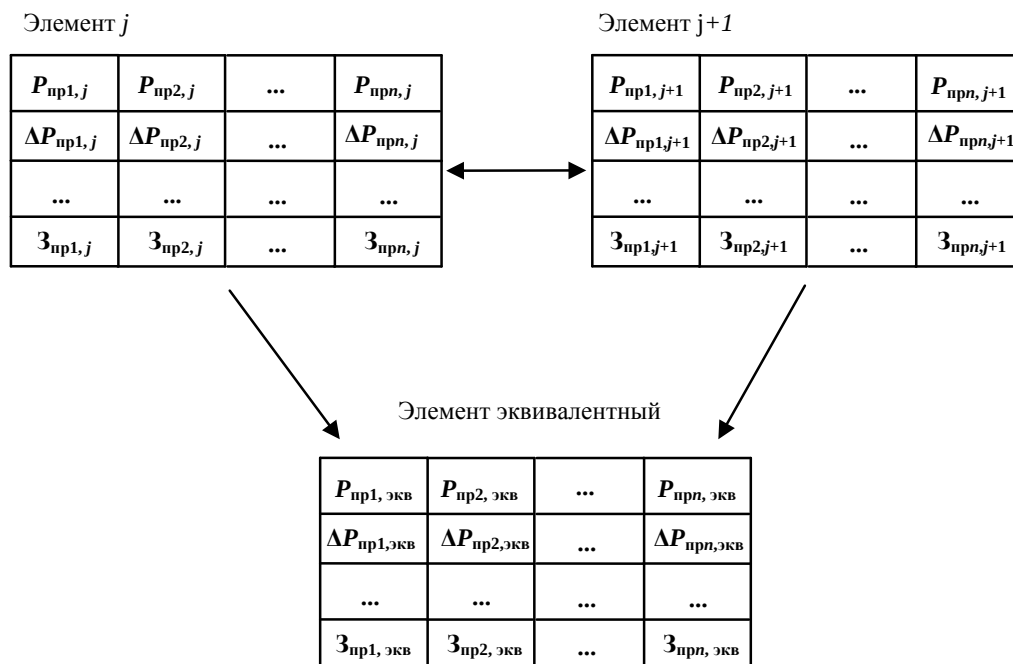


Рис. 1. Определение эквивалентной характеристики внешнего источника электроэнергии

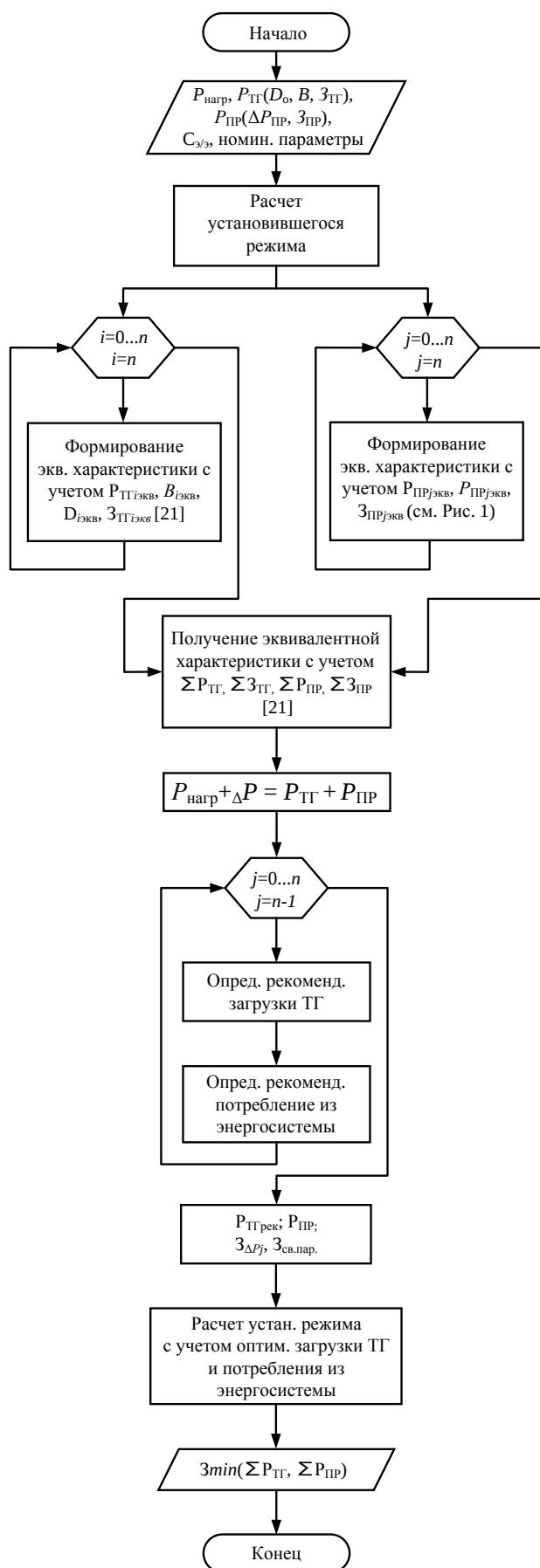


Рис. 2. Блок-схема алгоритма среднесрочного планирования оптимального режима работы промышленных систем электроснабжения с внешними и собственными источниками электрической энергии

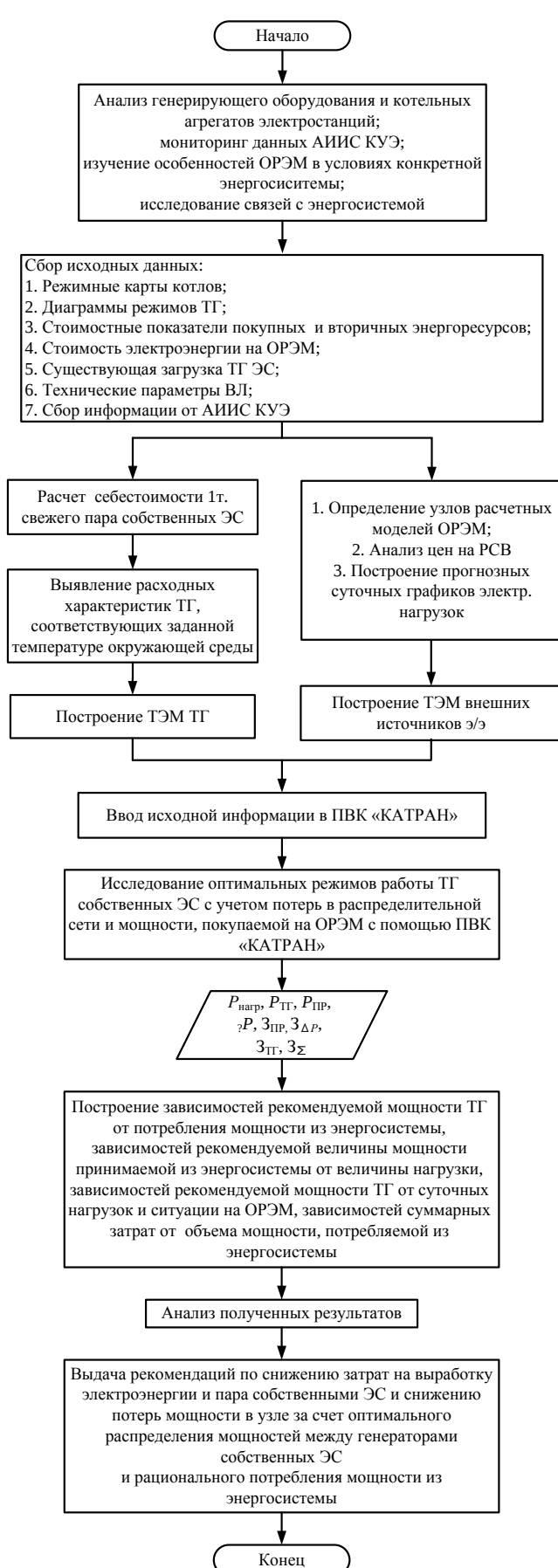


Рис. 3. Блок-схема методики среднесрочного планирования оптимального режима работы промышленных систем электроснабжения с внешними и собственными источниками электрической энергии

Таблица 1

Результаты расчета затрат, выполненного с помощью алгоритма оптимизации

$\Sigma P_{\text{нагр}},$ МВт	$З_{\text{прим}},$ руб.	$З_{\text{ДР}},$ руб.	$З_{\text{ЭС}},$ руб.	$З_{\Sigma},$ руб.
1046,4	2624746	32301,48	1761017	4418064
1043,1	2613464	32279,27	1761014	4406757
1042,0	2607644	32257,05	1761013	4400914
1039,8	2596668	32257,05	1761010	4389935
1039,0	2592074	32234,84	1761010	4385318
1037,8	2586101	32257,05	1761007	4379365
1035,7	2575227	32212,62	1761005	4368445
1033,5	2563996	32212,62	1761002	4357211
1033,2	2562618	32190,4	1761002	4355810
1032,6	2559351	32190,4	1761001	4352542
1028,3	2536838	31923,82	1761004	4329765
1026,8	2529639	32012,68	1761003	4322655
1025,2	2520553	31590,58	1761004	4313147
1023,6	2512895	31901,6	1761000	4305797
1023,0	2509679	31879,39	1761001	4302559



Рис. 4. Определение эквивалентной характеристики внешнего источника электроэнергии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика среднесрочного планирования основана на сочетании методов последовательного эквивалентирования и динамического программирования. Расчеты проводились в ПВК «КАТРАН-OptActivePower» с модулем «Оптимизация», позволяющим определять оптимальную работу генераторов собственных электростанций промышленного предприятия и прием мощности из энергосистемы.

По результатам исследований были даны рекомендации по экономически целесообразным приемам мощности из энергосистем при оптимальном распределении нагрузок между агрегатами местных электростанций. Программно-вычислительный комплекс предназначен для диспетчерских служб промышленного предприятия с целью среднесрочного планирования нагрузок источников энергоузла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Varganova A.V., Khrumshin V.R., Radionov A.A. Improving Efficiency of Electric Energy System and Grid Operating Modes: Review of Optimization Techniques // Energies. 2022. Vol. 15. 7177. doi: 10.3390/en1519717
- Из опыта работы по экономии энергоресурсов / С.С. Утарбаев, В.А. Яшков, Д.А. Курыло, Ю.Д. Сибикин // Электричество. 1988. №2. С. 4-7.

- Денисов В.И. Основы метода расчета экономии топлива при комбинированном способе производства электрической и тепловой энергии // Электрические станции. 2010. №9. С. 41-44.
- Байбаков С.А. О расчете экономии топлива и оценке эффективности комбинированной выработки электрической и тепловой энергии // Электрические станции. 2011. №6. С. 9-12.
- Боровков В.М., Галковский В.А., Михайлов В.А. Возможности энергосбережения в ПАО «ММК»: энергоёмкость продукции и экономическая эффективность // Промышленная энергетика. 2006. № 11. С. 6-9.
- Копцев Л.А. Энергосбережение и повышение экономической эффективности предприятия путем управления нагрузкой производственных агрегатов // Промышленная энергетика. 2011. №11. С. 24-27.
- О методах решения многокритериальных оптимизационных задач электроэнергетики с неопределёнными величинами / В.А. Веников, И.А. Будзко, М.С. Левин, Е.Л. Блохина, В.А. Петров // Электричество. 1987. № 2. С. 1-7.
- Манусов В.З., Павлюченко Д.А. Эволюционный алгоритм оптимизации режимов электроэнергетических систем по активной мощности // Электричество. 2004. № 3. С. 2-8.
- Market participation possibilities for renewable and distributed energy resources / I. Pavic, M. Beus, H. Pandzic, T. Capuder, I. Stritof // 14th International Conference on the European Energy Market (EEM). IEEE, 2017. Pp. 1-5. doi: 10.1109/EEM.2017.7981917
- Role and Inspiration of Legal and Policy in the Development of U.S. Electricity Market / T. Wei, H. Jianping, Y. Chunhua, Caoyang // China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Tianjin: IEEE, 2018. Pp. 2846-2851. doi: 10.1109/CICED.2018.8592334
- Electricity Market Design and Operation in Guangdong Power / X. Zhang, W. Liu, Y. Chen, Y. Bai, J. Li, J. Zhong // 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM). IEEE, 2018. Pp. 1-5. doi: 10.1109/EEM.2018.8469826
- Investing and pricing with supply uncertainty in electricity market: A general view combining wholesale and retail market / X. Li, L. Gao, G. Wang, F. Gao, Q. Wu // China Communications. 2015. No. 3. Pp. 20-34. doi: 10.1109/CC.2015.7084360
- Power Market Load Forecasting on Neural Network With Beneficial Correlated Regularization / F.Y. Xu, X. Cun, M. Yan, H. Yuan, Y. Wang, L.L. Lai // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2018. No. 11. Pp. 5050-5059. doi: 10.1109/TII.2017.2789297
- Liu X., Zhou N., Wu D. Information Disclosure Mechanism and Practice under Electricity Market Regulation // China International Conference on Electricity Distribution (CICED). IEEE, 2022. Pp. 19-24. doi: 10.1109/CICED56215.2022.9929097
- Electricity Market Structure with Individual Pricing Mechanism / A. Mnatsakanyan, A.H. AlMazrooqi, E.B. Muruaga, P.A. Banda // 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). IEEE, 2018. Pp. 1-6. doi: 10.1109/PEDG.2018.8447757
- Advances on Sensing Technologies for Smart Cities and Power Grids: A Review / R. Morello, S.C. Mukhopadhyay, Z. Liu, D. Slomovitz, S.R. Samantaray // IEEE Sensors Journal. 2017. No. 23. Pp. 7596-7610. doi: 10.1109/JSEN.2017.2735539
- Keyhani A., Chatterjee A. Automatic Generation Control Structure for Smart Power Grids // IEEE Transactions on Smart Grid. 2012. Vol. 3. Pp. 1310-1316. doi: 10.1109/TSG.2012.2194794
- Varganova A.V., Khrumshin V.R., Radionov A.A. Operating

Modes Optimization for the Boiler Units of Industrial Steam Plants // *Energies*. 2023. Vol. 16. 2596. doi: 10.3390/en16062596

19. Варганова А. В., Джагаров Н.Ф. Комплексная оптимизация режимов работы промышленных тепловых электростанций // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. №4(49). С. 11-16. doi: 10.18503/2311-8318-2020-4(49)-11-16
20. Малафеев А.В., Хламова А.В., Краснов М.И. Оптимизация загрузки генераторов собственных электростанций ОАО «ММК» с учетом потерь активной мощности в распределительной сети путем декомпозиции общей за-

дачи // *Главный энергетик*. 2011. №3. С. 54-57.

21. Кочкина А.В. Применение метода динамического программирования для решения задач оптимального распределения активных мощностей между разнородными генерирующими источниками собственных электростанций предприятий черной металлургии // *Наука и производство Урала*. 2012. №8. С. 204-209.
22. А.с. 2019618397 Российская Федерация, КАТРАН-OptActivePower / Варганова А.В., Малафеев А.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». №2019616954; заявл. 07.06.2019; опубл. 01.07.2019.

Поступила в редакцию 25 июля 2023 г.

Принята к печати 01 сентября 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

METHODOLOGY FOR OPTIMIZING OPERATING MODES OF INDUSTRIAL POWER UNITS WITH IN-HOUSE GENERATION AND EXTERNAL SOURCES OF ELECTRIC POWER

Natalia A. Anisimova

Post Graduate Student, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, ec091@mail.ru

Aleksandra V. Varganova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of a Department, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, aleksandra-khlamova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4675-7511>

Mikhail S. Melnikov

Undergraduate Student, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, andruxa645@mail.ru

Olga I. Petukhova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, petuhova-olg@mail.ru

Power supply systems for industrial enterprises in order to ensure reliability of power supply and increase efficiency, as a rule, has its own generating base and external power supply - connection to the electrical power system. Changing the load during the day poses the task of determining and predicting the optimal power purchased from the power system. An important task in such conditions is also the development of planned repairs of the main generating equipment of the industrial power supply system. This work is devoted to the development of an algorithm for determining the optimal power purchased from the energy system, taking into account the in-house power from local thermal power plants. The calculation methodology takes into account the main features of industrial power units, namely, the use of several types of fuel in a single power plant, the presence of several large industrial power plants, power transmission in the power supply system (losses of active power in the system), the transfer ability of elements, compliance with permissible voltage conditions in nodes. The algorithm is based on the dynamic programming method in combination with the sequential equivalence method, which makes it possible to search for a whole set of optimal controls with many possible solutions. Models of power systems and in-house energy sources presented particular difficulty in the calculations. In this work, source models are presented in tabular form. For power systems, there is a dependence of the power received from the power system on the tariff within the specified power. An equivalent model of external sources takes into account the operating conditions of the electricity market. Based on the results of work in the conditions of an industrial power center, the recommended capacities are

given for receiving power from the power system and the corresponding costs for receiving and in-house power generation.

Keywords: power supply, power unit, industrial power plant, power system, optimization, dynamic programming, electricity market, electricity tariff, medium-term planning, technical and economic model

REFERENCES

1. Varganova A.V., Khramshin V.R., Radionov A.A. Improving Efficiency of Electric Energy System and Grid Operating Modes: Review of Optimization Techniques. *Energies*. 2022, vol. 15, pp. 7177. doi: 10.3390/en1519717
2. Utarbaev S.S., Yashkov V.A., Kurylo D.A., Sibikin Y.D. From experience in saving energy resources. *Elektrichestvo [Elektrichestvo]*, 1988, no. 2, pp. 4-7. (In Russian).
3. Denisov V.I. Fundamentals of the method for calculating fuel economy for a combined method of producing electrical and thermal energy. *Elektricheskie stantsii [Electrical stations]*, 2010, no. 9, pp. 41-44. (In Russian)
4. Baibakov S.A. On calculating fuel economy and assessing the efficiency of combined generation of electrical and thermal energy. *Elektricheskie stantsii [Electrical stations]*, 2011, no. 9, pp. 9-12. (In Russian)
5. Borovkov V.M., Galkovskii V.A., Mikhailov V.A. Opportunities for energy saving at PJSC MMK: energy intensity of products and economic efficiency. *Promyshlennaya energetika [Industrial power engineering]*, 2006, no. 11, pp. 6-9. (In Russian)
6. Koptsev L.A. Energy saving and increasing the economic efficiency of the enterprise by managing the load of produc-

- tion units. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2011, no. 11, pp. 24-27. (In Russian)
7. Venikov V.A., Budzko I.A., Levin M.S., Blokhina E.L., Petrov V.A. On methods for solving multicriteria optimization problems in the electric power industry with uncertain values. *Elektrichestvo* [Elektrichestvo], 1987, no. 2, pp. 1-7. (In Russian)
8. Manusov V.Z., Pavlyuchenko D.A. Evolutionary algorithm for optimizing the modes of electric power systems based on active power. *Elektrichestvo* [Elektrichestvo], 2004, no. 3, pp. 2-8. (In Russian)
9. Pavić I., Beus M., H. Pandžić H., Capuder T., Štrifof I. Market participation possibilities for renewable and distributed energy resources. 14th International Conference on the European Energy Market (EEM). IEEE, 2017, pp. 1-5. doi: 10.1109/EEM.2017.7981917
10. Wei T., Jianping H., Chunhua Y., Caoyang. Role and Inspiration of Legal and Policy in the Development of U.S. Electricity Market. China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Tianjin: IEEE, 2018, pp. 2846-2851. doi: 10.1109/CICED.2018.8592334
11. Zhang X., Liu W., Chen Y., Bai Y., Li J., Zhong J. Electricity Market Design and Operation in Guangdong Power. 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM). IEEE, 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/EEM.2018.8469826.
12. Li X., Gao L., Wang G., Gao F., Wu Q. Investing and pricing with supply uncertainty in electricity market: A general view combining wholesale and retail market. *China Communications*. 2015, vol. 12, pp. 20-34. doi: 10.1109/CC.2015.7084360
13. Xu F.Y., Cun X., Yan M., Yuan H., Wang Y., Lai L.L. Power Market Load Forecasting on Neural Network With Beneficial Correlated Regularization. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018, vol. 14, pp. 5050-5059. doi: 10.1109/TII.2017.2789297
14. Liu X., Zhou N., Wu D. Information Disclosure Mechanism and Practice under Electricity Market Regulation. China International Conference on Electricity Distribution (CICED). IEEE, 2022, pp. 19-24. doi: 10.1109/CICED56215.2022.9929097
15. Mnatsakanyan A., AlMazrooqi A. H., Muruaga E. B., Banda P.A. Electricity Market Structure with Individual Pricing Mechanism. 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). IEEE, 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/PEDG.2018.8447757
16. Morello R., Mukhopadhyay S. C., Liu Z., Slomovitz D., Samantaray S. R. Advances on Sensing Technologies for Smart Cities and Power Grids: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2017, vol. 17, pp. 7596-7610. doi: 10.1109/JSEN.2017.2735539
17. Keyhani A., Chatterjee A. Automatic Generation Control Structure for Smart Power Grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012, vol. 3, pp. 1310-1316. doi: 10.1109/TSG.2012.2194794
18. Varganova A.V., Khrashin V.R., Radionov A.A. Operating Modes Optimization for the Boiler Units of Industrial Steam Plants. *Energies*. 2023, vol. 16, pp. 2596. doi: 10.3390/en16062596
19. Varganova A.V., Djagarov N.F. Integrated optimization of industrial thermal power plants conditions. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 11-16. (In Russian)
20. Malafeev A. V., Khlamova A. V., Krasnov M. I. Optimization of generator loading at OJSC MMK in-house power plants, taking into account active power losses in the distribution network by decomposing the general problem. *Glavnyi energetik* [Chief Power Engineer], 2011, no. 3, pp. 54-57. (In Russian)
21. Kochkina A. V. Application of the dynamic programming method to solve problems of optimal distribution of active capacities between heterogeneous generating sources of own power plants of ferrous metallurgy enterprises. *Nauka i proizvodstvo Urala* [Science and production of the Urals], 2012, no. 8, pp. 204-209. (In Russian)
22. Varganova A.V., Malafeev A.V. KATRAN-OptActivePower [KATRAN-OptActivePower]. Computer program RF, no. 2019618397, 2019.

Методика оптимизации режимов работы промышленных энергоузлов с собственной генерацией и внешними источниками электроэнергии / Н.А. Анисимова, А.В. Варганова, М.С. Мельников, О.И. Петухова // *Электротехнические системы и комплексы*. 2023. № 3(60). С. 15-22. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-15-22](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-15-22)

Anisimova N.A., Varganova A.V., Melnikov M.S., Petukhova O.I. Methodology For Optimizing Operating Modes Of Industrial Power Units With In-house Generation And External Sources Of Electric Power. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 3(60), pp. 15-22. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-15-22](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-15-22)

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.313

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-23-27](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-23-27)

Мещеряков В.Н., Пикалов В.В., Юрченко В.П.

Липецкий государственный технический университет

СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЗВЕНЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ, ПИТАЮЩЕГО АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ПРИ ПРОСАДКЕ НАПРЯЖЕНИЯ

В работе рассмотрен асинхронный электропривод с частотным управлением, оснащенный дополнительными элементами - импульсным коммутатором и индуктивным накопителем энергии в звене постоянного тока преобразователя частоты, обеспечивающий стабилизацию напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты при просадке напряжения в питающей сети. Поскольку система управления типового преобразователя частоты, выполненного на базе нерегулируемого выпрямителя и автономного инвертора напряжения, не допускает работу при пониженных напряжениях в звене постоянного тока, ввиду наличия соответствующих защит по уровню напряжения, создан опытный образец преобразователя частоты с расширенными функциональными возможностями, управляемый микропроцессорным устройством фирмы «Texas Instruments» марки TMDX28069, обеспечивающий нормальную работу при просадках напряжения до 48%, за счет включения в звено постоянной высокочастотной импульсной системы повышения напряжения на базе транзисторного коммутатора и индуктивного накопителя энергии. В качестве силового ключа предлагается использование транзистора MOSFET STP14nk50z. Управляющим контроллером для повышающего импульсного модуля выступает STM32F411CEU6 Black Pill. Программирование микроконтроллера, управляющего процессом повышения напряжения, осуществлялось в среде CubeMX. Для оценки работы предлагаемой системы электропривода были проведены исследования посредством компьютерного моделирования и экспериментальные исследования опытных образцов. Результаты, полученные при процессе компьютерного моделирования, совпадают с результатами, полученными в ходе проведения экспериментальных исследований. Разработанная система частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением может применяться на механизмах общепромышленного назначения, например нагнетателях воздуха и газов, что позволит обеспечить стабильную работу электроприводов, установленных на большом расстоянии от питающий подстанций через длинные кабельные линии.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, преобразователь частоты, просадка напряжения, компенсация, импульсный коммутатор, индуктивный накопитель энергии, система управления

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на промышленных предприятиях применяется множество преобразователей частоты со звеном постоянного тока, предназначенных для построения систем регулируемого асинхронного электропривода, имеющих стандартную структуру силовой части с типовыми системами управления [1]. Существующие преобразователи устанавливаются на различных объектах, в том числе с системой электропитания ограниченной мощности, с протяженными питающими кабельными линиями и большим количеством электропотребителей [2]. Для таких электрических установок характерны провалы напряжения на шинах групповой электрической нагрузки. В сложных условиях работы электроприводов системы управления типовыми преобразователями частоты выдают сигнал ошибки, что может привести к отключению преобразователя частоты и остановке электропривода. Длительные просадки напряжения (более 1 с) не удается компенсировать сглаживающими и фильтрующими элементами [3, 4]. Поэтому существует необходимость разработки системы частотно-регулируемого асинхронного электропривода, способной работать в таких условиях за счет применения быстродействующей системы компенсации просадки напряжения на входе преобразователя частоты, с помощью введенных в звено постоянного тока дополнительных элементов - транзисторного коммутатора и индуктивного накопителя энергии [5-7].

ТЕХНИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО

ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Для повышения напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты предлагается использование импульсного преобразователя, повышающего выходное напряжение, как показано на **рис. 1**. При требуемом с допустимыми отклонениями уровне питающего напряжения U_d транзисторный ключ VT всегда разомкнут [8]. При возникновении просадки напряжения система управления кратковременно замыкает транзисторный ключ VT для увеличения тока, протекающего через индуктивность L . В этот момент нагрузка получает питание от конденсатора. На следующем такте транзистор размыкается и импульс перенапряжения, возникающей на катушке L , заряжает емкость C выше уровня входного напряжения.

Регулируя частоту и скважность, можно добиться стабилизации выходного напряжения на заданном уровне [9]. Результаты моделирования и выполненные экспериментальные исследования показали, что требуемый диапазон компенсации просадки напряжения (до 48%) обеспечивается при частоте коммутаций ключа VT до 35 кГц.

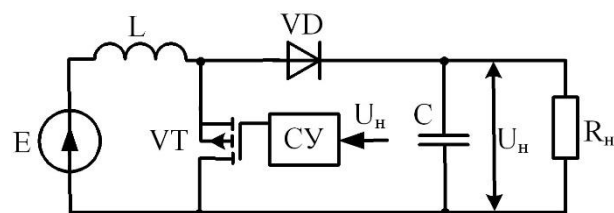


Рис. 1. Схема повышающего импульсного преобразователя напряжения

Такую частоту обеспечивают транзисторы с изолированным затвором MOSFET, имеющие малое сопротивление открытого канала. Инвертор напряжения, управляемый с помощью релейно-гистерезисного регулятора, формирует синусоиду тока заданной частоты для управления асинхронным двигателем [10].

При работе импульсного преобразователя соблюдается баланс мощностей, поэтому повышение выходного напряжения сопровождается ростом входного тока в соответствии с соотношением

$$I_d \geq \frac{UI}{U_d}, \quad (1)$$

где I_d – ток на выходе преобразователя; U – напряжение на выходе преобразователя; I – ток на выходе преобразователя; U_d – напряжение на входе преобразователя.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Для исследования системы частотно-регулируемого асинхронного электропривода с двигателем Texas Instruments 180W была разработана компьютерная модель в MATLAB Simulink, представленная на **рис. 2** [11]. Поскольку двигатель маломощный, система питания выбрана однофазной с амплитудой напряжения 220 В. Компьютерная модель настроена следующим образом.

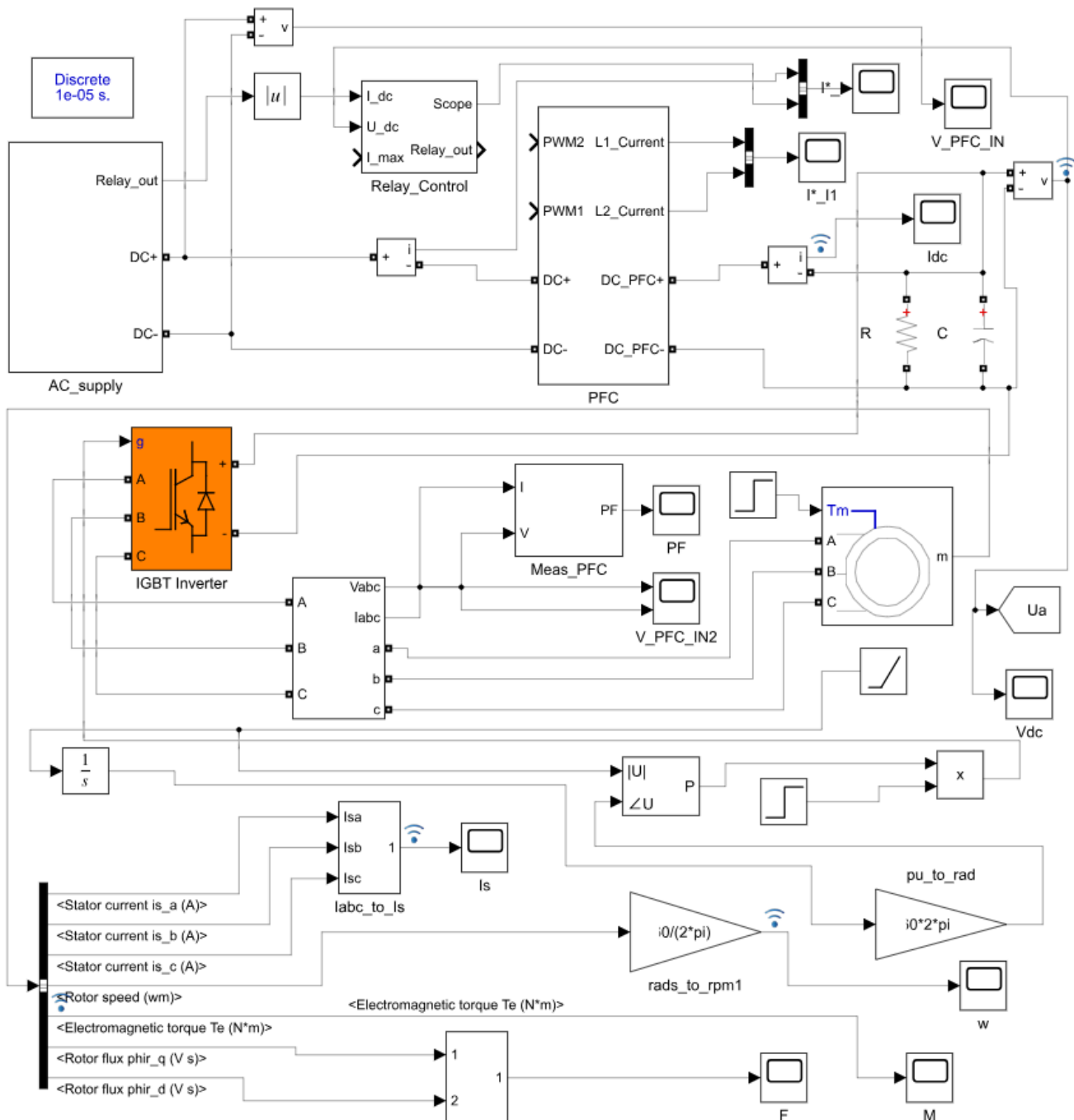


Рис. 2. Компьютерная модель асинхронного электропривода с возможностью повышения напряжения в звене постоянного тока

В начальный момент времени производится запуск системы электропривода с полным напряжением. Через 1,5 с моделирования имитируется просадка входного напряжения до 150 В. Осциллограмма представлена на **рис. 3**. При просадке входного напряжения полученная зависимость напряжения в звене постоянного тока от времени показана на **рис. 4**.

Система управления при обнаружении отклонения напряжения подает управляющий сигнал на затвор ключа повышающего модуля таким образом, чтобы напряжение в звене постоянного тока соответствовало заданному значению, как показано на **рис. 5**. Индуктивность повышающего модуля равна 5,5 мГн. Общее время моделирования составляет 3 с.

Для исследования процессов и режимов работы асинхронного электропривода с возможностью компенсации просадок напряжения была разработана экспериментальная установка, в основе которой лежит схема повышающего импульсного преобразователя, позволяющая проводить исследование электропривода в лабораторных условиях [12].

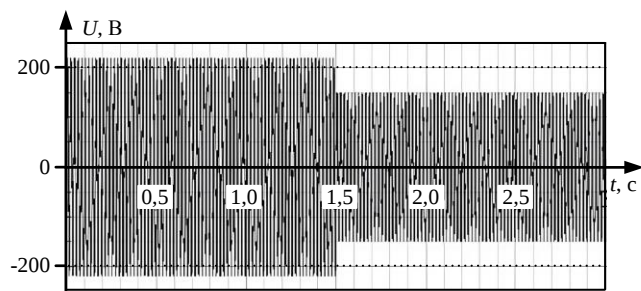


Рис. 3. Осциллограмма входного напряжения с просадкой амплитуды

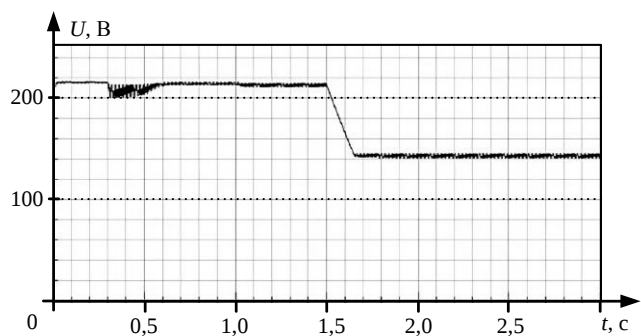


Рис. 4. Напряжение в звене постоянного тока при просадке амплитуды напряжения сети до 150 В

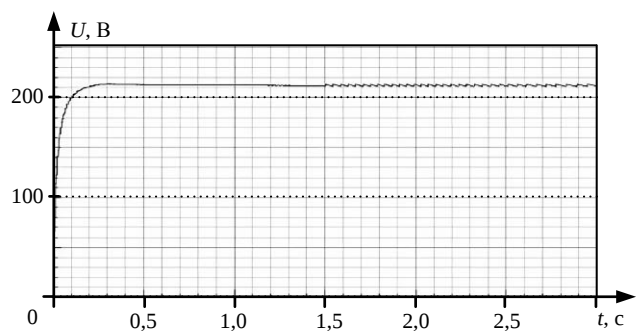


Рис. 5. Напряжение в звене постоянного тока при компенсации просадки амплитуды напряжения сети

Повышающий импульсный преобразователь напряжения был разработан в программном пакете EasyEda. 3D-модель разработанного преобразователя представлена на **рис. 6**, на основе этой модели была разработана экспериментальная плата.

Управление импульсным модулем осуществляется с помощью популярного микроконтроллера STM32F411CEU6. Максимальная тактовая частота 100 МГц. Данный модуль включается в звено постоянного тока преобразователя частоты со скалярной системой управления электроприводом для компенсации просадок напряжения в питающей сети. Контроллер импульсного модуля и частотного преобразователя связаны внешней синхронизацией. Общий вид экспериментальной установки приведен на **рис. 7**.

Во время исследований была симитирована просадка входного питающего напряжения в звене постоянного тока до 176 В. Стабилизирующее устройство подняло напряжение до оптимального уровня, который составляет 310 В. Данный уровень соответствует требуемому о выпрямленному напряжению при питании однофазного выпрямителя с фильтрующим конденсатором напряжением 220 В.

Осциллограмма входного (нижний график, CH2) и выходного (верхний график, CH1) напряжений представлена на **рис. 8**.

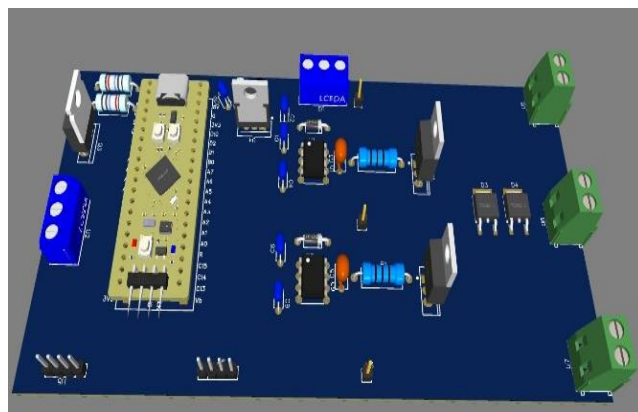


Рис. 6. 3D-модель повышающего импульсного преобразователя напряжения в программном пакете EasyEda

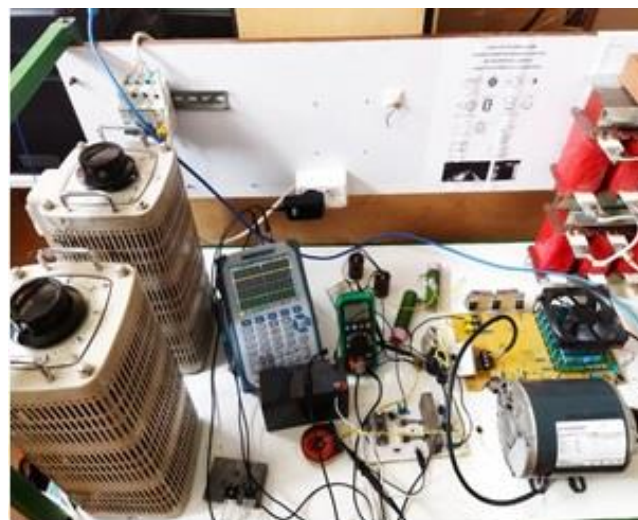


Рис. 7. Общий вид экспериментальной установки

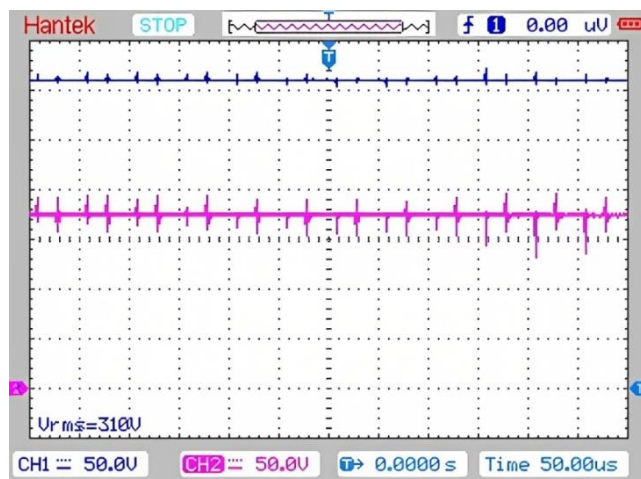


Рис. 8. Осциллограмма входного и выходного напряжений звена постоянного тока асинхронного электропривода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана система частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением, способная обеспечить компенсацию просадок напряжения в звене постоянного тока частотного преобразователя до 48%. Такая система повышения напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты позволит устанавливать регулируемые асинхронные электроприводы на большом удалении от питающих подстанций ограниченной мощности с длинными кабельными линиями.

Экспериментальный образец системы импульсного повышения напряжения в составе разработанного преобразователя частоты был выполнен на базе транзистора с изолированным затвором типа MOSFET STP14nk50z, максимальная частота коммутаций силового ключа составляла 35 кГц. Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, подтвердили результаты компьютерного моделирования.

Разработанный импульсный модуль может использоваться не только в однофазных системах, но и быть применен в системах электропривода с трехфазной питающей сетью. Предложенная система импульсного повышения напряжения может быть интегрирована в существующие преобразователи частоты, допускающие включение дополнительных элементов в звено постоянного тока.

Поступила в редакцию 19 июня 2023 г.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Клевцов А.В. Преобразователи частоты для электропривода переменного тока. Практическое пособие для инженеров. Москва: Гриф и Ко, 2010. 224 с.
2. Зюзев А.М., Метельков В.П., Степанюк Д.П. Управление пусковыми режимами асинхронного тиристорного электропривода с учётом ограничений по нагреву и влияния на сеть // Электротехника. 2012. № 9. С. 40-43.
3. Мартынов А.А. Проектирование импульсных полупроводниковых преобразователей постоянного напряжения в постоянное напряжение. Санкт-Петербург: ГУАП, 2011. 215 с.
4. Мартынов А.А. Проектирование вторичных источников питания. Проектирование ВИП с выходом на постоянном токе. Санкт-Петербург: СПбГУАП, 2000. 108 с.
5. Мещеряков В.Н., Воеков В.Н., Крюков О.В. Вентильный электропривод для погружных нефтяных насосов с импульсным повышающим преобразователем напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты и релейным управлением транзисторами инвертора напряжения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2020. № 2(20). С. 110-119.
6. Пат. 2724982 Российская Федерация, МПК H02P27/04. Способ управления электроприводом переменного тока / Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В., Пикалов В.В., Пономарев П.С.; заявитель ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет». №2019139630, заявл. 02.12.2019, опубл. 29.06.2020.
7. Пат. 166655 Российская Федерация, МПК H02P27/06. Устройство для управления электроприводом переменного тока / Мещеряков В.Н., Воеков В.Н.; заявитель ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет». №2016113199/07, заявл. 06.04.2016, опубл. 10.12.2016.
8. Колоколов Ю.В., Косчинский С.Л. Динамика и синтез регуляторов тока импульсных автоматизированных электроприводов. М.: Машиностроение-1, 2006. 98 с.
9. Chen J.H., Chau K.T., Chan C.C. Chaos in voltage-mode controlled dc drive system // Int. J. Electron. 1999. Vol. 86(7). Pp. 857-1432. doi: 10.1080/002072199133085.
10. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургская электротехническая компания, 2004. 127 с.
11. Герман-Галкин С.Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink. Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2013. 448 с.
12. Исследование частотно-регулируемых асинхронных электроприводов в лабораторных условиях / Т.Р. Храпшин, Г.П. Корнилов, В.В. Ровнейко, А.А. Мурзинов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 3-3. С. 196-202.

Принята к печати 11 июля 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

VOLTAGE STABILIZATION IN CASE OF VOLTAGE DROP IN DC-LINK OF FREQUENCY INVERTER SUPPLYING INDUCTION MOTOR

Victor N. Meshcheryakov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department Head, Electric Drive Department, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia, mesherek@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2887-3703>

Vladimir V. Pikalov

Lecturer, Electric Drive Department, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia, wreditels@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2414-9689>

Victor P. Yurchenko

Lecturer, Electric Drive Department, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia, 0009-0008-9929-6177, yurchenkovik@gmail.com

The paper deals with a frequency controlled induction drive equipped with such additional elements as a pulsed commutator and inductive energy storage in the DC-Link of a frequency converter. They ensure the voltage stabilization in the DC-Link of the frequency inverter in case of voltage drop in the supply network. Due to the presence of voltage level protection devices, the control system of standard frequency inverters made on the basis of uncontrolled rectifiers and autonomous voltage converters does not allow operation at undervoltage in the DC-Link. A prototype of a frequency inverter with extended functional possibilities controlled by a microprocessor device "Texas Instruments" TMDX28069 has been created. Due to the inclusion in the DC-Link, it provides normal operation at voltage reduction up to 48%. The MOSFET STP14nk50z transistor is proposed as a power switch. The STM32F411CEU6 black pill is used to control the boost pulse module. The CubeMX environment was used to program the microcontroller that controls the voltage boost process. Computer simulation and experimental studies of prototypes were used to evaluate the performance of the proposed electric drive system. Computer modeling results are consistent with the results obtained from experimental tests. The developed system can be applied to general-purpose mechanisms, such as air and gas blowers, by means of frequency controlled induction electric drives with scalar control. It will provide stable operation of the electric drives, which are installed at a great distance from the supplying substations by means of long cable lines.

Keywords: induction electric drive, frequency inverter, voltage drop, compensation, pulse commutator, inductive energy storage, control system

REFERENCES

1. Klevtsov A.V. *Preobrazovately chastoty dlya elektroprivoda peremennogo toka* [Frequency inverters for AC electric drive]. Moscow, Grif i Ko Publ., 2010. 224 p. (In Russian)
2. Zyuzev A.M., Metelkov V.P., Stepanyuk D.P. Control of Starting Modes of Induction Thyristor Electric Drive Considering Heating Limitations and Network Influence. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2012, no. 9, pp. 40-43. (In Russian)
3. Martynov A.A. *Proektirovanie impulsnykh poluprovodnikovyykh preobrazovateley postoyannogo napryazheniya v postoyannoe napryazhenie* [Design of pulse semiconductor converters of constant voltage to constant voltage]. St. Petersburg, GUAP Publ., 2011. 215 p. (In Russian)
4. Martynov A.A. *Proektirovanie vtorichnykh istochnikov pitaniya. Proektirovanie VIP s vykhodom na postoyannom toke* [Design of secondary power sources. Design of SPS with constant-current output]. St. Petersburg, SPBGUAP Publ., 2000. 108 p. (In Russian)
5. Meshcheryakov V.N., Voekov V.N., Kryukov O.V. Valve Electric Drive for Submersible Oil Pumps with Pulse Voltage Boost Converter in the DC-Link of the Frequency Inverter and Relay Control of Inverter Voltage Transistors. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], 2020, vol. 20, no. 2, pp. 110-119. (In Russian)
6. Meshcheryakov V.N., Lastochkin D.V., Pikalov V.V., Ponomarev P.S. *Sposob upravleniya elektroprivodom peremennogo toka* [Method for controlling an AC electric drive]. Patent RF, no. 2724982, 2020.
7. Meshcheryakov V.N., Voekov V.N. *Ustroystvo dlya upravleniya elektroprivodom peremennogo toka* [Device for controlling an AC electric drive]. Patent RF, no. 166655, 2016.
8. Kolokolov Yu.V., Koschinskiy S.L. *Dinamika i sintez regulatorov toka impulsnykh avtomatizirovannykh elektroprivodov* [Dynamics and synthesis of current regulators for impulse automated electric drives]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2006. 98 p. (In Russian)
9. Chen J.H., Chau K.T., Chan C.C. Chaos in voltage-mode controlled dc drive system. *Int. J. Electron.* 1999. Vol. 86(7). Pp. 857-1432. doi: 10.1080/002072199133085
10. Kozyaruk A.E., Rudakov V.V. *Sovremennoe i perspektivnoe algoriticheskoe obespechenie chastotno-reguliruemyykh elektroprivodov* [Modern and prospective algorithmic support of frequencycontrolled electric drives]. St. Petersburg, St. Petersburg, Electrotechnical Company Publ., 2004. 127 p. (In Russian)
11. German-Galkin S.G. *Virtualnye laboratorii poluprovodnikovyykh sistem v sredeMatlab-Simulink* [Virtual laboratories of semiconductor systems in the Matlab-Simulink environment]. St. Petersburg, Lan Publ., 2013. 448 p. (In Russian)
12. Khrumshin T.R., Kornilov G.P., Rovneyko V.V., Murzikov A.A. Investigation of Frequency Controlled Induction Electric Drives in Laboratory Conditions. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki* [Izvestiya Tula State University], 2010, no. 3-3, pp. 196-202. (In Russian)

Мещеряков В.Н., Пикалов В.В., Юрченко В.П. Стабилизация напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты, питающего асинхронный двигатель, при просадке напряжения // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 3(60). С. 23-27. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-23-27](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-23-27)

Meshcheryakov V.N., Pikalov V.V., Yurchenko V.P. Voltage Stabilization in Case of Voltage Drop in DC-Link of Frequency Inverter Supplying Induction Motor. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 3(60), pp. 23-27. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-23-27](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-23-27)

Соловьев А.Э., Кравченко О.А.

Тульский государственный университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБОБЩЕННОЙ ТРЕХСТЕПЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С ВЗАИМНО НЕПОДВИЖНЫМИ ОБМОТКАМИ

В электромеханике для анализа сложных процессов и явлений, синтеза систем управлений и т.д. достаточно широко используется такой инструмент, как обобщенная электрическая машина. Учитывая, что в подавляющем большинстве электрических машин ротор имеет относительно статора только одну степень свободы, математические модели классических обобщенных электрических машин строятся на основе физических моделей, содержащих две пары ортогональных обмоток и одну ось вращения. При этом современное развитие компонентной базы позволяет реализовывать на практике и использовать в прецизионных устройствах сравнительно новые типы электрических машин, ротор которых имеет относительно статора не одну, а три степени свободы. Математическое описание таких машин, полученное, например, на основе уравнения Лагранжа второго рода, содержит переменные коэффициенты и существенно сложнее, чем классических (одностепенных) машин. Поэтому возникла объективная необходимость распространения инструментария классической обобщенной машины на трехстепенные. В данной статье приводятся математические модели обобщенной трехстепенной электрической машины, имеющей две совокупности трех ортогональных друг другу обмоток. Указанные модели (по аналогии с моделями классических обобщенных машин) получены при взаимно неподвижных статорных и роторных обмотках для двух случаев: когда эти обмотки вращаются (то есть расположены на роторе) и когда они неподвижны (то есть расположены на статоре). Полученные математические модели уже не имеют переменных коэффициентов, что существенно упрощает процесс анализа функционирования таких машин в различных режимах и устройствах, а также позволяют осуществлять синтез взаимосвязанных контуров управления движением по каждой из трех осей.

Ключевые слова: электрическая машина, ротор, статор, обмотка, индуктивность, напряжение, ток, потокосцепление, электромагнитный момент

ВВЕДЕНИЕ

Трехстепенные электрические машины (ТЭМ) получили распространение, прежде всего, в гироскопических приборах и устройствах [1-4]. Ключевой особенностью этих машин является то, что ротор имеет относительно статора не одну, как в классических электрических машинах (ЭМ), а три степени свободы [5]. Поэтому движение ротора относительно любой из трех осей непосредственным образом влияет как на движение по двум другим осям, так и на электрические процессы, протекающие во всех ее обмотках.

Так же как и классические ЭМ, ТЭМ могут быть различных типов (синхронные и асинхронные) и иметь различную конструкцию (радиальный или аксиальный ротор). Математические модели различных типов ТЭМ, в том числе и обобщенной, получены и приведены в работах [1, 6, 7]. Причем указанные модели получены для случая, когда обмотки ротора и статора ТЭМ совершают взаимное движение, то есть дифференциальные уравнения, входящие в эти модели, имеют переменные коэффициенты. Такими математическими моделями удобно пользоваться при изучении особенностей движения ТЭМ и протекающих в них электромагнитных процессов. Однако их применение затруднительно в ряде случаев, например когда ТЭМ рассматривается в качестве объекта управления.

Поэтому, по аналогии с классическими электрическими машинами [8-11], целесообразно ввести понятие обобщенной ТЭМ, статорные и роторные обмотки которой взаимно неподвижны, и рассмотреть два случая, когда все обмотки неподвижны (то есть находятся на статоре) и когда все обмотки вращаются с одинаковыми скоростями (то есть находятся на роторе).

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБОБЩЕННОЙ ТЭМ

Физическую модель обобщенной ТЭМ можно представить следующим образом (**рис. 1**): на статоре 1 расположены обмотки А, В и С, магнитные оси которых взаимно перпендикулярны друг другу, причем магнитная ось обмотки А совпадает с продольной осью статора; к статору крепится подвес 5, обеспечивающий ротору 6 три степени свободы; на роторе расположены обмотки а, b и с, магнитные оси которых взаимно перпендикулярны друг другу, причем магнитная ось обмотки 7 совпадает с продольной осью ротора.

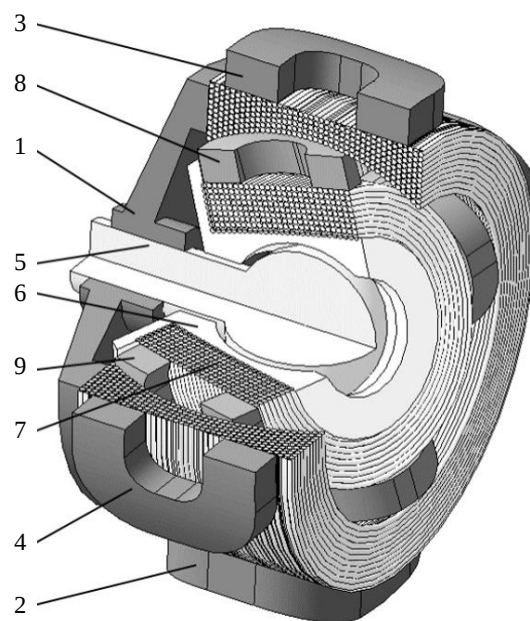


Рис. 1. Физическая модель обобщенной ТЭМ:
1 – статор; 2-4 – статорные обмотки А, В, С; 5 – подвес;
6 – ротор; 7-9 – роторные обмотки а, b, с

Система координат, соответствующая рассматриваемой обобщенной ТЭМ, приведена на **рис. 2**. Здесь показана последовательность трех поворотов на углы α , β и γ , определяющих положение ротора обобщенной ТЭМ (то есть связанной с ним системы координат $X_r Y_r Z_r$) относительно ее статора (то есть связанной с ним системы координат $X_s Y_s Z_s$).

Дальнейшее рассмотрение обобщенной ТЭМ целесообразно проводить при допущении о малости углов α , β и неограниченности угла γ , а также с учетом того, что $\dot{\gamma} \gg \dot{\alpha}$ и $\dot{\gamma} \gg \dot{\beta}$. Указанные допущения корректны и применимы к подавляющему большинству реальных ТЭМ.

Механическое движение вращающегося тела, имеющего три степени свободы (в данном случае ротора обобщенной ТЭМ), в соответствии с введенной системой координат и указанными допущениями описывается следующей системой уравнений [2, 10]:

$$\begin{aligned} J_y \ddot{\alpha} + J_x \dot{\gamma} \dot{\beta} &= M^\alpha; \\ J_z \ddot{\beta} - J_x \dot{\gamma} \dot{\alpha} &= M^\beta; \\ J_x \ddot{\gamma} + D \dot{\gamma} &= M^\gamma, \end{aligned} \quad (1)$$

где J_x , J_y и J_z – моменты инерции ротора относительно соответствующих осей; M^α , M^β и M^γ – моменты внешних сил, действующие по соответствующим осям; D – коэффициент вязкого трения.

Электрохимические процессы в обмотках описываются совокупностью уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_j}{dt} + \tilde{e}_j^\phi + R_j i_j &= u_j; \\ \sum_{n=1}^m (i_j \Psi_l)_n &= M_{em}^{jl} \text{ при } j \neq l; \\ \Psi_j &= L_j i_j + \sum_{n=1}^m (M_{jl} i_l)_n, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Psi_{j(l)}$, L_j , R_j , i_j , u_j – соответственно потокосцепление, индуктивность, активное сопротивление, ток и приложенное к j -й обмотке напряжение; $\tilde{e}_j^\phi = -\dot{\Phi} \Psi_j$ – ЭДС движения, наводимая в j -й обмотке при ее движении по ϕ -му углу с $\dot{\phi}$ -й угловой скоростью; M_{em}^{jl} – электромагнитный момент, обусловленный взаимодействием j -й и l -й обмотками; M_{jl} – взаимная индуктивность между j -й и l -й обмотками; $j = A, B, C, a, b, c$ и $l = A, B, C, a, b, c$ – индекс соответствующей обмотки; m – число таких взаимодействующих пар обмоток.

При взаимно неподвижных обмотках их потокосцепление не зависит от их расположения (на роторе или на статоре) и определяется выражениями:

$$\begin{aligned} \Psi_A &= L_A i_A + M_{Aa} i_a; \quad \Psi_a = L_a i_a + M_{Aa} i_A; \\ \Psi_B &= L_B i_B + M_{Bb} i_b; \quad \Psi_b = L_b i_b + M_{Bb} i_B; \\ \Psi_C &= L_C i_C + M_{Cc} i_c; \quad \Psi_c = L_c i_c + M_{Cc} i_C. \end{aligned} \quad (3)$$

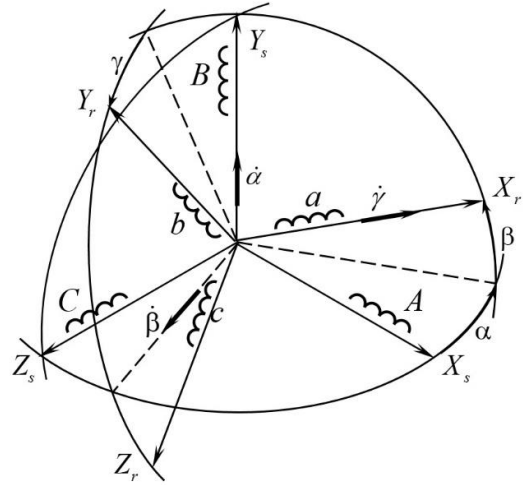


Рис. 2. Системы координат обобщенной ТЭМ

В соответствии с методикой, изложенной в [11], определим ЭДС движения и электромагнитные моменты для взаимно неподвижных обмоток, расположенных на статоре обобщенной ТЭМ (**рис. 3**). Тогда ЭДС вращения, наводимые в соответствующих обмотках, определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \tilde{e}_a &= \tilde{e}_a^\beta + \tilde{e}_a^\alpha = \dot{\beta} \Psi_b - \dot{\alpha} \Psi_c; \\ \tilde{e}_b &= \tilde{e}_b^\gamma + \tilde{e}_b^\beta = \dot{\gamma} \Psi_c - \dot{\beta} \Psi_a; \\ \tilde{e}_c &= \tilde{e}_c^\alpha + \tilde{e}_c^\gamma = \dot{\alpha} \Psi_a - \dot{\gamma} \Psi_b. \end{aligned}$$

Теперь с учетом выражений (3) и на основании систем (2) и (1) получим следующие модели движения обобщенной ТЭМ (пренебрегая иными моментами сил, кроме электромагнитных) при взаимно неподвижных обмотках, расположенных на статоре:

$$\begin{aligned} L_A \frac{di_A}{dt} + M_{Aa} \frac{di_a}{dt} + R_A i_A &= U_A; \\ L_B \frac{di_B}{dt} + M_{Bb} \frac{di_b}{dt} + R_B i_B &= U_B; \\ L_C \frac{di_C}{dt} + M_{Cc} \frac{di_c}{dt} + R_C i_C &= U_C; \\ L_a \frac{di_a}{dt} + M_{Aa} \frac{di_A}{dt} - \dot{\alpha} (L_c i_c + M_{Cc} i_C) + \\ &+ \dot{\beta} (L_b i_b + M_{Bb} i_B) + R_a i_a = U_a; \\ L_b \frac{di_b}{dt} + M_{Bb} \frac{di_B}{dt} - \dot{\beta} (L_a i_a + M_{Aa} i_A) + \\ &+ \dot{\gamma} (L_c i_c + M_{Cc} i_C) + R_b i_b = U_b; \\ L_c \frac{di_c}{dt} + M_{Cc} \frac{di_C}{dt} - \dot{\gamma} (L_b i_b + M_{Bb} i_B) + \\ &+ \dot{\alpha} (L_a i_a + M_{Aa} i_A) + R_c i_c = U_c; \\ J_y \ddot{\alpha} + J_x \dot{\gamma} \dot{\beta} &= i_a i_c (L_a - L_c) + M_{Aa} i_A i_c - M_{Cc} i_C i_a; \\ J_z \ddot{\beta} - J_x \dot{\gamma} \dot{\alpha} &= i_b i_a (L_b - L_a) + M_{Bb} i_B i_a - M_{Aa} i_A i_b; \\ J_x \ddot{\gamma} + D \dot{\gamma} &= i_c i_b (L_c - L_b) + M_{Cc} i_C i_b - M_{Bb} i_B i_c. \end{aligned}$$

Угол	Расчетная схема	Эд.с. вращения	Электромагнитные моменты
α			
		$\tilde{e}_a^\alpha = -\dot{\alpha}\Psi_c, \quad \tilde{e}_c^\alpha = \dot{\alpha}\Psi_a$	$M_{em}^\alpha = M_{em}^{ca} - M_{em}^{ac} = i_c\Psi_a - i_a\Psi_c$
β			
		$\tilde{e}_a^\beta = \dot{\beta}\Psi_b, \quad \tilde{e}_b^\beta = -\dot{\beta}\Psi_a$	$M_{em}^\beta = M_{em}^{ab} - M_{em}^{ba} = i_a\Psi_b - i_b\Psi_a$
γ			
		$\tilde{e}_b^\gamma = \dot{\gamma}\Psi_c, \quad \tilde{e}_c^\gamma = -\dot{\gamma}\Psi_b$	$M_{em}^\gamma = M_{em}^{bc} - M_{em}^{cb} = i_b\Psi_c - i_c\Psi_b$

Рис. 3. Электромагнитное взаимодействие взаимно неподвижных обмоток, расположенных на статоре обобщенной ТЭМ

Аналогичным образом определяются ЭДС движения и электромагнитные моменты для взаимно неподвижных обмоток, расположенных на роторе обобщенной ТЭМ (рис. 4). При этом учитывается, что обмотки статора реальной машины как бы вращаются относительно роторных обмоток в противоположную (относительно его вращения) сторону.

Тогда ЭДС вращения, наводимые в соответствующих обмотках, определяются выражениями:

$$\tilde{e}_A = \tilde{e}_A^\alpha + \tilde{e}_A^\beta = \dot{\alpha}\Psi_C - \dot{\beta}\Psi_B;$$

$$\tilde{e}_B = \tilde{e}_B^\beta + \tilde{e}_B^\gamma = \dot{\beta}\Psi_A - \dot{\gamma}\Psi_C;$$

$$\tilde{e}_C = \tilde{e}_C^\gamma + \tilde{e}_C^\alpha = \dot{\gamma}\Psi_B - \dot{\alpha}\Psi_A.$$

Математическая модель обобщенной ТЭМ со взаимно неподвижными обмотками, расположенными на роторе, имеет вид:

$$L_A \frac{di_A}{dt} + M_{Aa} \frac{di_a}{dt} + \dot{\alpha}(L_C i_C + M_{Cc} i_c) - \dot{\beta}(L_B i_B + M_{Bb} i_b) + R_A i_A = U_A;$$

$$L_B \frac{di_B}{dt} + M_{Bb} \frac{di_b}{dt} + \dot{\beta}(L_A i_A + M_{Aa} i_a) - \dot{\gamma}(L_C i_C + M_{Cc} i_c) + R_B i_B = U_B;$$

$$L_C \frac{di_C}{dt} + M_{Cc} \frac{di_c}{dt} + \dot{\gamma} (L_B i_B + M_{Bb} i_b) - \\ - \dot{\alpha} (L_A i_A + M_{Aa} i_a) + R_C i_C = U_C;$$

$$L_a \frac{di_a}{dt} + M_{Aa} \frac{di_A}{dt} + R_a i_a = U_a;$$

$$L_b \frac{di_b}{dt} + M_{Bb} \frac{di_B}{dt} + R_b i_b = U_b;$$

$$L_c \frac{di_c}{dt} + M_{Cc} \frac{di_C}{dt} + R_c i_c = U_c;$$

$$J_y \ddot{\alpha} + J_x \dot{\gamma} \dot{\beta} = i_C i_A (L_C - L_A) + M_{Cc} i_A i_c - M_{Aa} i_C i_a;$$

$$J_z \ddot{\beta} - J_x \dot{\gamma} \dot{\alpha} = i_A i_B (L_A - L_B) + M_{Aa} i_B i_a - M_{Bb} i_A i_b;$$

$$J_x \ddot{\gamma} + D \dot{\gamma} = i_B i_C (L_B - L_C) + M_{Bb} i_C i_b - M_{Cc} i_B i_c.$$

Угол	Расчетная схема	Эд.с. вращения	Электромагнитные моменты
α			
		$\tilde{e}_A^\alpha = \dot{\alpha} \Psi_C, \quad \tilde{e}_C^\alpha = -\dot{\alpha} \Psi_A$	$M_{em}^\alpha = M_{em}^{AC} - M_{em}^{CA} = i_A \Psi_C - i_C \Psi_A$
β			
		$\tilde{e}_B^\beta = -\dot{\beta} \Psi_A, \quad \tilde{e}_A^\beta = \dot{\beta} \Psi_B$	$M_{em}^\beta = M_{em}^{BA} - M_{em}^{AB} = i_B \Psi_A - i_A \Psi_B$
γ			
		$\tilde{e}_C^\gamma = -\dot{\gamma} \Psi_B, \quad \tilde{e}_B^\gamma = \dot{\gamma} \Psi_C$	$M_{em}^\gamma = M_{em}^{CB} - M_{em}^{BC} = i_C \Psi_B - i_B \Psi_C$

Рис. 4. Электромагнитное взаимодействие взаимно неподвижных обмоток, расположенных на роторе обобщенной ТЭМ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные математические модели обобщенной ТЭМ хорошо согласуются с аналогичными моделями классической обобщенной ЭМ, то есть позволяют получить уравнения обобщенной ЭМ путем обнуления соответствующих величин (параметров обмоток A и a , а также углов α , β и их производных).

Кроме того, полученные математические модели не содержат переменных коэффициентов, что существенно упрощает анализ движения ТЭМ, позволяют получать на их основе модели движения различных конкретных типов ТЭМ, а также могут быть использованы при синтезе контуров управления движением ТЭМ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гироскопические приводы на базе трехступенных электрических машин: монография / Соловьев А.Э., Сухинин Б.В., Сурков В.В., Козлова Е.С. Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. 215 с.
2. Гуревич М.С. Комплексирование преобразований координат во вращающихся следящих системах // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010 № 1. С. 35-44.
3. Козлова Е.С., Рогов С.В. Математическая модель трехступенной электрической машины // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып.10. С. 89-94.
4. Соколов М.В., Михед А.Д. Гиропривод на основе трех-

Поступила в редакцию 30 июня 2023 г.

ступенной электрической машины // Современные тенденции развития науки и производства: сборник материалов Международной научно-практической конференции. Кемерово: ООО «Западно-Сибирский научный центр», 2023. С. 16-19.

5. Милих А.Н., Барабанов В.А., Двойных В.В. Трехступенные электрические машины. Киев: Наукова думка, 1979. 312 с.
6. Соловьев А.Э., Осман Ф.Т., Ульянов Р.Ю. Математическая модель трехступенной электрической машины асинхронного типа, полученная на основе обобщенной модели // Известия Тульского государственного университета. Серия: Проблемы управления электротехническими объектами. 2010. С. 153-162.
7. Соловьев А.Э., Осман Ф.Т., Ульянов Р.Ю. Математическая модель обобщенной трехступенной электрической машины // Навигация и управление движением: материалы трудов XII конференции молодых ученых. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2010. С. 372-378.
8. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 364 с.
9. Электрические машины: учебник / под ред. И.П. Копылова. 2-е изд. М.: Юрайт, 2015. 675 с.
10. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. Т. 1. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 652 с.
11. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. Т. 2. М.: изд-во МЭИ, 2004. 532 с.

Принята к печати 12 августа 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MATHEMATICAL MODEL OF A GENERALIZED THREE-STAGE ELECTRIC MACHINE WITH MUTUALLY STATIONARY WINDINGS

Alexander E. Solov'yev

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Electrical Engineering and Electrical Facilities Department, Tula State University, Tula, Russia, soaled@yandex.ru

Oleg A. Kravchenko

D.Sc. (Engineering), Professor, Rector, Tula State University, Tula, Russia, info@tsu.tula.ru

In electromechanics, a generalized electric machine is widely used to carry out analysis of complex processes and phenomena, synthesis of control systems, etc. Considering that in the vast majority of electric machines, the rotor has only one degree of freedom relative to the stator, mathematical models of classical generalized electric machines are based on physical models containing two pairs of orthogonal windings and one axis of rotation. At the same time, the modern development of the component base makes it possible to implement in practice and use in precision devices relatively new types of electric machines, the rotor of which has three degrees of freedom relative to the stator rather than one degree. The mathematical description of such machines, obtained, for example, on the basis of the Lagrange equation of the second kind, contains variable coefficients and is significantly more complex than classical (single-stage) machines. Therefore, there was an objective need to extend the tools of the classical generalized machine to three-stage ones. This article presents mathematical models of a generalized three-stage electric machine having two sets of three orthogonal windings to each other. These models (by analogy with the models of classical generalized machines) are obtained with mutually non-movable stator and rotor windings for two cases: when these windings rotate (that is, they are located on the rotor) and when they are stationary (that is, they are located on the stator). The obtained mathematical models no longer have

variable coefficients, which greatly simplifies the process of analyzing the functioning of such machines in various modes and devices, and also allows the synthesis of interconnected motion control circuits along each of the three axes.

Keywords: electric machine, rotor, stator, winding, inductance, voltage, current, flow coupling, electromagnetic moment

REFERENCES

1. Solov'ev A.E., Sukhinin B.V., Surkov V.V., Kozlova E.S. *Гироскопические приводы на базе трехступенных электрических машин* [Gyroscopic drives based on three-stage electric machines]. Tula, TulSU Publishing House, 2007. 215 p.
2. Gurevich M.S. Integration of coordinate transformations in rotating tracking systems. *Izvestiya SPbGETU "LETI"* [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University], 2010, no. 1, pp. 35-44. (In Russian)
3. Kozlova E.S., Rogov S.V. Mathematical model of a three-stage electric machine. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. [Izvestiya Tula State University], 2021, iss. 10, pp. 89-94. (In Russian)
4. Sokolov M.V., Mikhed A.D. Gyro drive based on a three-stage electric machine. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i proizvodstva. Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. [Collection of materials

- of the International Scientific and Practical Conference "Modern trends in the development of science and production". Kemerovo, LLC "West Siberian Scientific Center", 2023, pp. 16-19. (In Russian)
5. Milyakh A.N., Barabanov V.A., Dvoynikh V.V. *Trehkstepennye elektricheskie mashiny* [Three-stage electric machines]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1979. 312 p. (In Russian)
 6. Solovev A.E., Osman F.T., Ulyanov R.Yu. Mathematical model of a three-stage asynchronous electric machine obtained on the basis of a generalized model. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Problemy upravleniya elektrotekhnicheskimi ob'yektami*. [Proceedings of Tula State University "Problems of management of electrotechnical objects"], 2010, pp. 153-162. (In Russian)
 7. Solovev A.E., Osman F.T., Ulyanov R.Yu. Mathematical model of a generalized three-stage electric machine. *Navigatsiya i upravlenie dvizheniem: materialy trudov XII konferentsii molodykh uchenykh* [Proceedings of the XII Conference of Young Scientists "Navigation and motion control"]. St. Petersburg, Publishing House of the SSC RF Central Research Institute "Electric Appliance", 2010, pp. 372-378. (In Russian)
 8. Khrushchev V.V. *Elektricheskie mashiny system avtomatiki* [Electric machines of automation systems]. Leningrad? Energoatomizdat Publ., 1985. 364 p. (In Russian)
 9. Kopylov I. P. *Elektricheskie mashiny: uchebnik* [Electric machines]. Moscow, Yurayt Publishing House, 2015. 675 p. (In Russian)
 10. Ivanov-Smolensky A.V. *Elektricheskie mashiny: uchebnik dlya vuzov* [Electric machines: Textbook for universities]. Vol. 1. Moscow, Publishing House of MPEI, 2004. 652 p. (In Russian)
 11. Ivanov-Smolensky A.V. *Elektricheskie mashiny: uchebnik dlya vuzov* [Electric machines]. Vol. 2. Moscow, Publishing House of MPEI, 2004. 532 p. (In Russian)

Соловьев А.Э., Кравченко О.А. Математическая модель обобщенной трехступенной электрической машины с взаимно неподвижными обмотками // *Электротехнические системы и комплексы*. 2023. № 3(60). С. 26-33. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-26-33](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-26-33)

Solovyev A.E., Kravchenko O.A. Mathematical Model of a Generalized Three-Stage Electric Machine with Mutually Stationary Windings. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 3(60), pp. 26-33. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-26-33](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-26-33)

РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ НЕРЕГУЛЯРНОЙ ФОРМЫ В ЗАДАННОЙ ЛОКАЦИИ: ФОРМАЛИЗАЦИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОБРАБОТКИ ГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Целью исследования является повышение эффективности распознавания объектов нерегулярной формы в заданной локации за счет разработки метода и алгоритмов распознавания объектов нерегулярной формы, полученных с использованием беспилотного воздушного судна. Объектом исследования является система производственного контроля за состоянием территории, зданий и сооружений на опасных производственных объектах металлургического предприятия. Предмет исследования – математическое представление изображений, алгоритмы и методы распознавания объектов нерегулярной формы в заданной локации на основе визуальной информации. Исследование проводится в рамках научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы на одном из ведущих предприятий черной металлургии РФ. В настоящей статье представлены: достоинства и недостатки современных методов распознавания объектов на изображении для задачи распознавания объектов нерегулярной формы со случайным местом расположения; структура изображения, которое поступает для обработки при обследовании территории крупного промышленного предприятия; по результатам изучения изображения построена структурная единица информации и введены новые термины для формализации задачи распознавания; выполнена постановка задачи обработки графической информации при обнаружении объектов нерегулярной формы в заданной локации на территории крупного промышленного предприятия, а также выбрана технология ее решения на основе сверточных искусственных нейронных сетей для прямого и обратного поиска объектов. Результаты исследования являются основой для создания автоматизированной системы контроля состояния территории металлургического предприятия, применение которой обеспечивает в режиме реального времени и на постоянной основе поступление в систему управления промышленной безопасности сведений о текущих параметрах безопасной эксплуатации объекта контроля и обеспечивает информирование персонала о количественных изменениях ранее выявленных объектов, а также появление новых.

Ключевые слова: графическая информация, распознавание объектов, локация и территория, формализация задачи, структурная единица информации

ВВЕДЕНИЕ

Тенденции развития современного общества, его гражданской и промышленной инфраструктуры определяет государственные вызовы, направленные на информатизацию и цифровизацию. Эти вызовы получили свое отражение в проекте «Наука и университеты». Новые тенденции приводят к интенсивному развитию промышленности, которое требует модернизации технических средств, создание новых промышленных объектов и средств мониторинга и контроля качества получаемой продукции [1-3].

В течение последних 20-ти лет широкое распространение получает применение методов машинного зрения и распознавания объектов во всех областях экономики России и за ее пределами. В области теории и практики распознавания объектов на изображении накоплен значительный положительный опыт.

В работах [4-6] авторы изучают возможности применения компьютерного зрения для распознавания объектов – каскадный алгоритм Хаара позволяет производить поиск любых обладающих характерными особенностями деталей изображения (животных, дорожных знаков, лиц и глаз людей), к недостаткам такого решения относится необходимость описания особенностей искомого детали изображения в виде файла XML. Чухраев И.В. и Ильичев В.Ю. в своей работе [7] продолжают исследование применимости компьютерного зрения – алгоритм Хафа позволяет выделять на изображении простые фигуры (линии, прямоугольни-

ки, окружности), к недостаткам такого решения относится необходимость описывать определяемый объект параметрическим уравнением (форма, цвет, размер объекта), все точки которого последовательно анализируются.

В исследовании [8] Волобой А.Г. и Новоторцев Л.В. исследуют варианты распознавания строений на аэрофотоснимках – разработанный алгоритм на основе простых геометрических операций. К недостаткам этого исследования относится большая погрешность обнаружения (вместе с искомыми объектами выделяются соседние). Схожую задачу по распознаванию объектов на спутниковых изображениях решают и авторы в статье [9]. Предложенный алгоритм классификации объектов на изображении с использованием матрицы корреляции позволяет на основе заданного шаблона определять координаты шаблона на изображении, недостатком такого решения является наличие ошибок первого и/или второго рода, означающих ошибочное отклонение классификатором объекта или определение объекта как искомого.

Свой подход к структурному анализу изображений предлагают авторы работ [10, 11], заключающийся в последовательном уточнении признаков объектов и ослаблении правил интерпретации в ходе итерационного поиска фактов с использованием онтологии изображений, представленных в виде атрибутивных графов отношений между элементами объектов. Алгоритм рассуждений на графической информации позволяет на основе информации, содержащейся в базе прецедентов, определить оптимальные параметры сегмента-

ции. Недостатком такого подхода является составление базы прецедентов вручную.

Коллективы авторов в работах [12-15] исследуют возможности применения искусственных нейронных сетей для распознавания объектов – региональные глубокие сверточные нейронные сети (R-CNN) позволяют решать задачи поиска объектов с одновременной их классификацией, используя алгоритмы region-proposal-function (Fast R-CNN, Faster R-CNN) для создания «областей внимания», в которых потенциально могут находиться интересующие объекты, формируя на их основе карты признаков и классифицируя объекты с помощью метода опорных векторов (SVM). К недостаткам такого решения относится необходимость обучения нейронных сетей на размеченном наборе данных для каждого типа (класса) распознаваемого объекта (больше 500-1000 изображений на один класс).

Годунов А.И., Балаян С.Т. и Егоров П.С. в своем исследовании [16] рассматривают применимость сверточных нейронных сетей для осуществления процесса сегментации изображения – методы сегментации позволяют разделить изображение на области, однородные по некоторому критерию. Проанализированные традиционные методы (пороговые и адаптивные) сегментаций изображений имеют свои слабые места. Так, например, метод Оцу приводит к утрате мелких деталей, а при использовании метода Ниблэка появляются ложные объекты в случае неоднородностей фона с низкой контрастностью. В работе [17] рассматривается нейросетевой подход, основанный на использовании эталонного контура искомого объекта и его признаков с помощью преобразования Фурье, – подход позволяет распознавать контур вне зависимости от смещения и масштаба, к недостаткам же относится использование большого набора контуров, близких к эталону со всеми возможными ориентациями и углами поворота.

Проанализированные работы показали высокий уровень развития методов распознавания объектов на изображении. Однако до настоящего времени одной из проблем остается распознавание изображений сложной структуры, в которой присутствуют объекты регулярной и нерегулярной формы со случайным местом расположения [18, 19].

Особенностями проводимого исследования является наличие графической информации, которая содержит объекты нерегулярной формы и их случайное расположение на ограниченной территории. Несмотря на проведенные исследования и значительное число публикаций в области распознавания объектов, остаются нерешенными следующие проблемы:

- существующие решения носят локальный отраслевой характер и адаптированы для решения конкретных задач в заданных отраслях промышленности, медицины, банковской и финансовой сферах [20-25];
- малое количество решений для распознавания формы и местоположения объектов нерегулярной формы с учетом особенностей местности, освещения и погодных условий [26-31].

В представляемой работе рассматривается решение задачи о нахождении и идентификации объектов регулярной и нерегулярной формы на изображении в условиях заданной локации. Вызовом для постановки такой задачи является создание системы интеллектуальной

поддержки принятия решений в системе управления промышленной безопасности крупного промышленного предприятия Российской Федерации.

ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ИХ ФОРМАЛИЗАЦИЯ

В системе управления промышленной безопасности выполняется оценка состояния объекта с использованием методов визуального осмотра. В марте 2023 года введены изменения в п. 23 Федеральных норм и правил [32], согласно которым «При оценке фактического состояния технических устройств, зданий и сооружений на опасных производственных объектах допускается применение информации из автоматизированных систем мониторинга их технического состояния». Указанные изменения привели к инновационным изменениям в средствах сбора и обработки информации о состоянии опасных объектов промышленных предприятий, включая территории, здания и сооружения.

В качестве инструментов сбора информации использованы фото- и видеоканеры, установленные на беспилотных летательных аппаратах типа DJI Mavic 2 Pro с характеристиками, приведенными в табл. 1 [25].

В результате обследования пилотных объектов получено более 1000 фотографий. Согласно требованию заказчика выполнена сортировка фотографий и определены их группы по структуре [23]. Согласно классификации в работе [23] выделены группы изображений, которые содержат объекты нерегулярной формы со случайным местом расположения в заданной локации.

На рис. 1 и 2 приведены изображения полученных объектов.

Таблица 1
Характеристики видеоканеры, установленной на беспилотном летательном аппарате типа DJI Mavic 2 Pro

№ п/п	Характеристика	Значение	Единица измерения
1	Угол раскрытия	77	град
2	Эквивалент формата	35×28	мм·мм
3	Разрешение	20	Мп на 1 дюйм
4	Диапазон ISO для видео	100–6400	
5	Диапазон ISO для фото	100–7200	



Рис. 1. Изображение фрагмента территории промышленного предприятия

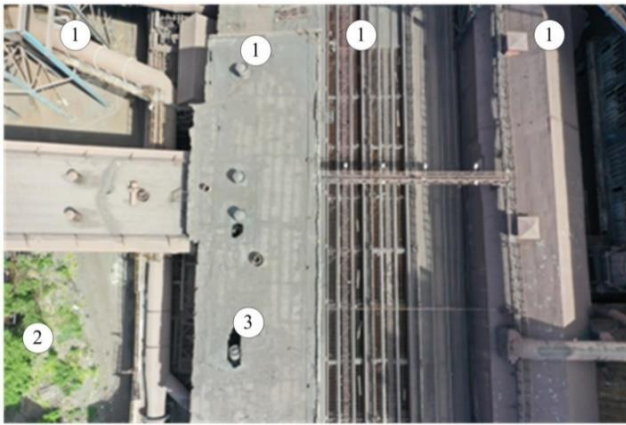


Рис. 2. Изображения фрагмента кровли промышленного здания

Для рис. 1, 2 введены следующие термины и обозначения:

- локация – часть территории промышленного предприятия, которая зафиксирована на фотографии или видеокadre;
- регулярные объекты локации – части изображения (локации), имеющие типовую форму для промышленной территории (1);
- нерегулярные объекты естественной природы – части изображения, имеющие нетиповую (нерегулярную) форму (2);
- нерегулярные объекты разрушения – части изображения, имеющие нерегулярную форму и являющиеся результатом нарушения требований промышленной безопасности (3).

Согласно введенной терминологии для формализации задачи требуется ввести обозначения, приведенные в табл. 2. С учетом обозначений, приведенных в табл. 2, территория промышленного предприятия может быть представлена в виде множественной модели:

$$Ter = \bigcup_{i=1}^k Loc_i \left(\bigcup_{j=1}^n \{ IONN_j \}, \bigcup_{l=1}^m \{ IDO_l \} \right). \quad (1)$$

Каждый из $IONN_j$ и IDO_l характеризуется параметрами: вид, характеризующий природу объекта; линейные размеры, минимальная ширина и длина прямоугольника, который можно описать вокруг объекта; координаты вершины объекта – абсцисса и ордината нижней левой вершины описывающего прямоугольника.

Геометрическая интерпретация модели изображения приведена на рис. 3. Модель структурной единицы информации приведена на рис. 4.

Аналитическая форма записи модели имеет вид:

$$Ter(1:k).(Loc_i(A,S));$$

$$A = IONN(1:n).(V, Size(a,b), Coord(x,y));$$

$$B = IDO(1:m).(V, Size(a,b), Coord(x,y)).$$

С использованием построенной модели организуются алгоритмы идентификации объектов заданной локации.

Таблица 2

Обозначения для формализации задачи распознавания объектов нерегулярной формы в заданной локации

Обозначение	Описание
Ter	территория промышленного предприятия
Γ_{Ter}	граница территории
Loc	локация
$IONN$	нерегулярные объекты естественной природы (irregular objects of natural nature)
IDO	нерегулярные объекты разрушения (irregular destruction objects)
n	количество $IONN$ в заданной локации
m	количество IDO в заданной локации
k	количество локаций
V	вид объекта
$Size$	агрегат линейных размеров объекта
a, b	ширина и длина объекта
$Coord$	агрегат координат объекта
x, y	координаты объекта



Рис. 3. Геометрическая интерпретация модели территории промышленного предприятия

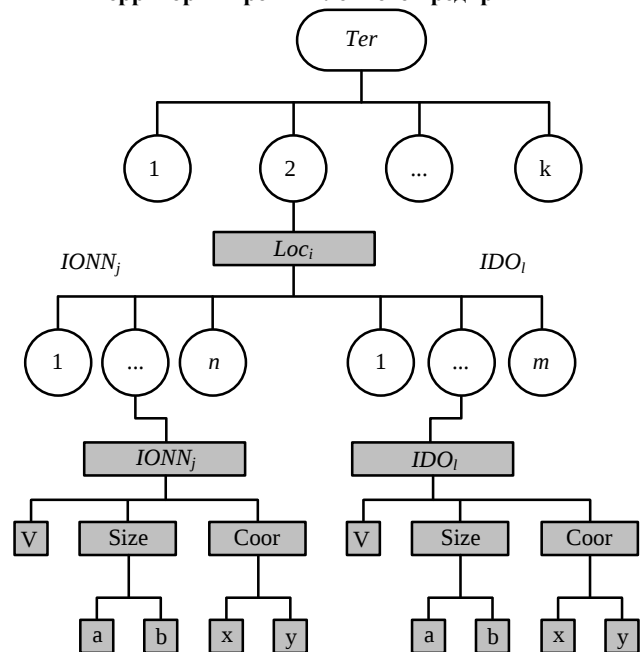


Рис. 4. Древоподобное представление структурной единицы информации для описания территории

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОБРАБОТКИ ГРАФИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ОБЪЕКТОВ
НЕРЕГУЛЯРНОЙ ФОРМЫ В ЗАДАННОЙ ЛОКАЦИИ

Требования индустриального партнера и результаты исследования структуры исходной информации позволили выполнить постановку задачи для обнаружения объектов нерегулярной формы в заданной локации.

Требуется на изображении локации определить наличие и свойства объектов регулярной и нерегулярной формы, при этом:

- определить множество локаций, которые необходимы для исследования, и построить модель территории промышленного предприятия (1);

- для каждой локации определить множества IONN и IDO с учетом идеального состояния локации;

- определить изменения состояния объектов множеств IONN и IDO с учетом освещения, приближенного к естественному, с учетом времени суток по цветовой градации;

- оценить влияние угла наклона освещения при образовании тени объектов и их динамики на состав (рис. 5);

- оценить влияние погодных условий свойства объектов множеств IONN и IDO.

Для решения поставленной задачи исследована возможность применения следующих методов: методы, основанные на применении морфологических операций; методы, основанные на принятии решений по древовидным структурам; методы нечеткой логики; методы принятия решений на основе искусственных нейронных сетей. Предпосылками использования указанных методов являются: методы, основанные на применении морфологических операций, позволяют идентифицировать простые геометрические объекты [4]; методы, основанные на принятии решений по древовидным структурам, охватывают все возможные варианты расположения объектов на изображении [10]; методы принятия решений на основе искусственных нейронных сетей позволяют распознавать любые типы объектов с высокой точностью и обладают устойчивостью к изменениям изображения [12]; методы нечеткой логики на основе математических моделей однозначно определяют класс объекта [33, 34].

Сравнительный анализ рассмотренных методов показал их достоинства и недостатки, приведенные в табл. 3.



Рис. 5. Изображение фрагмента территории при образовании тени объектов: 1 – тень объекта, не входящего в локацию; 2 – объект, принадлежащий локации; 3 – тень объекта (2)

Таблица 3
Сравнительный анализ рассмотренных методов

Метод	Достоинства	Недостатки
Компьютерное зрение (методы, основанные на применении морфологических операций)	Точность распознавания для простых геометрических объектов более 80% [4]	Качество исходных данных влияет на качество распознавания [6]
Методы, основанные на принятии решений по древовидным структурам	Точность распознавания для заданных объектов более 75% [10]	Для каждого объекта требуется составление графа признаков [10]
Нейронные сети (методы принятия решений на основе искусственных нейронных сетей)	Точность распознавания объектов, которые училась идентифицировать нейронная сеть, более 95% [12]	Для каждого типа распознаваемого объекта требуется большой набор исходных данных, как минимум 1000 изображений [12]
Методы нечеткой логики	Точность распознавания для объектов, описанных в математической модели, более 90% [33, 34]	Количество анализируемых признаков в математической модели влияет на качество распознавания [33, 34]

В ходе анализа возможных методов по требованиям задачи определена технология, которая позволяет достигнуть решения. В качестве этой технологии выбрана искусственная сверточная нейронная сеть.

Предполагается применение этой технологии для прямого и обратного поиска. Прямой поиск – это поиск объектов нерегулярной формы. Обратный поиск – это поиск объектов известной формы и определение искомым объектов как дополнение этого множества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования получены следующие результаты:

- 1) определены современные тенденции в развитии и применении методов распознавания объектов на изображении, их достоинства и недостатки, которые позволили определить их применимость для задачи распознавания объектов нерегулярной формы со случайным местом расположения;

- 2) изучена структура изображения, которое поступает для обработки, и по результатам изучения построена структурная единица информации и введены новые термины для формализации задачи распознавания;

- 3) выполнена постановка задачи обработки графической информации при обнаружении объектов нерегулярной формы в заданной локации на территории крупного промышленного предприятия и выбрана технология ее решения на основе сверточных искусственных нейронных сетей для прямого и обратного поиска объектов.

Исследования выполняются при финансовой поддержке по договору № 247715 от 05.07.2021 г. между ПАО «ММК» и ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» «Разработка и применение методик контроля территорий, зданий и сооружений ПАО «ММК» с использованием беспилотных воздушных судов (БВС)».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Доржиева В.В. Цифровизация промышленности: роль искусственного интеллекта и возможности для России // Вопросы инновационной экономики. 2022. Т. 12, № 4. С. 2383-2394. doi: 10.18334/vines.12.4.116599
- Сотников Г.А., Фролова А.В. Проблемы и перспективы цифровизации промышленности в России // Вестник российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева: Гуманитарные и социально-экономические исследования. 2021. № 12-2. С. 29-39.
- Александрова А.В., Сабре Д.М., Сабре М.М. Анализ состояния промышленной безопасности и условий труда на промышленных объектах нефтегазового комплекса Сирийской Арабской Республики // Научные труды КубГТУ. 2019. №7. С. 260-269.
- Бурмистров А.В., Ильичев В.Ю. Распознавание объектов на изображениях с использованием базовых средств языка Python и библиотеки opencv // Научное обозрение. Технические науки. 2021. № 5. С. 15-19.
- Ворожцова Н.А., Вологдин С.В. Применение машинного обучения для автоматизации процесса распознавания информации на фотоизображениях приборов учета электроэнергии // Системы компьютерной математики и их приложения. 2021. № 22. С. 51-56.
- Facial recognition using Haar cascade and LBP classifiers / A.B. Shetty, Bhoomika, Deeksha, J. Rebeiro, Ramyashree // Global Transitions Proceedings. 2021. Vol. 2(2). Pp. 330-335. doi: 10.1016/j.gltp.2021.08.044
- Чухраев И.В., Ильичев В.Ю. Распознавание характерных объектов на изображении с использованием технологий компьютерного зрения // E-Scio. 2021. № 8 (59). С. 122-131.
- Волобой А.Г., Новоторцев Л.В. Сопоставление областей на аэрофотоснимках в задаче распознавания строений // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2018. № 21. С. 17-23.
- Алгоритм классификации объектов на изображении с использованием матрицы корреляции / С.И. Суханов, Е.П. Крупочкин, С. Кумарбекулы, Н.М. Оскорбин // Труды семинара по геометрии и математическому моделированию. 2020. № 6. С. 74-77.
- Кучуганов А.В., Касимов Д.Р., Кучуганов В.Н. Моделирование рассуждений при поиске объектов на изображениях // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2020. Т. 30, №3. С. 497-512. doi: 10.35634/vm200310
- Multi-source knowledge graph reasoning for ocean oil spill detection from satellite SAR images / X. Liu, Y.n Zhang, H. Zou, F. Wang, X. Cheng, W. Wu, X. Liu, Y. Li // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2023. Vol. 116. P. 103153. doi: 10.1016/j.jag.2022.103153
- Сирота А.А., Митрофанова Е.Ю., Милованова А.И. Анализ алгоритмов поиска объектов на изображениях с использованием различных модификаций сверточных нейронных сетей // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2019. № 3. С. 123-137.
- Нгуен Т.К., Сырякин В.И., Нгуен Ч.Х.Т. Модель метода распознавания объектов на изображениях с использованием «сверточной нейронной сети – CNN» // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 12-2. С. 269-280. doi: 10.17513/snt.38445
- Amudhan A.N., Sudheer A.P. Lightweight and computationally faster Hypermetropic Convolutional Neural Network for small size object detection // Image and Vision Computing. 2022. Vol. 119. doi: 10.1016/j.imavis.2022.104396
- Improved YOLOX-X based UAV aerial photography object detection algorithm / X. Wang, N. He, C. Hong, Q. Wang, M. Chen // Image and Vision Computing. 2023. Vol. 135. P. 104697. doi: 10.1016/j.imavis.2023.104697
- Годунов А.И., Балаян С.Т., Егоров П.С. Сегментация изображений и распознавание объектов на основе технологии сверточных нейронных сетей // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3 (35). С. 62-73. doi: 10.21685/2307-4205-2021-3-8
- Емалетдинова Л.Ю., Назаров М.А. Нейросетевой алгоритм распознавания объекта на изображении на основе эталонного контура // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2020. Т. 4. С. 137-141.
- Логунова О.С., Девятов Д.Х., Нуров Х.Х. Оценка качества непрерывнолитой заготовки статистическими методами с использованием программных средств // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2005. № 9. С. 54-58.
- Логунова О.С. Стохастическая модель качества непрерывнолитой заготовки // Сталь. 2005. № 12. С. 21-23.
- Сойникова Е.С., Батищев Д.С., Михелев В.М. О распознавании форменных объектов крови на основе медицинских изображений // Научный результат. Информационные технологии. 2018. №3(3). С. 54-65. doi: 10.18413/2518-1092-2018-3-3-0-7
- Друки А.А. Применение сверточных нейронных сетей для выделения и распознавания автомобильных номерных знаков на изображениях со сложным фоном // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324, № 5. С. 85-92.
- Логунова О.С., Гарбар Е.А., Николаев А.А. Интервальная оценка признаков дефектов на изображении поверхности плоского проката // Современные достижения университетских научных школ: сб. докл. Магнитогорск, 2021. Вып. 6. С. 53-60.
- Интеллектуальная система принятия решений при оценке качества зданий и сооружений на опасных производственных объектах: определение траектории движения беспилотного летательного аппарата / М.Ю. Наркевич, О.С. Логунова, В.Д. Корниенко, А.Н. Калитаев, М.М. Суровцов, Д.А. Луганская, А.С. Чернышева // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20, №1. С. 50-60.
- Кабанова В.В., Климов С.С., Логунова О.С. Сбор информации и ее предварительная обработка при непрерывном мониторинге атмосферы над промышленным предприятием // АВ ОВО... (С САМОГО НАЧАЛА...). 2021. С. 23-31.
- Классификация исходных данных для интеллектуальной системы экспертной оценки визуально определяемых дефектов и повреждений / В.Д. Корниенко, Г.А. Ежов, М.Ю. Наркевич, О.С. Логунова // Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 6 (111). С. 53-64. doi: 10.23859/1994-0637-2022-6-111-4
- Казаков О.Д., Азаренко Н.Ю. Интеллектуальная система обнаружения и учета мусора на территории муниципалитета // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10, № 2(54). С. 59-66.
- Ляпин А.А., Шульженко М.В. Использование сверточных нейронных сетей в процессах сортировки твердых бытовых отходов // Вопросы устойчивого развития общества. 2022. № 8. С. 772-776.
- Исследование сверточных нейронных сетей для обнаружения объектов на аэрокосмических снимках / В.О. Скрипачев, М.В. Гуйда, Н.В. Гуйда, А.О. Жуков // International Journal of Open Information Technologies. 2022. Т. 10, № 7. С. 54-64.
- Акинина Н.В., Никифоров М.Б. Алгоритм детектирования несанкционированных свалок мусора на основе анализа данных дистанционного зондирования земли // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 10. С. 321-329.
- Архипов А.Е., Фомин И.С. Исследование сверточных нейронных сетей в задаче классификации изображений радиоактивных отходов // Машиностроение: сетевой

- электронный научный журнал. 2022. Т. 9, № 2. С. 39-44. doi: 10.24892/RIJE/20220207
31. Горбачев Р.А., Зарилов М.Н., Шишков Д.Л. Интеллектуальная система технического зрения для обнаружения препятствий и предсказания поведения движущихся объектов на железнодорожных путях // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 1(225). С. 256-268. doi: 10.18522/2311-3103-2022-1-256-268
 32. О внесении изменений в федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_418589/ (дата обращения 21.07.2023)
 33. Колкк А.А., Колкк В.А., Ширяев В.И. Совершенствование алгоритмов распознавания типов объектов в системах управления с применением нечеткой логики в условиях неопределенности // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2020. Т. 20, № 1. С. 39-50. doi: 10.14529/ctcr200104
 34. Hedayati A., Vahidnia M.H., Behzadi S. Paddy lands detection using Landsat-8 satellite images and object-based classification in Rasht city, Iran // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. 2022. Vol. 25(1). Pp. 73-84. doi: 10.1016/j.ejrs.2021.12.008

Поступила в редакцию 31 июля 2023 г.

Принята к печати 30 августа 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IRREGULAR SHAPE OBJECT RECOGNITION IN A GIVEN LOCATION: FORMALIZATION AND PROBLEM STATEMENT OF GRAPHIC INFORMATION PROCESSING

Aleksey V. Okhotnichenko

Post-graduate student, Department of Computer Engineering and Computing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, okhotnichenko.a.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0463-7589>

Oksana S. Logunova

D.Sc. (Engineering), Professor, Department Head, Department of Computer Engineering and Computing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, logunova66@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>

Mikhail Yu. Narkevich

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Director, Research and Development Establishment Industrial Security, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, narkevich_mu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6608-8293>

The purpose of the study is to increase the recognition efficiency of irregular-shaped objects in a given location by developing a method and algorithms for recognizing irregular-shaped objects obtained using an unmanned aerial vehicle. The object of the study is the system of production control over the state of the territory, buildings and structures at hazardous production facilities of a metallurgical enterprise. The subject of the research is a mathematical representation of images, algorithms and methods for recognizing objects of irregular shape in a given location based on visual information. The study is carried out as part of research and development work at one of the leading ferrous metallurgy enterprises of the Russian Federation. This article presents the advantages and disadvantages of modern methods for recognizing objects in an image for the recognizing objects problem of irregular shape with a random location; the image structure, that comes for processing when examining the territory of a large industrial enterprise; based on the results of studying the image, a structural unit of information was built and new terms were introduced to formalize the recognition problem; the task of processing graphic information was formulated, when objects of irregular shape were detected in a given location on the territory of a large industrial enterprise, and a technology for solving it based on convolutional artificial neural networks for forward and reverse search of objects was chosen. The results of the study are the basis for the creation of an automated system for monitoring the state of the metallurgical enterprise territory, the use of which provides real-time and on an ongoing basis for the receipt of information on the current parameters of the control object safe operation into the industrial safety management system and informs the personnel about quantitative changes in previously identified objects, as well as the emergence of new ones.

Keywords: graphic information, object recognition, location and territory, task formalization, structural unit of information

REFERENCES

1. Dorzhieva V.V. Digitization of industry: the role of artificial intelligence and opportunities for Russia. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki* [Russian Journal of Innovation Economics], 2022, vol. 12, no. 4, pp. 2383-2394. doi: 10.18334/vinec.12.4.116599 (In Russian)
2. Sotnikov G.A., Frolova A.V. Problems and prospects of industry digitalization in Russia. *Vestnik Rossiyskogo khimiko-tekhnologicheskogo universiteta imeni D.I. Mendeleeva: Gumanitarnye i sotsialno-ekonomicheskie issledovaniya* [Bulletin of the Russian University of Chemical Technology named after D. I. Mendeleev: Humanitarian and socio-economic research], 2021, no. 12-2, pp. 29-39. (In Russian)
3. Aleksandrova A.V., Sabre D.M., Sabre M.M. Analysis of the state of industrial safety and working conditions at industrial facilities of the oil and gas complex of the Syrian Arab Republic. *Nauchnye trudy KubGTU* [Scientific Works of the Kuban State Technological University], 2019, no. 7, pp. 260-269. (In Russian)
4. Burmistrov A.V., Ilyichev V.Yu. Object recognition in images using the basic tools of the Python language and the open cv library. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki*. [Scientific Review. Technical science], 2021, no. 5, pp. 15-19. (In Russian)
5. Vorozhtsova N.A., Vologdin S.V. Application of machine learning to automate the process of recognizing information on photographic images of electricity metering devices. *Sistemy kompyuternoy matematiki i ikh prilozheniya* [Systems of Computer Mathematics and Their Applications], 2021, no. 22, pp. 51-56. (In Russian)
6. Anirudha B Shetty, Bhoomika, Deeksha, Jeevan Rebeiro, Ramyashree, Facial recognition using Haar cascade and LBP classifiers. *Global Transitions Proceedings*. 2021, vol. 2(2), pp. 330-335. doi: 10.1016/j.gltp.2021.08.044
7. Chukhraev I.V., Ilyichev V.Yu. Recognition of characteristic objects in the image using computer vision technologies.

- E-Scio [E-Scio], 2021, no. 8(59), pp. 122-131. (In Russian)
8. Voloboy A.G., Novotortsev L.V. Comparison of regions on aerial photographs in the problem of building recognition. *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh* [New information technologies in automated systems], 2018, no. 21, pp. 17-23. (In Russian)
9. Sukhanov S.I., Krupochkin E.P., Kumarbekuly S., Oskorbina N.M. Algorithm for classifying objects in an image using a correlation matrix. *Trudy seminarov po geometrii i matematicheskomu modelirovaniyu* [Proceedings of the Seminar on Geometry and Mathematical Modeling], 2020, no. 6, pp. 74-77. (In Russian)
10. Kuchuganov A.V., Kasimov D.R., Kuchuganov V.N. Modeling reasoning when searching for objects in images. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Kompyuternye nauki*. [Bulletin of the Udmurt University. Mathematics. Mechanics. Computer science], 2020, vol. 30, no. 3, pp. 497-512. doi: 10.35634/vm200310. (In Russian)
11. Liu X., Zhang Y.n, Zou H., Wang F., Cheng X., Wu W., Liu X., Li Y. Multi-source knowledge graph reasoning for ocean oil spill detection from satellite SAR images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023, vol. 116, p. 103153. doi: 10.1016/j.jag.2022.103153
12. Sirota A.A., Mitrofanova E.Yu., Milovanova A.I. Analysis of algorithms for searching objects in images using various modifications of convolutional neural networks. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies], 2019, no. 3, pp. 123-137. (In Russian)
13. Nguyen T.K., Syryamkin V.I., Nguyen Ch.Kh.T. Model of the method of object recognition in images using "convolutional neural network - CNN". *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technologies], 2020, no. 12-2, pp. 269-280. doi: 10.17513/snt.38445 (In Russian)
14. Amudhan A.N., Sudheer A.P. Lightweight and computationally faster Hypermetropic Convolutional Neural Network for small size object detection. *Image and Vision Computing*. 2022, vol. 119. doi:10.1016/j.imavis.2022.104396
15. Wang X., He N., Hong C., Wang Q., Chen M. Improved YOLOX-X based UAV aerial photography object detection algorithm. *Image and Vision Computing*. 2023, vol. 135, 104697. doi: 10.1016/j.imavis.2023.104697
16. Godunov A.I., Balanyan S.T., Egorov P.S. Image segmentation and object recognition based on the technology of convolutional neural networks. *Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems], 2021, no. 3 (35), pp. 62-73. doi: 10.21685/2307-4205-2021-3-8 (In Russian)
17. Emaletdinova L.Yu., Nazarov M.A. Neural network algorithm for recognizing an object in an image based on a reference contour. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT. MMTT* [Mathematical methods in engineering and technology – MMTT], 2020, vol. 4, pp. 137-141. (In Russian)
18. Logunova O.S., Devyatov D.Kh., Nurov Kh.Kh. Evaluation of the quality of a continuously cast billet by statistical methods using software. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*. [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2005, no. 9, pp. 54-58. (In Russian)
19. Logunova O.S. Stochastic model of the quality of a continuously cast billet. *Stal* [Steel], 2005, no. 12, pp. 21-23. (In Russian)
20. Soynikova E.S., Batishchev D.S., Mikhelev V.M. On the recognition of uniform blood objects based on medical images. *Nauchnyi rezultat. Informatsionnye tekhnologii*. [Research result. Information technologies], 2018, vol. 3, no. 3, pp. 54-65. doi: 10.18413/2518-1092-2018-3-3-0-7 (In Russian)
21. Druki A.A. Application of convolutional neural networks for the extraction and recognition of license plates in images with a complex background. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2014, vol. 324, no. 5, pp. 85-92. (In Russian)
22. Logunova O.S., Garbar E.A., Nikolaev A.A. Interval estimation of signs of defects on the image of flat rolled product surface. *Sovremennye dostizheniya universitetskikh nauchnykh shkol* [Modern achievements of university scientific schools], Magnitogorsk, 2021, Iss. 6, pp. 53-60. (In Russian)
23. Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kornienko V.D., Kalitaev A.N., Surovtsov M.M., Luganskaya D.A., Chernyshev A.S. Intelligent decision-making system in assessing the quality of buildings and structures at hazardous production facilities: determining the trajectory of an unmanned aerial vehicle. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novosov Magnitogorsk State Technical University], 2022, vol. 20, no. 1, pp. 50-60. (In Russian)
24. Kabanova V.V., Klimov S.S., Logunova O.S. Collection of information and its preliminary processing during continuous monitoring of the atmosphere over an industrial enterprise. *AV OVO ... (S SAMOGO NACHALA...)* [AB OVO... (FROM THE VERY BEGINNING...)], 2021, pp. 23-31. (In Russian)
25. Kornienko V.D., Ezhov G.A., Narkevich M.Yu., Logunova O.S. Classification of initial data for an intelligent system of expert evaluation of visually determined defects and damages. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepovets State University Bulletin], 2022, no. 6 (111), pp. 53-64. doi: 10.23859/1994-0637-2022-6-111-4 (In Russian)
26. Kazakov O.D., Azarenko N.Yu. Intelligent system for detecting and accounting for garbage on the territory of the municipality. *XXI vek: itogi proshlogo i problem nastiyashchego plus* [XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus], 2021, vol. 10, no. 2(54), pp. 59-66. (In Russian)
27. Lyapin A.A., Shulzhenko M.V. The use of convolutional neural networks in the processes of sorting solid household waste. *Voprosy ustoichivogo razvitiya obshchestva* [Issues of sustainable development of society], 2022, no. 8, pp. 772-776. (In Russian)
28. Skripachev V.O., Guida M.V., Guida N.V., Zhukov A.O. Study of convolutional neural networks for object detection on aerospace images. [International Journal of Open Information Technologies], 2022, vol. 10, no. 7, pp. 54-64. (In Russian)
29. Akinina N.V., Nikiforov M.B. Algorithm for detecting unauthorized garbage dumps based on the analysis of remote sensing data. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Izvestiya Tula State University], 2019, no. 10, pp. 321-329. (In Russian)
30. Arkhipov A.E., Fomin I.S. Investigation of convolutional neural networks in the problem of classification of images of radioactive waste. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2022, vol. 9, no. 2, pp. 39-44. doi: 10.24892/RIJE/20220207 (In Russian)
31. Gorbachev R.A., Zaripov M.N., Shishkov D.L. Intelligent vision system for detecting obstacles and predicting the behavior of moving objects on railway tracks. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering sciences], 2022, no. 1 (225), pp. 256-268. doi: 10.18522/2311-3103-2022-1-256-268 (In Russian)

32. On Amendments to the Federal Norms and Rules in the Field of Industrial Safety "Rules for Conducting an Expertise of Industrial Safety". Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_418589/ (accessed 21 July 2023)
 33. Kolk A.A., Kolk V.A., Shiryayev V.I. Improving algorithms for recognizing object types in control systems using fuzzy logic under uncertainty. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of South Ural State University. Series "Computer Technologies, Automatic Control, Radioelectronics"], 2020, vol. 20, no. 1, pp. 39-50. doi: 10.14529/ctcr200104 (In Russian)
 34. Hedayati A., Vahidnia M.H., Behzadi S. Paddy lands detection using Landsat-8 satellite images and object-based classification in Rasht city, Iran. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2022, vol. 25(1), pp. 73-84. doi: 10.1016/j.ejrs.2021.12.008
-
- Охотниченко А.В., Логунова О.С., Наркевич М.Ю. Распознавание объектов нерегулярной формы в заданной локации: формализация и постановка задачи обработки графической информации // *Электротехнические системы и комплексы*. 2023. № 3(60). С. 34-41. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-34-41](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-34-41)
- Okhotnichenko A.V., Logunova O.S., Narkevich M.Yu. Irregular Shape Object Recognition in a Given Location: Formalization And Problem Statement of Graphic Information Processing. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 3(60), pp. 34-41. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-34-41](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-34-41)
-

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ВО ВНУТРИЗАВОДСКОЙ СЕТИ 6-35 кВ ЗА СЧЕТ ТЕСТОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

На многих крупных промышленных предприятиях, в частности на предприятиях чёрной металлургии, в настоящий момент используются электроприводы переменного тока большой мощности на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями. Данные преобразователи, как правило, имеют входное напряжение 3,15-3,5 кВ и подключаются к внутризаводской распределительной сети 6-35 кВ с помощью согласующих трансформаторов. При большой протяженности кабельных линий в сети 6-35 кВ могут возникать условия для появления резонанса токов в диапазоне частот, совпадающим с высокочастотными гармониками тока, генерируемыми преобразователями частоты с активными выпрямителями. При этом в сети 6-35 кВ могут возникать опасные искажения напряжения, приводящие к аварийному отключению или выходу из строя чувствительного к качеству электроэнергии оборудования. Существуют несколько способов устранения данных искажений напряжения: применение специальных фильтров для коррекции частотной характеристики; применение адаптивных алгоритмов широтно-импульсной модуляции активных выпрямителей; создание «грязной» секции на внутризаводской подстанции и др. Для определения оптимального способа устранения данных искажений необходимо знать форму частотной характеристики внутризаводской системы электроснабжения 6-35 кВ, от которой получают питание электроприводы на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями. Целью данных исследований является разработка усовершенствованного способа диагностики резонансных явлений во внутризаводской сети 6-35 кВ за счёт тестовых воздействий со стороны активных выпрямителей. Исследования проводились с помощью имитационной модели системы «сеть – преобразователь частоты с активным выпрямителем», а также на основании результатов экспериментальных исследований на действующем электрооборудовании металлургических предприятий.

Ключевые слова: внутризаводская система электроснабжения, показатели качества электроэнергии, преобразователь частоты, активный выпрямитель, широтно-импульсная модуляция, электромагнитная совместимость, резонанс токов, частотная характеристика

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в тяжелой промышленности большое распространение получили регулируемые электроприводы большой мощности (более 1 МВт) среднего напряжения (3,15-3,5 кВ) на основе двигателей переменного тока и преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ) отечественного и зарубежного производства. Основными преимуществами ПЧ-АВ в сравнении с ПЧ на базе диодных или тиристорных выпрямителей являются: встроенная функция рекуперации энергии торможения в питающую сеть, позволяющая сделать устройство более компактным, поскольку отпадает необходимость в специальных модулях рекуперации или тормозных модулях; возможность работы ПЧ-АВ с единичным коэффициентом мощности $\cos\varphi = 1$ или даже с опережающим током [1, 2].

Переключение силовых вентилях ПЧ-АВ осуществляется по законам широтно-импульсной модуляции (ШИМ), что позволяет влиять на гармонический состав токов и напряжений в точке подключения ПЧ-АВ за счёт специальных алгоритмов ШИМ АВ. Данный факт позволяет производителям преобразовательной техники заявлять о ПЧ-АВ как об устройствах, практически не влияющих на качество напряжения в питающей сети [3].

Однако проведённые исследования показывают, что при определённой конфигурации системы внутри-

заводского электроснабжения с ПЧ-АВ высока вероятность критического искажения синусоидальности кривой напряжения в точке общего подключения электроприёмников [4]. Это связано с наличием резонансных участков в частотной характеристике внутризаводской сети 6-35 кВ, которые возникают, в основном, при взаимодействии эквивалентной ёмкости протяжённых кабельных линий и индуктивности сетевого трансформатора на главной понизительной подстанции ГПП предприятия. Данный резонанс является токовым, иначе параллельным, с величиной экстремума в десятки сотни Ом.

Высшие гармоники тока, потребляемые мощными ПЧ-АВ, могут совпадать по частоте с областью резонанса в питающей сети и приводить к возникновению сильных искажений напряжения в точке подсоединения других электроприёмников. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U при этом может значительно превышать предел в 5%, установленный ГОСТ 32144-2013. При этом возможна некорректная работа чувствительных к качеству напряжения электроприёмников: отключение устройств бесперебойного питания систем автоматизации; выход из строя некоторых ПЧ с модулями рекуперации энергии; повышенное потребление тока системами освещения с газоразрядными лампами и другие проблемы [5].

Для улучшения качества электроэнергии в сетях с мощными ПЧ-АВ можно применить следующие организационные и технические решения: выделение грязной секции на ГПП для питания только мощных ПЧ-АВ;

установка фильтрокомпенсирующих устройств для удаления наиболее значимых гармоник ПЧ-АВ или для коррекции частотной характеристики сети; использование наиболее оптимальных режимов электроснабжения, когда влияние ПЧ-АВ на сеть минимально; изменение настроек контроллера ШИМ АВ для уменьшения уровня высших гармоник тока ПЧ-АВ, попадающих в резонансную область частотной характеристики питающей сети 6-35 кВ [6].

Для определения оптимального способа обеспечения качества электроэнергии в сетях 6-35 кВ при работе ПЧ-АВ необходимо определить частотную характеристику внутризаводской системы электроснабжения. Это можно сделать двумя способами: расчётным, с помощью математического или имитационного моделирования системы электроснабжения, для чего необходимо знать параметры всех реактивных элементов (ёмкость и длина отходящих кабельных линий, индуктивность силовых трансформаторов и реакторов); экспериментальным, на основе осциллограмм мгновенных значений напряжения и тока, записанных регистратором электрических сигналов с большой частотой дискретизации. Последний способ подразумевает, что в сети должен присутствовать источник высших гармоник тока, обеспечивающий достаточное воздействие для возникновения падения напряжения на соответствующих частотах вплоть до 100-й (200-й) гармоники. Этим источником высших гармоник может являться сам ПЧ-АВ с изменёнными настройками ШИМ для увеличения потребления высших гармоник тока [7]. Данная статья посвящена описанию разработанного усовершенствованного способа диагностики резонансных явлений за счёт тестовых воздействий ПЧ-АВ на внутризаводскую сеть 6-35 кВ и анализу его эффективности на действующем оборудовании с ПЧ-АВ и на имитационной модели.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для сбора исходных данных был проведён ряд исследований, направленных на определение качества электроэнергии во внутризаводских сетях 6-35 кВ нескольких промышленных предприятий. В частности, данные исследования были проведены на следующих металлургических предприятиях: Череповецкий металлургический комбинат ЧерМК ПАО «Северсталь» (г. Череповец) и на металлургическом предприятии ЗАО «ММК Metalurji» (группа ПАО «ММК»), г. Дёртйол, Турецкая республика.

Исследования качества напряжения на ЧерМК проводились с помощью измерительного комплекса на основе регистраторов электрических сигналов РЭС-3 (частота дискретизации сигналов 10 кГц), National Instruments (до 100 кГц), а также с помощью анализатора показателей качества электрической энергии ELSPEC G4420 (512 измерений/цикл). Фотографии измерительного комплекса представлены на **рис. 1**.

Аналогичные исследования проводились на предприятии ММК Metalurji. При исследованиях использовались: анализатор качества напряжения Fluke 435 с токовыми клещами Fluke i5s (частота дискретизации до 5 кГц); анализатор качества электроэнергии ELSPEC G4430 (частота дискретизации для каждого канала: напряжение – 50 кГц, ток – 25 кГц); сервер

быстрых архивов ИВА (с периодом дискретизации меньше 10 мс). Фотографии измерительного комплекса представлены на **рис. 2**.

В результате данных исследований были получены осциллограммы действующего значения напряжений и токов в различных точках внутризаводских распределительных сетей 6-35 кВ. Однолинейные схемы систем электроснабжения ЧерМК и ММК Metalurji представлены соответственно на **рис. 3** и **4**. Во всех случаях было зафиксировано существенное ухудшение качества напряжения при работе электроприводов с ПЧ-АВ прокатных станов.



Рис. 1. Фотографии измерительного комплекса, применяемого при исследованиях на действующем оборудовании ЧерМК



Рис. 2. Фотографии измерительного комплекса, применяемого при исследованиях на действующем оборудовании ММК Metalurji

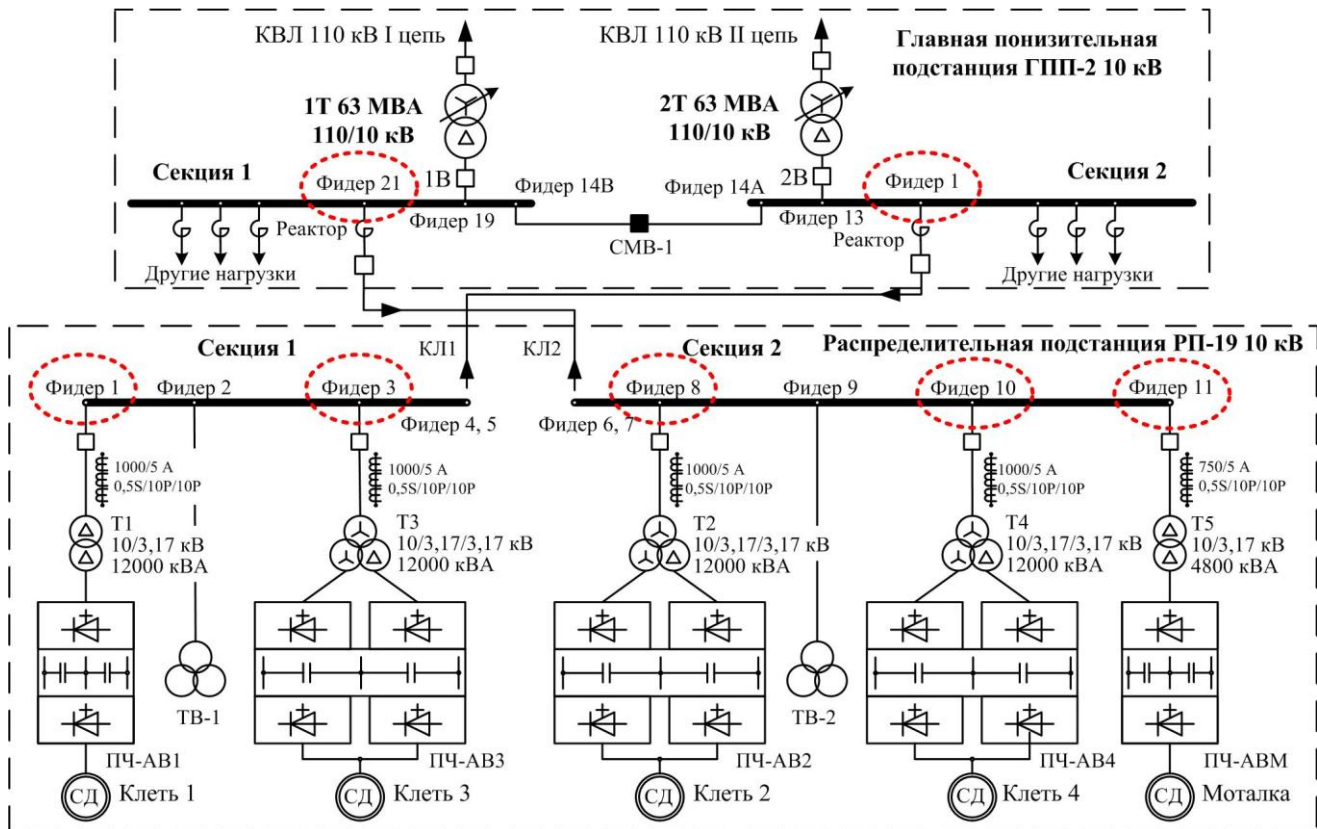


Рис. 3. Однолинейная схема системы электроснабжения 10 кВ прокатного стана ЧерМК и схема электроприводов на базе ПЧ-АВ ASC6000 фирмы АВВ

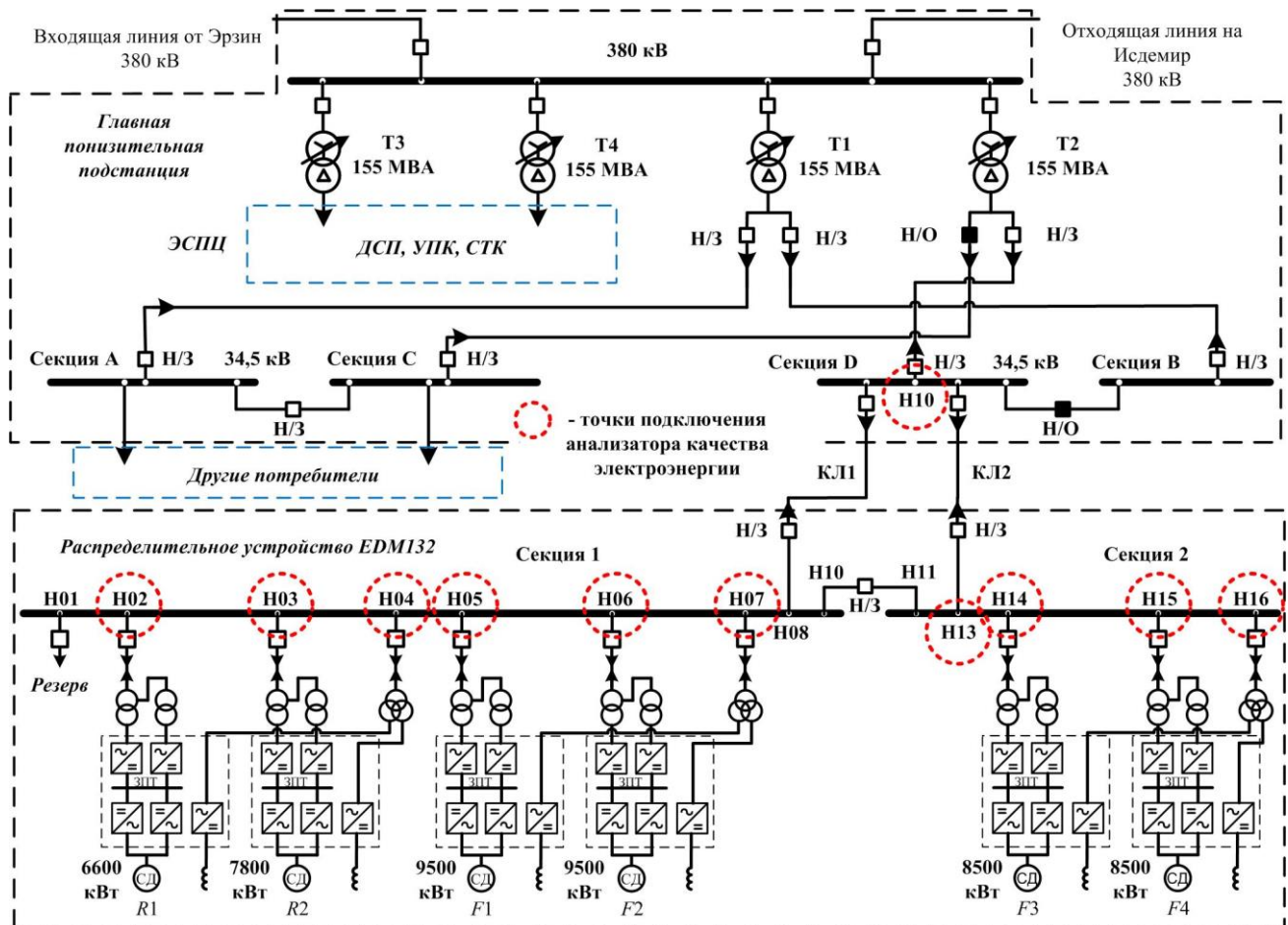


Рис. 4. Однолинейная схема системы электроснабжения 34,5 кВ прокатных станом MMK Metalurji и схема электроприводов на базе ПЧ-АВ ASC6000 фирмы АВВ

Проблемы с качеством напряжения на ЧерМК наблюдались после реконструкции комплекса холодной прокатки и замены главных приводов прокатного стана с двигателями постоянного тока и тиристорными преобразователями на синхронные двигатели и ПЧ-АВ серии ASC6000 фирмы ABB.

Особенностью системы электроснабжения ЧерМК является наличие протяженных кабельных линий, суммарная длина которых превышает 90 км, а также наличие во всех ячейках ГПП токоограничивающих реакторов для снижения величины токов короткого замыкания. Данные особенности обуславливают сложную форму частотной характеристики сети в районе ГПП, поскольку каждая ячейка ГПП образует собственный контур с параллельным резонансом (рис. 5, б) $Z_{ГПП}$. Частотная характеристика на рис. 5 получена расчетным путём с помощью имитационного моделирования системы электроснабжения района ГПП ЧерМК.

При работе ПЧ-АВ стана ЧерМК наблюдались сильные искажения напряжения 10 кВ в точке общего подключения электроприёмников, вызванные наложением высших гармоник ПЧ-АВ на резонансную область частотной характеристики сети. K_U на секциях распределительного устройства РУ 10 кВ ГПП при этом в зависимости от режима электроснабжения и режима работы ПЧ-АВ находился в диапазоне 5,13-7,14 % (см. рис. 5).

На секциях распределительной подстанции РП, от которой непосредственно запитаны главные электроприводы с ПЧ-АВ, наблюдались ещё большие искажения ($K_U = 17,01$ -27,05%). Следует отметить, что ПЧ-АВ здесь являются единственными электроприёмниками и данные искажения не оказывали негативного влияния на их работу [8].

Аналогичные исследования, проведённые на ММК Metalurji, показали, что при запуске стана горячей прокатки 1750 и реверсивного стана холодной прокатки 1750 обнаружилась невозможность работы в штатном режиме электроснабжения, когда электроприводы двух станков и второстепенные электроприёмники запитаны от одного понизительного трансформатора 380/34,5 кВ, поскольку низкое качество напряжения в точке общего подключения потребителей электроэнергии приводило к аварийной работе чувствительных электроприёмников. Осциллограмма и спектральный анализ напряжения 34,5 кВ представлен на рис. 6.

По этой причине главные электроприводы стана горячей прокатки были переведены на питание от резервного трансформатора с отдельной секции главной понизительной подстанции (ГПП) 51EDM (см. рис. 4).

Создание «грязной» секции позволило устранить проблемы с работой чувствительных электроприёмников, однако проект системы электроснабжения завода предусматривал наличие одного трансформатора в качестве горячего резерва, благодаря чему осуществлялась возможность проведения ремонтных мероприятий и обслуживания трансформаторов. В связи с этим необходима реализация иного способа обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с внутривозвратной системой электроснабжения [9]. Последующий анализ показал, что столь сильные искажения напряжения при штатном включении РУ EDM132 объясняются наличием в сети 34,5 кВ резонансных явлений (см. рис. 5, б), возникающих по описанному ранее механизму.

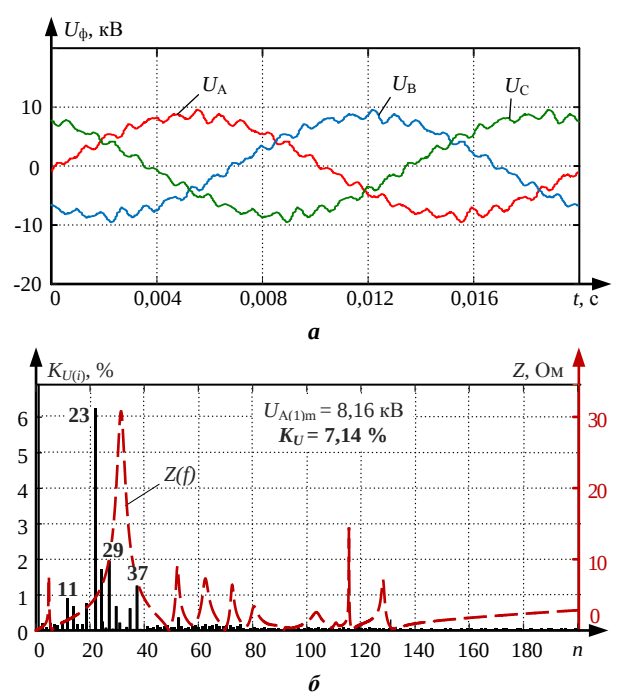


Рис. 5. Мгновенные значения напряжения 10 кВ (а), частотные характеристики и гармонический состав напряжения (б) на шинах РУ-10 кВ ГПП ЧерМК

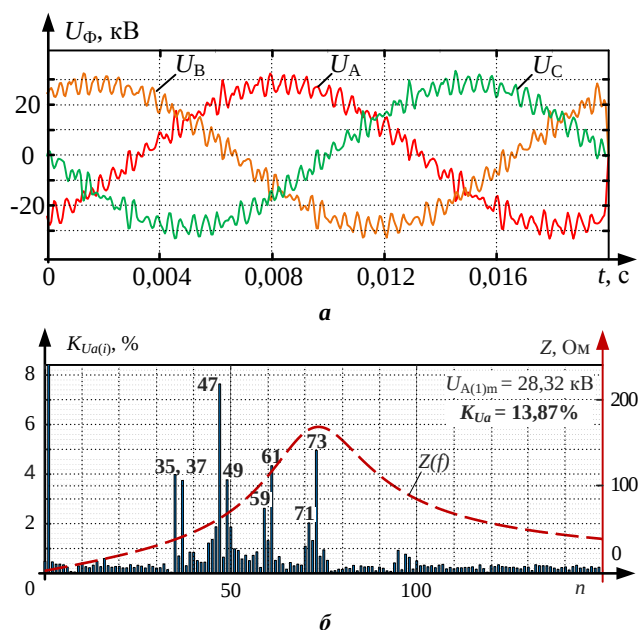


Рис. 6. Мгновенные значения напряжения 34,5 кВ (а), частотные характеристики и гармонический состав напряжения (б) на шинах РУ-10 кВ ГПП 51EDM ММК Metalurji

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СПОСОБА ДИАГНОСТИКИ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Для проведения дальнейших исследований на основании известных способов имитационного моделирования электрических сетей, электроприводов с ПЧ-АВ и собранных данных об элементах системы электроснабжения исследуемых предприятий были разработаны комплексные имитационные модели системы «сеть – ПЧ-АВ» для исследуемых предприятий [10-14].

Разработка имитационных моделей осуществлялась с помощью программы MATLAB с приложением Simulink.

Разработанные модели системы «сеть – ПЧ-АВ» для ЧерМК и ММК Metalurji структурно схожи. В качестве примера на **рис. 7** показана разработанная имитационная модель системы электроснабжения и стана горячей прокатки ММК Metalurji.

Модель учитывает: параметры кабельных линий, моделируемых с помощью одинарных ПИ-секций; сетевого трансформатора 380/34,5 кВ; согласующих трансформаторов 34,5/3,16 кВ; параметры алгоритмов ШИМ, реализованных в электроприводах с ПЧ-АВ прокатного стана.

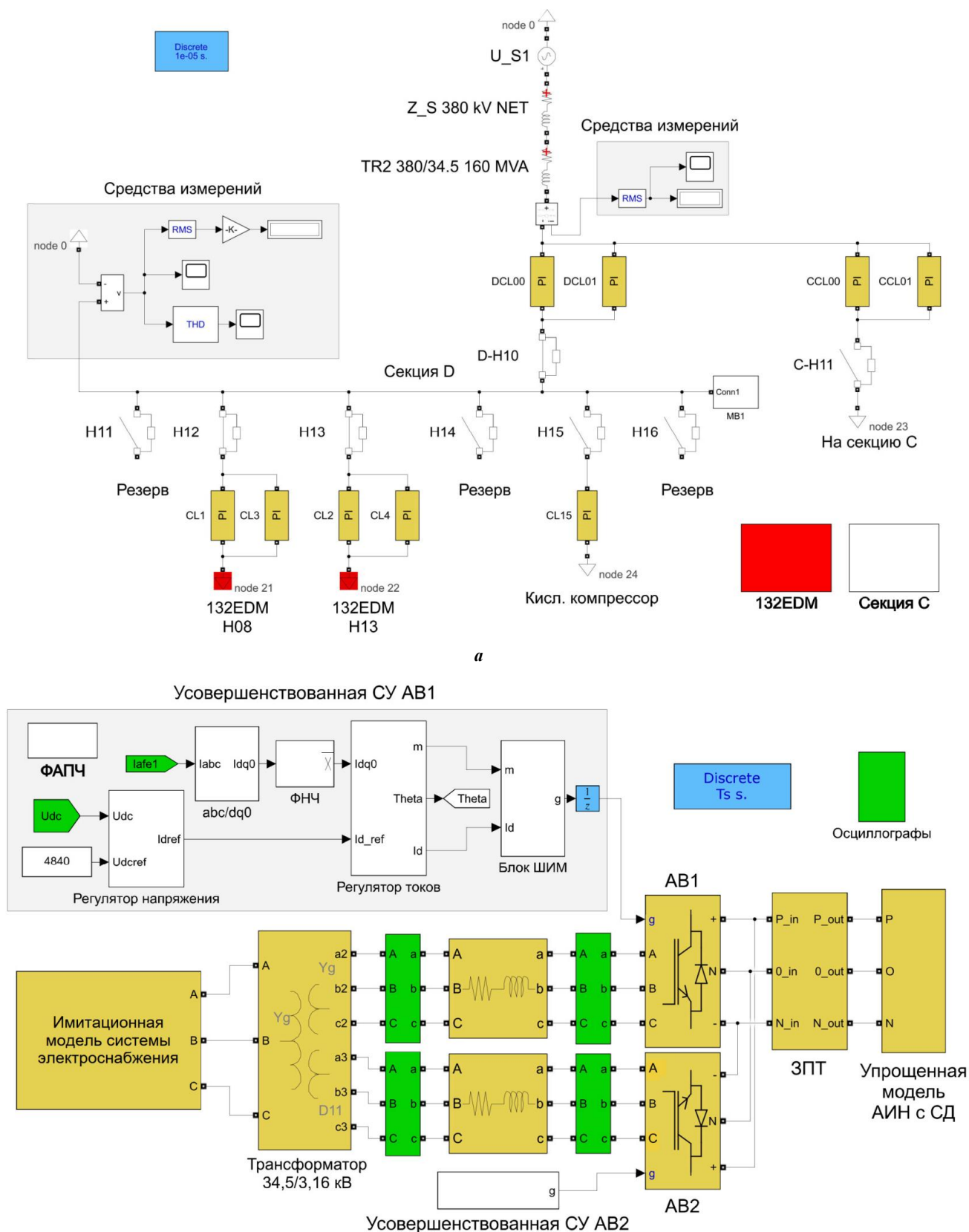


Рис. 7. Общий вид имитационной модели системы электроснабжения ММК Metalurji (а) и имитационная модель ПЧ-АВ, интегрированная в комплексную модель «сеть – ПЧ-АВ» (б)

Разработанные модели позволяют определить частотную характеристику исследуемых систем электропитания. Проверка адекватности разработанных моделей проведена сравнением осциллограмм напряжений и токов, полученных экспериментально и с помощью имитационного моделирования [15-17].

Дальнейшие исследования заключались в сравнении частотных характеристик сетей 6-35 кВ, полученных экспериментально и с помощью моделирования.

Для экспериментального определения частотной характеристики необходим спектральный анализ напряжений и токов в исследуемой сети 6-35 кВ. Причём чем выше уровень отдельных гармонических составляющих, тем выше точность построения частотной характеристики. ПЧ-АВ сами по себе генерируют в сеть высшие гармоники, однако уровень отдельных гармоник из-за особенностей алгоритма ШИМ АВ или часто применяемой многопульсной схемы выпрямления может быть недостаточным для точного определения импеданса на определённой частоте. ПЧ-АВ генерирует в сеть спектр гармоник, определяемых по формуле $PN \pm 1$, где P – число пульсаций силовой схемы ПЧ-АВ, N – натуральное целое число.

В ранних работах предлагалось для диагностики резонансных явлений использовать специальные ШИМ, работающие в несимметричном режиме с частотой коммутации 50 Гц (1 переключение за четверть периода питающего напряжения), благодаря которым в сеть с ПЧ-АВ генерируется весь спектр нечётных гармоник [18-20]. Однако при дальнейших исследованиях было установлено, что на большинстве ПЧ-АВ, в частности ACS6000, контроллер ШИМ затрудняет реализацию несимметричного ШИМ из-за закрытого программного кода ШИМ-контроллеров серийных ПЧ-АВ. Более того, настройки ШИМ не позволяют уменьшить частоту коммутации ниже 150 Гц (3 переключения за четверть периода питающего напряжения).

В дальнейшем для диагностики резонансных явлений было предложено использовать в качестве тестового воздействия ток ПЧ-АВ, настроенного на ШИМ с частотой 150 Гц (3 переключения за четверть периода питающего напряжения), поскольку данный способ проще реализовать на действующем оборудовании и он не является аварийным при незначительном времени работы, достаточным для получения осциллограмм токов и напряжений за цикл работы электропривода с ПЧ-АВ. Также было отмечено, что гармонический состав тока ПЧ-АВ зависит от режима работы электропривода. В качестве примера представлены осциллограммы токов электропривода с ПЧ-АВ, с ШИМ, настроенным на удаление выделенных гармоник УВГ частотой 150 Гц, в режиме холостого хода и при номинальной нагрузке (рис. 8). Поэтому для построения экспериментальной частотной характеристики были использованы действующие значения высших гармонических составляющих тока и напряжения, усреднённые за цикл работы ПЧ-АВ, что позволило получить экспериментальные частотные характеристики, близкие к расчётным (рис. 9, 10).

На рис. 9 отображены частотные характеристики сети 10 кВ относительно секций 1 и 2 ГПП ЧерМК при их параллельной работе от одного трансформатора 110/10 кВ, полученные двумя способами:

1) путём деления значений высших гармонических составляющих записанного при проведении экспериментальных исследований напряжения $K_{U(n)}$ на высшие составляющие тока $K_{I(n)}$ с аналогичными номерами;

2) с использованием инструмента «Impedance Measurement» на комплексной имитационной модели в среде Matlab-Simulink.

Оценка адекватности предложенного способа диагностики резонансных явлений во внутривзаводских сетях 6-35 кВ производилась с помощью сравнения абсолютных $\Delta Z_{\text{рез.}}$ и относительных $\delta Z_{\text{рез.}}$ разностей экстремума импеданса, абсолютных $\Delta f_{\text{рез.}}$ и относительных $\delta f_{\text{рез.}}$ разностей частот пика резонанса для двух характеристик $Z(f)$. Величина $\delta Z_{\text{рез.}}$ составила 4,89%, что является достаточно точным, учитывая, что основной резонанс представлен в относительно узком диапазоне частот $f_{\text{рез.}} = 1250\text{--}1850$ Гц.

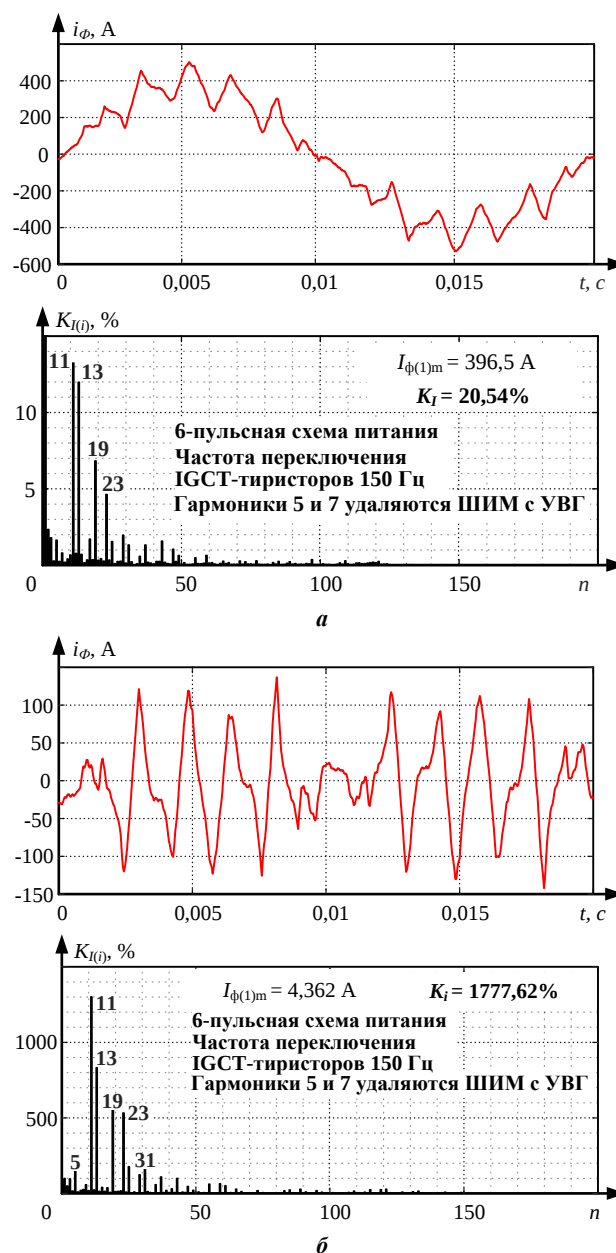


Рис. 8. Мгновенные значения и спектральный анализ тока на входе согласующего трансформатора ПЧ-АВ с частотой коммутации 150 Гц при работе: при номинальной нагрузке (а) и на холостом ходу (б)

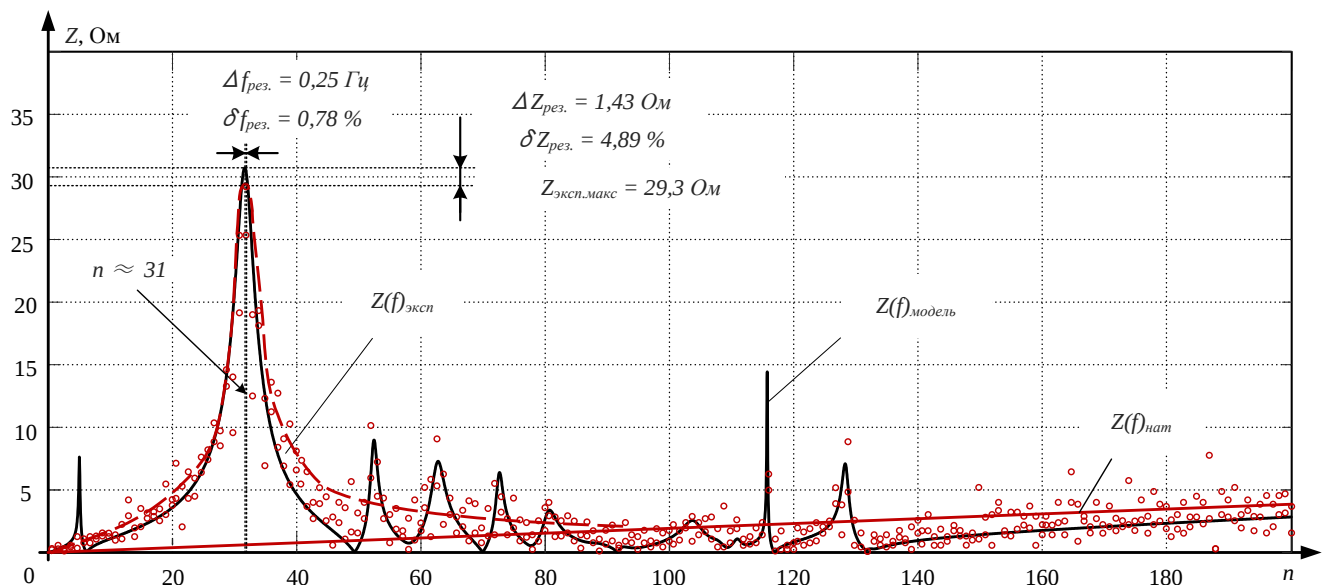


Рис. 9. Сравнение частотных характеристик секций 1 и 2 ЗРУ-10 кВ ГПП-2 при их параллельной работе, полученных на имитационной модели и расчётным путём по экспериментальным данным

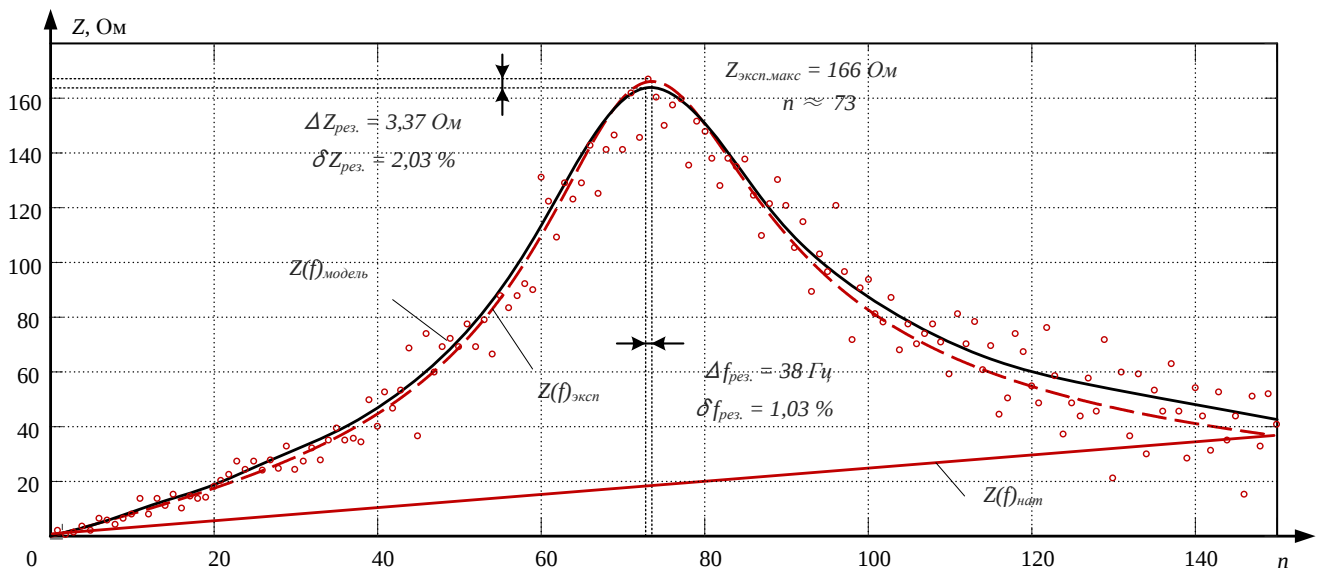


Рис. 10. Сравнение частотных характеристики внутризаводской сети MMK Metalurji относительно секции D ЗРУ-34,5 кВ 51EDM, полученных на имитационной модели и расчётным путём по экспериментальным данным

Несмотря на это, характеристика $Z(f)$, полученная при моделировании, показывает хорошую сходимость с расчётной в области основного резонанса, $\delta f_{\text{рез.}} = 0,78\%$. Локальные резонансы определяются менее чётко, поскольку они представлены в ещё более узком диапазоне частот (150–500 Гц).

Аналогичным образом проведено сравнение частотных характеристик сети относительно шин секции D 51EDM, полученных на основе экспериментальных данных и с использованием имитационной модели системы электроснабжения MMK Metalurji (рис. 10). Оценка адекватности полученных результатов производилась путём определения абсолютных $\Delta Z_{\text{рез.}}$ и относительных $\delta Z_{\text{рез.}}$ разностей экстремума импеданса для двух характеристик $Z(f)$. Кроме того, были получены значения абсолютных $\Delta f_{\text{рез.}}$ и относительных $\delta f_{\text{рез.}}$ разностей частоты пика резонанса. Учитывая, что $\delta Z_{\text{рез.}} = 2,03\%$ и $\delta f_{\text{рез.}} = 1,03\%$, можно отметить их высокую сходимость полученной на имитационной модели частотной характеристики с экспериментальной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведён анализ результатов экспериментальных исследований качества напряжения во внутризаводских электрических сетях 6–35 кВ при работе ПЧ-АВ в составе электроприводов большой мощности. Установлена причина данных искажений, заключающаяся в совокупности нескольких факторов: наличие резонансных явлений во внутризаводской распределительной сети 6–35 кВ, вызванных взаимодействием реактивных элементов системы электроснабжения (кабельных линий, трансформаторов, реакторов); наличие в токе, потребляемом ПЧ-АВ, высших гармонических составляющих, совпадающих по частоте с высокоомной областью в окрестностях сетевого резонанса. Для определения оптимального способа обеспечения заданного качества электроэнергии в сетях с ПЧ-АВ необходима диагностика резонансных явлений в области генерирования гармоник ПЧ-АВ.

2. Разработаны имитационные модели, позволяющие расчётным путём получить частотную характеристику

исследуемых систем электроснабжения 6-35 кВ. Данные модели учитывают параметры реактивных элементов системы электроснабжения и интегрированы с имитационными моделями ПЧ-АВ, учитывающими реальные параметры алгоритмов ШИМ ПЧ-АВ. Помимо оценки предложенного экспериментального способа диагностики резонансных явлений, данные модели необходимы для дальнейших исследований способов обеспечения заданного качества электроэнергии в сетях с мощными ПЧ-АВ.

3. Предложен усовершенствованный способ диагностики резонансных явлений, заключающийся в спектральном анализе токов и напряжений во внутризаводской сети 6-35 кВ, записанных при работе ПЧ-АВ в режиме тестовых воздействий с помощью регистратора электрических сигналов с высокой частотой дискретизации. Режим тестовых воздействий отличается от штатного пониженной частотой переключения (150 Гц) силовых вентилях ПЧ-АВ, вследствие чего в сети возникает повышенное искажение напряжений и токов, что позволяет в дальнейшем с достаточной точностью построить частотную характеристику внутризаводской сети 6-35 кВ. Тестовый режим должен быть активен на время, необходимое для изменения тока, потребляемого ПЧ-АВ из сети, с величины холостого хода до номинального. Затем из полученных усреднённых значений гармоник высокого порядка напряжения и тока получают точки, аппроксимация которых позволяет построить экспериментально полученную частотную характеристику сети. Сравнение экспериментальной и расчетной частотных характеристик показало их высокую сходимость, относительные разности в определении частоты основного резонанса не превышают 1,03 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №22-19-20069).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Возможности компенсации реактивной мощности в сети посредством высокоомощного рекуперативного электропривода переменного тока / А.С. Маклаков, А.А. Николаев, С.А. Линьков, Т.А. Лисовская // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. №3-4(18). С. 65-74.
2. Reactive power compensation in industrial grid via highpower adjustable speed drives with medium voltage 3L-NPC BTB converters / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.S. Maklakov, E.A. Maklakova // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2017. № 8(4). Pp. 1455-1466. doi: 10.11591/ijpeds.v8.i4.pp1455-1466
3. Network-friendly low-switching-frequency multipulse high-power three-level PWM rectifier / Pontt J.A., Rodríguez J.R., Liendo A., Newman P., Holtz J., San Martín J.M. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009. Vol. 56. No. 4(56). Pp. 1254-1262. doi: 10.1109/TIE.2008.2007998
4. Николаев А.А., Храмышин Т.Р., Афанасьев М.Ю. Исследование резонансных явлений в распределительных электрических сетях среднего напряжения систем внутризаводского электроснабжения промышленных предприятий // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2017. № 4(5). С. 51-62.
5. Resonances in a high-power active-front-end rectifier system / J. Pontt, G. Alzamora, R. Huerta, N. Becker // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2005. No. 2(52). Pp. 482-488. doi: 10.1109/TIE.2005.843907
6. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения прокатных станов с использованием преобразователей частоты с активными выпрямителями за счет применения специализированных пассивных фильтров / А.А. Николаев, М.Ю. Афанасьев, И.Г. Гилемов, М.В. Буланов // Вестник ИГЭУ. 2023. № 1. С. 41-52. doi: 10.17588/2072-2672.2023.1.041-052
7. Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электроприводов четырехклетьевого стана ППП ХП ЧерМК ПАО «Северсталь» с питающей сетью 10 кВ / А.А. Николаев, И.Г. Гилемов, М.В. Буланов, М.Ю. Афанасьев, К.А. Шахбиева, В.А. Лаптова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2021. Т. 12, № 1. С. 65-74.
8. Николаев А.А., Гилемов И.Г., Буланов М.В. Оценка влияния режимов работы электроприводов прокатного стана с ПЧ-АВ на качество напряжения питающей сети 10 кВ // Вестник ИГЭУ. 2021. № 5. С. 41-50.
9. Current electromagnetic compatibility problems of high-power industrial electric drives with active front-end rectifiers connected to a 6–35 kV power grid: a comprehensive overview / A. Nikolaev, A. Maklakov, M. Bulanov, I. Gilemov, A. Denisevich, M. Afanasev // Energies. 2023. No. 16(1). P. 293. doi: /10.3390/en16010293
10. Nikolaev A.A., Gilemov I.G. The dynamic operation investigation of an active rectifier control system with IGCT-thyristor switching angle table selection function // Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2022. Pp. 492-497. doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787162
11. Маклаков А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клети толстолистового стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. № 3. С. 16-25.
12. O'Brien K., Teichmann R., Bernet S. Active rectifier for medium voltage drive systems // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 2001. Pp. 557-562. doi: 10.1109/APEC.2001.911701
13. Retrofit of a hot rolling mill plant with three-level active front end drives / G.A. Orcajo, J.D. Rodriguez, J.M. Cano, J.G. Norriella, P.G. Ardura, R.T. Llera, D.R. Cifrian // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. No. 54(3). Pp. 2964-2974. doi: 10.1109/TIA.2018.2808159
14. Design and analysis of electrical drives using active front end converter / K.B. Chimonyo, K.S. Kumar, B.K. Kumar, K. Ravi // Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT). IEEE, 2018. Pp. 115-119. doi: 10.1109/ICICCT.2018.8473042
15. Разработка усовершенствованного алгоритма ШИМ активного выпрямителя с адаптацией к резонансным явлениям во внутризаводской сети / Николаев А.А., Буланов М.В., Афанасьев М.Ю., Денисевич А.С. // Вестник ИГЭУ. 2018. № 6. С. 47-56.
16. Dell'Aquila A., Liserre M., Monopoli V.G. Active front end adjustable speed drives under grid voltage sags: effects and dynamical performance evaluation // European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2005. Pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2005.219589
17. Karshenas H.R., Kojori H.A., Dewan S.B. Generalized techniques of selective harmonic elimination and current control in current source inverters/converters // IEEE Transactions on Power Electronics. 1995. No. 5(10). Pp. 566-573. doi: 10.1109/63.406844
18. Turnbull F.G. Selected harmonic reduction in static DC-AC inverters // IEEE Trans. Commun. Electron. 1964. No. 73(83). Pp. 374-378. doi: 10.1109/TCOME.1964.6541241
19. Jing T., Maklakov A., Radionov A. Two selective harmonic control techniques applied in 10 kV grid with three-level NPC inverter // IEEE Russian Workshop on Power Engi-

neering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). IEEE, 2019. Pp. 75-79. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915413

20. Research on hybrid SHEPWM based on different switching

Поступила в редакцию 25 июля 2023 г.

patterns / T. Jing, A. Maklakov, A. Radionov, S. Baskov, A. Kulmukhametova // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2019. No. 10(4). Pp. 1875-1884. doi: 10.11591/ijpeds.v10.i4.pp1875-1884.

Принята к печати 29 августа 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVED METHOD FOR DIAGNOSTICS OF RESONANCE PHENOMENA IN 6-35 kV INTERNAL NETWORK DUE TO TEST IMPACTS OF ACTIVE RECTIFIERS

Alexander A. Nikolaev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, aa.nikolaev@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5014-4852>

Mikhail V. Bulanov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, bulanovv.m.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9051-1012>

Vladimir S. Ivekeev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, vivekeev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0730-8257>

Platon G. Tulupov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, tulupov.pg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3058-2406>

Many large industrial enterprises, in particular in metallurgy, currently use high-power AC electric drives based on frequency converters with active rectifiers. These converters, as a rule, have an input voltage from 3.15 to 3.5 kV and are connected to the internal distribution network of 6-35 kV using matching transformers. With a large length of cable lines in a network of 6 - 35 kV, conditions may arise for the development of current resonance in the frequency range coinciding with high-frequency harmonics generated by frequency converters with active rectifiers. At the same time, dangerous voltage distortions can occur in the 6-35 kV network, leading to an emergency shutdown or failure of equipment sensitive to power quality. To determine the best way to eliminate these distortions, it is necessary to know the shape of the frequency response of the in-house power supply system. The purpose of these studies is to develop an improved method for diagnosing resonant phenomena in the intra-factory network 6-35 kV due to test effects from active rectifiers. The studies were carried out using a simulation model of the "network - frequency converter with an active rectifier" system, as well as on the basis of the results of experimental studies on the operating electrical equipment of metallurgical enterprises.

Keywords: internal power supply network, power system, power quality, frequency converter, active front end, pulse width modulation, electromagnetic compatibility, current resonance, frequency characteristic

REFERENCES

1. Maklakov A. S., Nikolaev A. A., Linkov S. A., Liosovskaya T.A. Reactive Power Compensation Using a High-Power Regenerative AC Drive]. *Elektrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy* [Electrical and data processing facilities and systems], 2022. vol. 18, no. 3-4, pp. 65-74. (In Russian)
2. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Maklakov A.S., Maklakova E.A. Reactive power compensation in industrial grid via high power adjustable speed drives with medium voltage 3L-NPC BTB converters. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2017, no. 8(4), pp.1455-1466. doi: 10.11591/ijpeds.v8.i4.pp1455-1466
3. Pontt J.A., Rodriguez J.R., Liendo A., Newman P., Holtz J., San Martin J.M. Network-Friendly Low-Switching-Frequency Multipulse High-Power Three-Level PWM Rectifier. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009, vol. 56, no. 4(56), pp. 1254-1262. doi: 10.1109/TIE.2008.2007998
4. Nikolayev A.A., Khramshin T.R., Afanasyev M.Yu. Study of Resonant Phenomena in Medium Voltage Distribution Networks of Industrial Power Supply Systems]. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2017, no. 4, pp. 51-62. (In Russian)
5. Pontt J., Alzamora G., Huerta R., Becker N. Resonances in a High-Power Active-Front-End Rectifier System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2005, no. 2(52), pp. 482-488. doi: 10.1109/TIE.2005.843907
6. Nikolaev A.A., Afanasyev M.Yu., Gilemov I.G., Bulanov M.V. Improvement of power quality in power supply systems of rolling mills using frequency converters with active rectifiers due to use of specialized passive filters. *Vestnik IGEU* [Bulletin ISPEU], 2023, no. 1, pp. 41-52. (In Russian)
7. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Bulanov M.V., Afanasyev M.Yu., Shakhbieva K.A., Laptova V.A. Protection of the electromagnetic coating of electric drives of the four-stand mill PPP KHP ChermK PJSC "Severstal" with a 10 kV supply network. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Contemporary Problems of Modern Science, Engineering and Education], 2021, vol. 12, no. 1, pp. 65-74. (In Russian)
8. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Bulanov M.V. Assessment of influence of rolling mill FC-AR electric drive operation mode on 10 kV supply network voltage quality. *Vestnik IGEU* [Bulletin ISPEU], 2021, no. 5, pp. 41-50. (In Russian)
9. Nikolaev A., Maklakov A., Bulanov M., Gilemov I., Denisevich A., Afanasev M. Current electromagnetic compatibility problems of high-power industrial electric drives with active

- front-end rectifiers connected to a 6–35 kV power grid: a comprehensive overview. *Energies*. 2023, no. 16(1), p. 293. doi: /10.3390/en16010293
10. Nikolaev, A.A., Gilemov, I.G. The Dynamic Operation Investigation of an Active Rectifier Control System with IGCT-Thyristor Switching Angle Table Selection Function. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. IEEE, 2022, pp. 492-497. doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787162
 11. Maklakov A.S. Simulation of the main electric drive of the plate mill rolling stand. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, no. 3, pp. 16-25. (In Russian)
 12. O'Brien K., Teichmann R., Bernet S. Active rectifier for medium voltage drive systems. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. IEEE, 2001, pp. 557-562. doi: 10.1109/APEC.2001.911701
 13. Orcajo G.A., Rodriguez J.D., Cano J.M., Norniella J.G., Ardura P.G., Llera R.T., Cifrian D.R. Retrofit of a hot rolling mill plant with threelevel active front end drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018, no. 54(3), pp. 2964-2974. doi: 10.1109/TIA.2018.2808159
 14. Chimonyo K.B., Kumar K.S., Kumar B.K., Ravi K. Design and Analysis of Electrical Drives Using Active Front End Converter. *Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)*. IEEE, 2018, pp. 115-119. doi: 10.1109/ICICCT.2018.8473042
 15. Nikolayev A.A., Bulanov M.V., Afanasyev M.YU., Denisevich A.S. Development of an advanced PWM algorithm for active rectifier with adaptation to current resonances in internal power supply system. *Vestnik IGEU* [Bulletin ISPEU], 2018, no. 6, pp. 47-56. (In Russian)
 16. Dell'Aquila A., Liserre M., Monopoli V. G. Active front end adjustable speed drives under grid voltage sags: effects and dynamical performance evaluation. *European Conference on Power Electronics and Applications*. IEEE, 2005, pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2005.219589
 17. Karshenas H.R., Kojori H.A., Dewan S.B. Generalized techniques of selective harmonic elimination and current control in current source inverters/converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1995, no. 5(10), pp. 566-573. doi: 10.1109/63.406844
 18. Turnbull F.G. Selected harmonic reduction in static DC-AC inverters. *IEEE Trans. Commun. Electron*. 1964, no. 73(83), pp. 374-378. doi: 10.1109/TCOME.1964.6541241
 19. Jing T., Maklakov A., Radionov A. Two Selective Harmonic Control Techniques Applied in 10kV Grid with Three-Level NPC Inverter. *IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)*. IEEE, 2019, pp. 75-79. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915413
 20. Jing T., Maklakov A., Radionov A., Baskov S., Kulmukhametova A. Research on hybrid SHEPWM based on different switching patterns. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2019, no. 10(4), pp. 1875-1884. doi: 10.11591/ijpeds.v10.i4.pp1875-1884

Усовершенствованный способ диагностики резонансных явлений во внутризаводской сети 6-35 кВ за счет тестовых воздействий активных выпрямителей / Николаев А.А., Буланов М.В., Ивекеев В.С., Тулупов П.Г. // *Электротехнические системы и комплексы*. 2023. № 3(60). С. 42-451. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-42-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-42-51)

Nikolaev A.A., Bulanov M.V., Ivekeev V.S., Tulupov P.G. Improved Method for Diagnostics of Resonance Phenomena in 6-35 kV Internal Network due to Test Impacts of Active Rectifiers. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 3(60), pp. 42-51. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-42-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-42-51)

Андреев С.М., Нужин Д.В., Бондарева А.Р.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ПРОГНОЗИРУЮЩАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДЛИНЕ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ С УЧЕТОМ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ЗОН

При оптимальном управлении нагревом заготовок в проходных нагревательных печах прокатных станов переменная производительность стана в совокупности с инерционными свойствами зон нагрева является фактором, сильно затрудняющим реализацию оптимальных режимов. Подсистема прогнозирования температурного состояния печи в зависимости от текущей производительности стана и учитывающая перенос тепла между зонами нагрева позволит повысить эффективность работы системы оптимального управления в переходных режимах работы печи. В работе приведены результаты анализа работ по разработке математических моделей внешнего теплообмена в проходных нагревательных печах прокатных станов. Определены два основных направления исследования математических моделей внешнего теплообмена. К первой группе исследований относится разработка моделей теплообмена, в которых процесс передачи тепла описывается системой аналитических или численных уравнений, базирующихся на физических законах теплопередачи с учетом гидродинамики движения дымовых газов. Ко второй группе исследований относится разработка эмпирических математических моделей на основе параметров наблюдаемого процесса, описывающих взаимосвязь между этими параметрами. Выполнены исследования по разработке эмпирической математической модели проходной нагревательной печи с учетом динамических характеристик процесса. В результате исследований получена математическая модель, которая определяет связь между расходами топлива, распределяемого по зонам печи и температурой рабочего пространства в этих зонах. Математическая модель учитывает взаимовлияние соседних зон, производительность печи по нагреву заготовок, а также динамические характеристики зон. В качестве исходных данных для нахождения коэффициентов уравнений были приняты статистические данные работы нагревательной печи широкополосного стана горячей прокатки. Коэффициенты уравнений математической модели определялись поисковым методом, используя метод деформируемого многогранника.

Ключевые слова: нагревательная печь, обработка металла давлением, эмпирическая модель, метод деформируемого многогранника, метод Нелдера-Мида, нагрев заготовок перед прокаткой

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время металлургия России является одним из крупнейших потребителей электроэнергии и топлива. Доля затрат топливно-энергетических ресурсов в общих заводских затратах на производство продукции составляет более 30 % [1]. Наиболее крупными потребителями природного топлива в металлургии являются доменные и прокатные производства. Доля потребления энергии для этих производств составляет до 67 % от общего объема энергии [2], затрачиваемого на производство металлургической продукции. Поэтому, учитывая масштаб потребления топлива для нагрева металла в проходных нагревательных печах прокатных станов, даже незначительное сокращение топливных затрат в процентном соотношении продолжает оставаться одной из актуальных задач повышения эффективности металлургического производства.

Основным мероприятием по снижению топливных затрат, не затрагивающих конструктивные особенности проходных нагревательных печей, является использование автоматизированных систем. Автоматизация теплового режима работы печи позволяет сократить удельный расход топлива до 15 % [3].

Математическая модель нагрева заготовок перед прокаткой является основным инструментом для проведения исследований при выполнении задачи нахождения оптимальных режимов работы нагревательной печи с учетом крайне неравномерной работы прокатного стана и действий случайных возмущений на процесс нагрева.

Математическая модель распределения температуры по зонам нагревательной печи позволяет реализовывать оптимальные режимы нагрева заготовок в переходных режимах, вызванных изменением производительности прокатного стана и, соответственно, ско-

ростью движения заготовок и временем их нагрева с учетом инерционных свойств печи. В этом случае математическая модель выступает в качестве блока прогнозирования температуры по зонам нагревательной печи при выбранном распределении расходов топлива с учетом текущей производительности стана.

Математической моделью нагрева заготовок перед прокаткой и дальнейшая ее адаптация к реальному объекту является достаточно серьезной проблемой, решение различных аспектов которой проводилось многими авторами. Анализ работ [4-21] показал, что используются различные подходы к разработке таких моделей. Авторы для изучения процесса нагрева разрабатывают как полностью сопряженные модели, в которых учитывается связь между внутренним и внешним теплообменом и с учетом перемещения заготовок по длине проходной печи, так и отдельные математические модели, решающие частные задачи. Также важным аспектом исследований является проведение опытных исследований процесса нагрева на реальном объекте.

Большое количество работ по исследованию внешнего теплообмена в нагревательных печах производилось с использованием гидродинамического (CFD) моделирования (Computational Fluid Dynamics modeling). Анализ работ по CFD-моделированию показал, что при моделировании внешнего теплообмена необходимо учитывать множество параметров, таких как конфигурацию рабочего пространства, величину тепловых нагрузок по зонам печи, конструкцию горелочных устройств и элементов дымоотводящих трактов и многое другое. Результаты анализа работ по CFD-моделированию сведены в **табл. 1**, в которой систематизированы работы, выполненные с помощью коммерческих программных продуктов, позволяющих производить CFD-моделирование процесса передачи тепла в печах.

Таблица 1

Обзор результатов работ,
выполненных на базе CFD-моделирования

Ссылка	Внешний теплообмен	Внутренний теплообмен	Горение топлива	Прочие особенности
[4]	$P-1$; $k-\epsilon$	—	—	—
[6]	$k-\epsilon$; RTE (FVM)	2D	PDF	Описание теплообмен подовых труб
[7]	$k-\epsilon$;	—	Выбор EDM, SFM, EDC, FGM	—
[9]	$k-\epsilon$; RTE (DO)	—	SFM	Описание теплообмен подовых труб (UDF)
[8]	$k-\epsilon$; RTE (DO)	—	—	—
[15]	$k-\epsilon$; RTE (DO)	2D 3D	—	PID-регулятор моделирования движения заготовок
[18]	$k-\epsilon$; RTE (DO)	3D	EDM	Описание нагрева воздуха в регенеративных горелках (UDF)

Сопряженные модели теплообмена, которые позволяют определить тепловой поток на поверхность нагреваемой заготовки и распределение температуры по её толщине, рассматривались в работе [5]. В этих работах выполнено исследование теплопередачи лучистым и конвективным теплообменом от рабочего пространства нагревательной печи и нагрева заготовки с использованием модели теплопроводности.

Пояснения к табл. 1:

$k-\epsilon$ – модель турбулентности K -эпсилон ($k-\epsilon$) средних характеристик потока в условиях турбулентного течения;

$P-1$ – диффузионная модель излучения;

RTE (FVM) – уравнение радиационного переноса, решаемое с помощью метода конечных объемов;

RTE (DO) – уравнение радиационного переноса, решаемое с помощью метода дискретных ординат;

PDF – модель реакции горения;

SFM – модель стационарного пламени;

EDM – модель распада вихрей, разработана для описания турбулентных пламен предварительно перемешанных смесей и диффузионных пламен;

EDC – модель концепции вихревого рассеяния;

UDF – пользовательская функция, позволяющая вводить дополнительные зависимости с помощью программирования;

«—» – в работе отсутствует метод описания.

Теплопередача внутри стального сляба определялась из переходного двумерного уравнения теплопроводности. Внешний теплообмен описан уравнением RTE, показывающим интенсивность излучения в любом положении вдоль траектории полусферы через поглощающую, излучающую и рассеивающую среду и

решаемым с помощью метода конечных объемов FVM.

В работе [10] решается задача управления температурой заготовки на выходе из нагревательной печи, причем тепловое состояние заготовки было представлено с помощью ряда Тейлора. В работе [11] помимо моделирования внешнего и внутреннего теплообмена также предложена модель перемещения заготовок внутри рабочего пространства нагревательной печи. Предложены несколько видов моделей движения заготовок в печи и разного представления заготовок. В первом случае заготовки представлены одной высоколаминарной жидкостью, перемещающейся вдоль печи, для второго случая рассматривается перемещение одной заготовки вдоль печи, третий вариант не отражает прямое перемещение заготовок при моделировании, но с помощью UDF прямое перемещение заготовки заменяется потоком энергии. Учитывая расстояние между заготовками, в нагревательную печь помещают несколько заготовок, и с помощью UDF энергия, поглощенная заготовкой, передается следующей заготовке при очередном шаге. С помощью внутренней функции UDF было смоделировано регулирование температуры в 3-х режимах: 2-ступенчатое (on/off), ПИД-регулирование (PID), совместное (on/off&PID).

В работе [12] решается задача нагрева металла с учетом окисления металла атмосферой печи и предложено последовательное использование вычислительного программного комплекса Ansys Multiphysics и математического пакета Mathcad. Сначала с помощью программы MathCad решается задача теплообмена излучением в камере и определяется распределение температуры и расхода топлива по длине печи, потом в Ansys определяется поле температуры в трехмерных заготовках металла.

Для нахождения оптимальных траекторий нагрева в нагревательной печи с шагающим подом в работе [13] была разработана сопряженная модель внутреннего и внешнего теплообмена. Математическая модель внешнего теплообмена основана на зональном методе, включая систему поверхностей «кладка-газ-поверхность заготовки».

Анализ расположения горелок в нагревательной печи был выполнен в работе [14]. В работе был предложен, помимо стандартных пакетов Fluent, инструмент UDF, с помощью которого было смоделировано описание работы рекуперативной горелки. Заготовки в печи были представлены в виде одного высоколаминарного листа, перемещающегося вдоль печи.

В работе [15] была разработана математическая модель расчета нагрева металла в проходных нагревательных и термических печах, использующая противоточную схему теплообмена. Решение представлено в аналитическом виде для детального анализа влияния внешних факторов на процесс нагрева заготовок.

В работе [16] рассмотрен выбор модификации зонального метода. Для зон I рода наиболее эффективен классический метод. Для зон II и III рода предпочтительным является резольвентный зональный метод.

Зависимости «расход топлива» – «температура греющей среды» в работе по нахождению оптимально топливосберегающей траектории [17] определяется линейно через коэффициент, характеризующий значение градусов на единицу поданного топлива в зону.

Упрощенная математическая модель теплопередачи и нагрева заготовки предложена в работе [18]. Для математического описания внешнего и внутреннего теплообмена предложено использовать систему уравнений, представляющих инерционные звенья, описывающие процесс передачи тепла от рабочего пространства к заготовке и её нагрева. В работе [19] для определения необходимого объема топлива для поддержания заданной температуры с учетом внешних потерь автором на основании экспериментальных данных было получено эмпирическое уравнение, описывающее линейную зависимость между расходом топлива и количеством тепла, полученного от её сжигания. Подобные результаты исследований представлены в работах [20, 21], в которых были предложены линейные уравнения, описывающие зависимости температуры греющей среды от расхода топлива на основании опытных данных.

Анализируя вышеописанные работы, следует выделить, что к первому направлению относятся работы, в которых математическая модель разрабатывалась с использованием физических законов, описывающих процессы теплообмена с высокой степенью детализации. Исследования моделей показывают достоверные результаты и высокое соответствие расчетных данных с экспериментальными. К основному недостатку данных моделей относятся большие временные ресурсы для решения полученных систем уравнений, высокие требования к вычислительному оборудованию и привязанность к готовым коммерческим продуктам. К примеру, в работе [5] требуемое вычислительное время составило около 1260 с. Авторами работы [7] было произведено сравнение зонального метода моделирования теплообмена излучением с методом конечных объемов на примере расчета нагрева непрерывной заготовки кольцевой печи. В результате моделирования показано, что при сопоставимой точности обоих способов время моделирования методом *FVM* превышает время выполнения зонального метода в 5–10 раз ввиду долгого расчета интенсивности излучения (50–100 итераций) на одну итерацию гидродинамики и горения.

Ко второму типу математических моделей следует отнести работы, в которых основной упор делается на исследование эмпирических зависимостей между параметрами процесса нагрева. Несмотря на то, что для решения вышеописанных уравнений не требуется существенных временных затрат и данные зависимости можно использовать для моделирования работы в режиме реального времени, в представленных зависимостях не учтены все взаимосвязи между локальным процессами.

Отличительной чертой работы методических печей является противоточное, то есть взаимно противоположное движение нагреваемого металла и продуктов сгорания топлива. Такая схема движения газов и металла позволяет полнее использовать тепло дымовых газов, так как тепло от сгорания газа в горелках перемещается вдоль всей печи, от последней к первым зонам.

Анализируя вышеописанные подходы при разработке математических моделей с учетом конструктивной особенности печи и движения отходящих газов, определено, что для целей оперативного управления наиболее эффективными являются эмпирические ма-

тематические модели с учетом динамики зон нагрева и переноса тепла между зонами. Это позволит использовать данную модель для реализации адаптивной киберфизической системы оптимального управления тепловым режимом нагревательной печи в нестационарных условиях работы.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для решения поставленной задачи о нахождении зависимости распределения температуры греющей среды от поданного топлива с учетом влияния смежных зон друг на друга рассмотрим конструктивные особенности печи. В методических печах осуществляется постепенный методический нагрев заготовок. Вся печь по длине разделяется на 10 отапливаемых зон и две неотапливаемые зоны. В каждую отапливаемую зону тепло поступает от сжигания топлива в горелках, расположенных в своде печи (для верхних зон) и в боковых стенах (для нижних зон). Отходящие газы после горения движутся от последней зоны в сторону загрузочного окна печи, в районе которого находится дымовой тракт для отвода дымовых газов в рекуператор. Дымовые газы движутся противотоком с движущимися заготовками, пересекая все зоны по пути, тем самым оказывают существенное влияние на температуру зоны, через которую проходит тепло.

На **рис. 1** схематично показано движение отходящих газов. Соответственно, расход топлива, поданного в зону, частично оказывает влияние на тепловое состояние смежных зон по пути движения отходящих газов и чем ближе зона, тем значительнее оказывает влияние. В качестве исходной информации для составления эмпирической зависимости был принят массив данных, полученный опытным путем с нагревательной печи. Показания параметров фиксировались за промежуток 24 часа в разных режимах работы нагревательной печи. Фиксация производилась с помощью регистратора с промежутком, равным одной минуте. Температура в зонах печи измерялась с помощью термпар, установленных в сводах. Расход газа измерялся с помощью расходомеров, установленных на подающих газовых трубопроводах горелок. На **рис. 1** приведена схема печи с указанием точек измерений температуры по длине рабочего пространства печи и расхода газа для отопления.

Для определения скорости движения заготовок использовался сигнал о движении механизма шагающих балок, перемещающего заготовки вдоль рабочего пространства нагревательной печи от момента загрузки до момента выгрузки нагретой заготовки на приемный рольганг прокатного стана. При формировании сигнала заготовки в печи перемещаются на расстояние, равное шагу механизма.

В процессе обработки экспериментальных данных печи было установлено, что для верхней методической зоны (T_{01}) и нижней шестой зоны (T_6) показания отсутствовали в связи с некорректно работающими датчиками температуры. Также было установлено, что для последних верхних и нижних томильных зон (T_9 , T_{10}) подача топлива производится в ручном режиме для кратковременного подогрева заготовок.

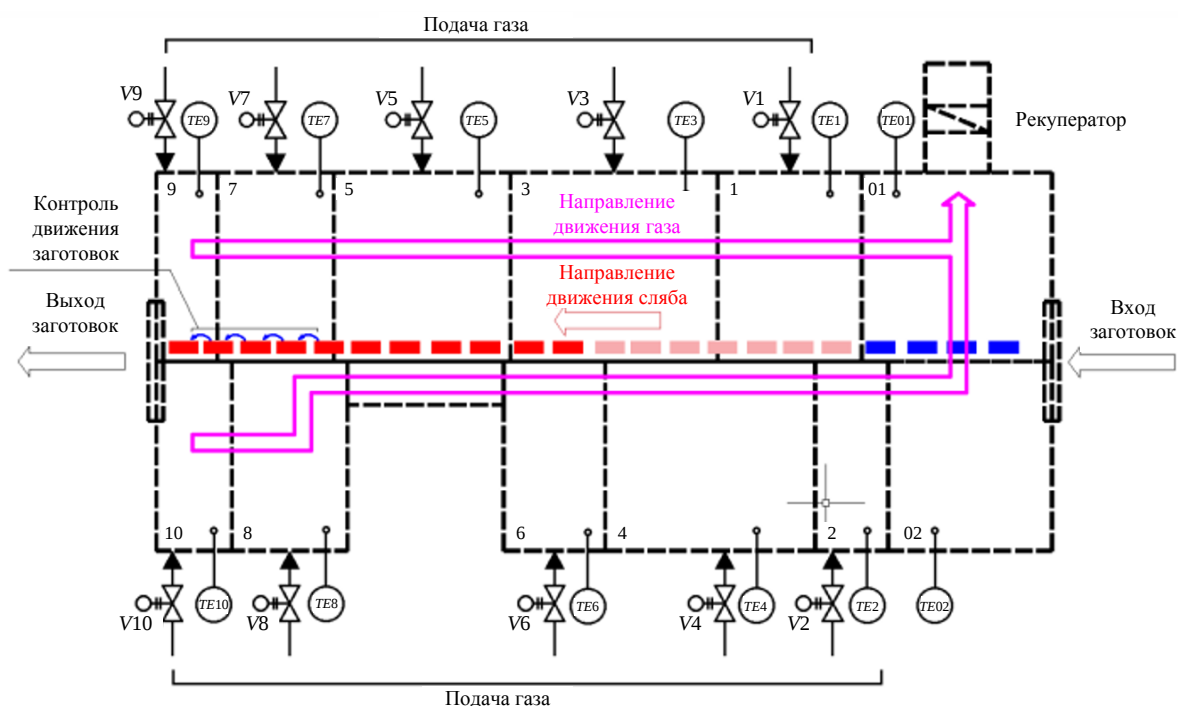


Рис. 1. Схема процесса нагрева заготовок перед прокаткой в проходной нагревательной печи

Из-за низкой информативности сигналов температуры в зонах T01, T6, T9, T10 эти данные не были использованы при разработке эмпирической математической модели внешнего теплообмена.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

За основу эмпирической модели на этом этапе исследований принято уравнение линейной регрессии с несколькими переменными. Такой подход достаточно часто используется для разработки математических моделей и позволяет достаточно просто подтвердить гипотезу о наличии статистической связи между параметрами процесса [22].

В качестве математической модели динамических характеристик зон нагревательной печи, которая описывает тепловую инерционность, использовалось инерционное звено 1-го порядка.

С учетом переноса тепла между зонами отходящими газами, переменным темпом прокатки и тепловой инерционностью зон нагрева математическая модель, описывающая распределения температуры греющей среды по длине печи от расхода топлива в зонах, примет следующий вид:

$$U_i(\tau) = K_{1,i} + \sum_{j=1}^N K_{2,j} X_{2,j} + K_{3,i} X_{3,i}; \quad (1)$$

$$X_{2,j} = [V_j(\tau) - K_{Vj}]; \quad (2)$$

$$X_{3,j} = v(\tau); \quad (3)$$

$$\frac{T_i(\tau)}{dt} = \frac{1}{K_{0i}} [U_i(\tau) - T_i(\tau)], \quad (4)$$

где $U_i(\tau)$ – значение характеристической температуры управления i -й зоны в момент времени τ , °C; i – номер зоны печи, для которой выполняется вычисление температуры; τ – время, с; N – число зон в печи; K_0, K_1, K_2, K_3

– постоянные коэффициенты, характеризующие: с индексом 0 – инерционность зоны, с индексом 1 – значение коррекции температурного параметра; с индексом 2 – величину влияния соседних зон; с индексом 3 – влияние текущего темпа движения заготовок; j – номер влияющей зоны печи; K_{Vj} – коэффициент, характеризующий величину тепловых потерь в j -й зоне нагрева, м³/ч; $v(\tau)$ – текущий темп движения заготовок в печи, м/с.

Определение коэффициентов математической модели при её адаптации производится по экспериментальным данным, полученным от информационной системы. Адаптация сводится к поиску таких коэффициентов уравнений (1)-(4), при которых результаты вычисления температуры по зонам нагревательной печи будут наиболее близки к экспериментальным данным.

Перед адаптацией математической модели экспериментальные данные обрабатывались на предмет удаления случайных значений. После этого выбирались диапазоны, у которых значения вариации экспериментальных данных близки к равномерному распределению. Для значений найденных диапазонов выборок проверяют наличие грубых выбросов.

После обработки экспериментальных данных на предмет удаления выбросов производится поиск коэффициентов $K_{0,i}, K_{1,i}, K_{2,j}, K_{3,i}$ с помощью метода Нелдера-Мида [23, 24].

Найдем коэффициенты, при которых целевая функция будет принимать минимальное значение с учетом ограничения на температуру рабочего пространства печи. Задача поиска коэффициентов включает в себя целевую функцию вида

$$J = F(K_{0,i}, K_{1,i}, K_{2,j}, K_{3,i}) \rightarrow \min, \quad (4)$$

ограничения в форме штрафных функций при выходе параметров модели за ограничения (в этом случае значение функционала $J=10^6$) и вычисления величины функционала J осуществляется по формуле

$$J = \begin{cases} 10^6, & \text{if } T_{comp}(k) \leq T_{\min} \text{ or } T_{comp}(k) \geq T_{\max}; \\ \sum_{k=1}^{k=M} (T_{exp}(k) - T_{comp}(k))^2, & \text{if } T_{\min} \leq T_{comp}(k) \leq T_{\max}, \end{cases} \quad (5)$$

где $T_{comp}(k)$, $T_{exp}(k)$ – вычисленные и экспериментальные значения температуры греющей среды в момент k -го измерения соответственно; k – номер измерения; $T_{\min}$, $T_{\max}$ – минимальное и максимальное значение величины ограничений на вычисляемую температуру рабочего пространства соответственно; M – число значений в экспериментальной выборке.

Для поиска переменных случайным образом генерируется первоначальный набор значений коэффициентов, находящихся в заданных диапазонах. Алгоритм поиска коэффициентов для всех зон печи представлен на рис. 2.

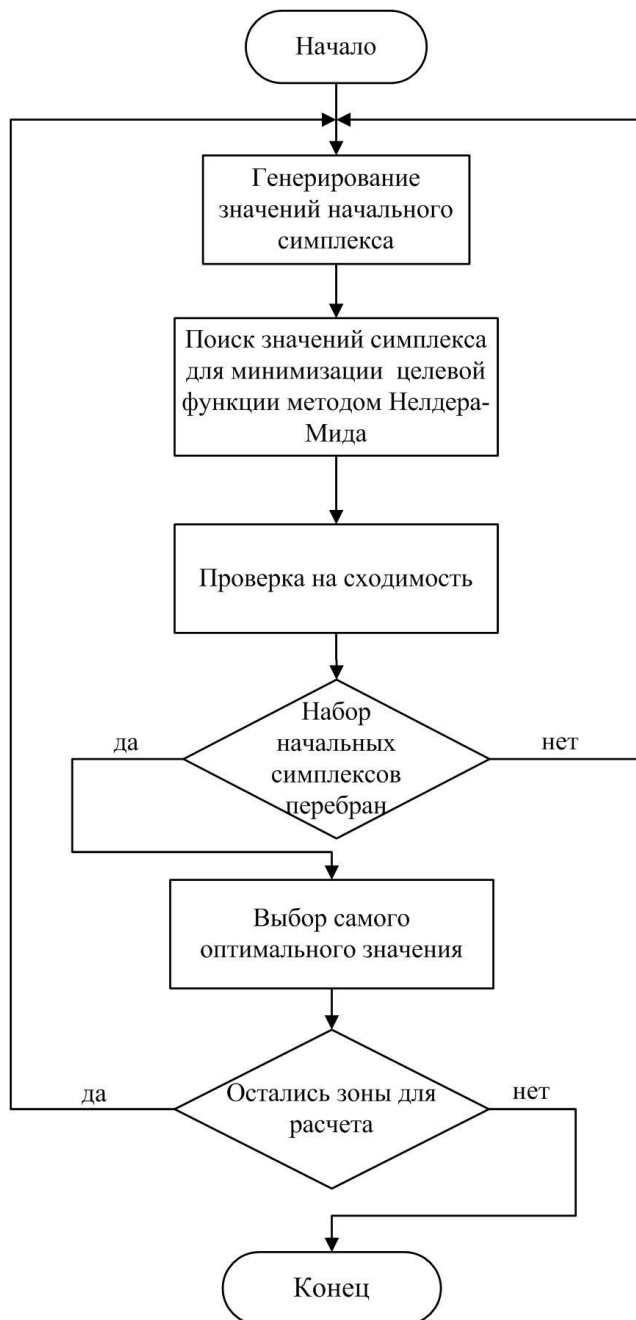


Рис. 2. Алгоритм поиска коэффициентов математической модели

Цикл поиска коэффициентов продолжается до тех пор, пока величина изменения значения целевой функции J на очередном шаге не станет меньше некоторого заданного малого значения ϵ . При этом процедура поиска останавливается, и найденные значения коэффициентов принимаются коэффициентами математической модели.

Особенностью симплексного метода является поиск локальных экстремумов функционала. Для нахождения глобального экстремума для каждой зоны нагревательной печи алгоритм поиска запускается несколько раз с разным случайным набором начальных значений коэффициентов. Из набора локальных экстремумов выбирается минимальный. Как правило, для поиска глобального экстремума необходимо выполнить от 20 до 40 процедур запуска алгоритма поиска.

Поиск коэффициентов системы уравнений (1)-(4) и расчет траектории выполнен с помощью программы, написанной на языке *Visual Basic* v6.0.

Цикл поиска коэффициентов продолжается до тех пор, пока величина изменения значения целевой функции J на очередном шаге не станет меньше некоторого заданного малого значения ϵ . При этом процедура поиска останавливается, и найденные значения коэффициентов принимаются коэффициентами математической модели.

Особенностью симплексного метода является поиск локальных экстремумов функционала. Для нахождения глобального экстремума для каждой зоны нагревательной печи алгоритм поиска запускается несколько раз с разным случайным набором начальных значений коэффициентов. Из набора локальных экстремумов выбирается минимальный. Как правило, для поиска глобального экстремума необходимо выполнить от 20 до 40 процедур запуска алгоритма поиска.

Поиск коэффициентов системы уравнений (1)-(4) и расчет траектории выполнен с помощью программы, написанной на языке *Visual Basic* v6.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Используя поисковый симплексный метод, найдены коэффициенты эмпирической математической модели, которые сведены в табл. 2. Анализ полученных значений коэффициентов показал, что существует достаточно сильное межзонное влияние, выраженное в переносе тепла от одной зоны в другую, по ходу движения дымовых газов. Коэффициенты, принимающие значения менее 0,0001, считаем мало влияющими, и соответствующие параметры исключаются из уравнений (1), (2). В табл. 2 исключенные коэффициенты обозначены прочерками. На рис. 3 и 4 приведены экспериментальные и расчетные графики изменения температуры во времени для верхних и нижних зон нагревательной печи. В табл. 2 приведено значение среднеквадратичного отклонения (S) расчетных и экспериментальных данных. Анализ полученных результатов показал, что для зон нагрева, находящихся ближе к окну выгрузки, точность вычисления температуры увеличивается. Это позволяет предположить, что на зоны, расположенные ближе к окну загрузки (зоны с меньшими номерами), влияние соседних зон, расположенных за ними, становится все более нелинейным, что и приводит к увеличению погрешности вычислений.

Таблица 2
Значение коэффициентов уравнений (1, 2, 4)

Коэффициент	T02	T1	T2	T3
i	0	1	2	3
$K_{0,i}$	11,3	8,3	6,7	6,6
$K_{1,i}$	-	1180	1207	1291
$K_{1,1}$	0,023	0,023	-	-
$K_{2,2}$	0,021	0,021	0,041	-
$K_{2,3}$	0,019	0,011	0,043	0,0306
$K_{2,4}$	0,0010	0,0012	0,022	0,0277
$K_{2,5}$	0,001	0,001	0,013	0,0042
$K_{2,7}$	0,00032	0,00032	0,0009	0,0009
$K_{2,8}$	0,0005	0,0005	0,0009	0,0009
$K_{3,i}$	-0,543	-0,212	-0,123	-0,366
$K_{v,i}$	-	688	636	515
s	21,17	17,69	14,66	8,49
Коэффициент	T4	T5	T7	T8
i	4	5	7	8
$K_{0,i}$	9,2	8,3	8,7	8,2
$K_{1,i}$	1225	1250	1247	1230
$K_{1,1}$	-	-	-	-
$K_{2,2}$	-	-	-	-
$K_{2,3}$	-	-	-	-
$K_{2,4}$	0,020	-	-	-
$K_{2,5}$	0,0142	0,0242	-	-
$K_{2,7}$	0,0095	0,0265	0,021	-
$K_{2,8}$	0,0009	0,0097	0,022	0,034
$K_{3,i}$	-0,6	-0,624	-0,433	-0,214
$K_{v,i}$	717	437	189	315
s	8,92	4,81	6,24	7,15

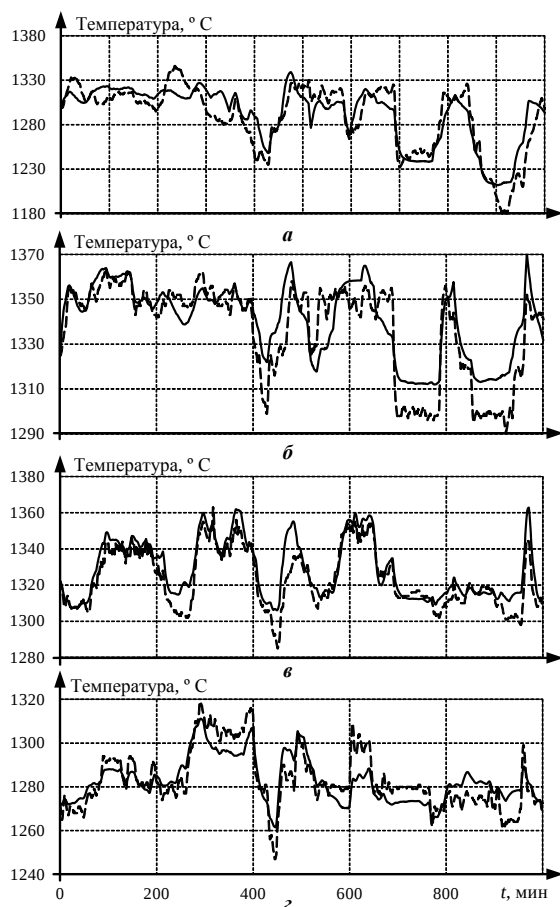


Рис. 3. Изменение температуры в верхних зонах нагревательной печи: а – зона №1; б – зона №3; в – зона №5; г – зона №7 (линии: штриховая – экспериментальная; сплошная – расчетная)

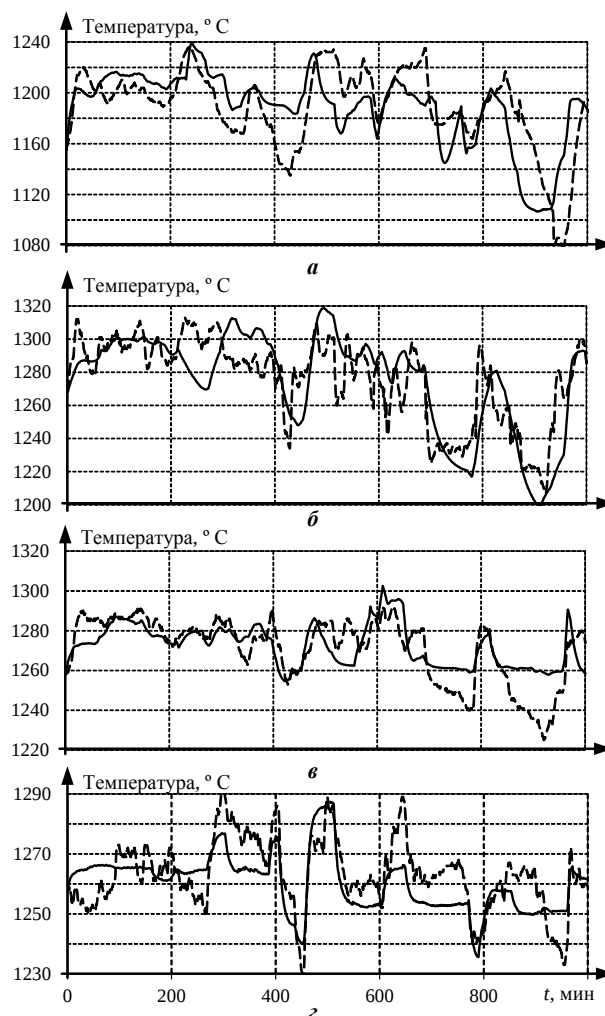


Рис. 4. Изменение температуры в нижних зонах нагревательной печи: а – зона №02; б – зона №2; в – зона №4; г – зона №8 (линии: штриховая – экспериментальная; сплошная – расчетная)

Тем не менее полученная математическая модель с достаточной точностью позволяет прогнозировать температуру в зонах (зоны T1, T3, T5, T7), в которых происходит основной нагрев заготовок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная прогнозирующая математическая модель температурного режима нагревательной печи, построенная на базе системы эмпирических уравнений, позволяет описать зависимости изменения температуры от топливных нагрузок смежных зон, темпа движения заготовок в печи и с учетом инерционности процесса теплопередачи. Анализ результатов моделирования показал, что полученная математическая модель в целом дает удовлетворительные результаты по прогнозированию температуры по зонам и может быть использована в подсистеме прогнозирования при реализации оптимальных режимов нагрева. Величина среднеквадратичного отклонения для верхних зон, которые в наибольшей степени обеспечивают нагрев заготовок (зоны T1, T3, T5, T7), составила соответственно 17,68; 8,49; 4,81; 6,23 °C. Гипотеза о наличии линейной функциональной зависимости, описывающей взаимовлияние зон, в большей степени подтверждается для зон нагрева, находящихся ближе к окну выдачи, и в меньшей степени для зон, находящихся ближе к окну посадки заготовок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Оптимизация режимов управления нагревом заготовок в печах проходного типа. Магнитогорск: Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2013. 376 с.
2. Reheating furnaces in the steel industry: utilization of combustion gases for load preheating and combustion air preheating using COG, LDG and BFG as process gases / D.M. Rosado, S.R.R. Chavez, J.A. Gutierrez, M. Huaraz, J. Carvalho, A.A. Mendiburu // 8th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Bento Gonçalves RS Brazil, 2020. doi: 10.26678/abcm.encit2020.cit20-0017
3. Топливосбережение при нагреве металла в печах машиностроительных предприятий / А.А. Шипко, И.А. Трусова, И.Н. Плющевский, С.В. Корнеев, А.В. Толстой // Литье и металлургия. 2010. № 1-2. С. 53-58.
4. A numerical thermal analysis of the heating process of large size forged ingots / N. B. Arkhazloo, F. Bazdidi-Tehrani, M. Jean-Benoit, M. Jahazi // Materials Science Forum. 2018. Vol. 941. Pp. 2278-2283. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.2278
5. Kim M. A heat transfer model for the analysis of transient heating of the slab in a direct-fired walking beam type reheating furnace // Int. J. Heat Mass Transf. 2007. Vol. 50. No. 19-20. Pp. 3740-3748. doi: 10.1016/j.jheatmasstransfer.2007.02.023
6. Kim J.G., Huh K.Y. Prediction of transient slab temperature distribution in the re-heating furnace of a walking-beam type for rolling of steel slabs // ISIJ Int. 2000. Vol. 40. No. 11. Pp. 1115-1123. doi: 10.2355/ISIJINTERNATIONAL.40.1115
7. Development and application of a numerically efficient model describing a rotary hearth furnace using CFD / M. Landfahner, C. Schlukner, R. Prieler, H. Gerhardt, T. Zmek, J. Klarner, C. Hochenauer // Energy. 2019. Vol. 180. Pp. 79-89. doi: 10.1016/j.energy.2019.04.091
8. Steady state model of a reheating furnace for determining slab boundary conditions / Z. Ahmed, S. Lecompte, T. De Raad, M. De Paepe // Energy Procedia. 2019. Vol. 158. Pp. 5844-5849. doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.542
9. CFD analysis of a pusher type reheating furnace and the billet heating characteristic / B. Mayr, R. Prieler, M. Demuth, L. Moderer, C. Hochenauer // Appl. Therm. Eng. 2017. Vol. 115. Pp. 986-994. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.01.028
10. Muresan V., Abrudean M. The control of the billets heating process in a furnace with rotary hearth // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). 2012. Vol. 8(1). Pp. 735-740. doi: 10.3182/20120902-4-fr-2032.00128
11. Chang J.H., Oh J., Lee H. Development of a roller hearth furnace simulation model and performance investigation // Int. J. Heat Mass Transf. 2020. Vol. 160. 120222. doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2020.120222
12. Бугрин И.С., Денисов М.А., Соловьев К.Г. Разработка математической модели нагревательной печи с использованием математического пакета ANSYS // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы I междунар. интерактив. науч.-практ. конф. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. Ч. 1. С. 95-98.
13. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Кабишов С.М. Тепловая работа нагревательных печей прокатного производства в промышленных условиях. Сообщение 3. Математическое моделирование в печах с механизированным подом // Литье и металлургия. 2011. № 2. С. 109-117.
14. Effect of the burner position on an austenitizing process in a walking-beam type reheating furnace / A.M. Garcia, A.F. Colorado, J.E. Obando, C.E. Arrieta, A.A. Amell // Appl. Therm. Eng. 2019. Vol. 153. Pp. 633-645. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.02.116
15. Математическое моделирование тепловой работы проходных нагревательных печей в схеме противоточного теплообмена / В.И. Тимошпольский, М.Л. Герман, И.А. Трусова, П.Э. Ратников // Литье и металлургия. 2009. №1. С. 146-151.
16. Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Модификации зонального метода для решения задач радиационного теплообмена: основные положения // Вестник ИГЭУ. 2009. №2. С. 1-3.
17. Оптимальные топливосберегающие режимы нагрева непрерывнолитых заготовок в методических печах / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Д.Ю. Жадинский, А.У. Ахметова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3(51). С. 89-96.
18. Автоматизированная система управления топливосберегающим несимметричным нагревом непрерывнолитых заготовок перед прокаткой / С.М. Андреев, Т.У. Ахметов, Д.В. Нужин, Б.Н. Парсункин // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №3(32) С. 60-65. doi: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-60-65
19. Рябчиков М.Ю., Барков Д.С.-Х., Рябчикова Е.С. Управление нагревом металла в методических печах с учетом распределения внешних тепловых потерь по длине печи // Металлообработка. 2016. №6(96) С. 38-47.
20. Рябчиков М.Ю., Кокорин И.Д. Сравнение вариантов детерминированных моделей для прогноза температуры стальной полосы на выходе из нагревательной печи при оцинковании // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 6. С. 355-364.
21. Панферов В.И., Панферов С.В. К решению задачи контроля температуры металла в АСУ ТП методических печей // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2021. Т. 21 №4. С. 63-75. doi: 10.14529/met210408
22. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента (справочное пособие). М.: Наука, 1971. 192 с.
23. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс: М.: Радио и связь, 1988. 128 с.
24. Нужин Д.В., Андреев С.М. Исследование влияния соседних зон на температуру греющей среды пятой зоны методической печи прокатного стана // Автоматизированные технологии и производства. 2023. №1(27). С. 3-10.

Поступила в редакцию 20 июня 2023 г.

Принята к печати 29 августа 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

PREDICTION MODEL OF TEMPERATURE DISTRIBUTION OVER THE LENGTH OF THE FURNACE TAKING INTO ACCOUNT THE MUTUAL INFLUENCE OF ITS ZONES

Sergey M. Andreev

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Automated Control Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, andreev.asc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0735-6723>

Dmitry V. Nuzhin

Graduate Student, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, Nuzhin83@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7498-7979>

Albina R. Bondareva

Senior Lecturer, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, a.bondareva@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1091-0107>

In the optimal control of billet heating in pass-through heating furnaces of rolling mills, the variable productivity of the mill in combination with the inertial properties of heating zones is a factor that greatly complicates the realization of optimal modes. The subsystem of predicting the temperature state of the furnace depending on the current productivity of the mill and taking into account the heat transfer between the heating zones will increase the efficiency of the optimal control system in transient modes of furnace operation. The work provides the results of the work analysis on the development of external heat exchange mathematical models in pass-through heating furnaces of rolling mills. Two main directions of external heat transfer mathematical models research are defined. The first group of researches includes the development of heat transfer models in which the heat transfer process is described by a system of analytical or numerical equations based on the physical laws of heat transfer taking into account the hydrodynamics of flue gas movement. The second group of research includes the development of empirical mathematical models based on the parameters of the observed process, and describing the correlation between these parameters. Research on the empirical mathematical model development of a pass-through heating furnace taking into account the dynamic characteristics of the process has been carried out. As a result of the research, a mathematical model is obtained, which determines the relationship between the fuel consumption distributed over the furnace zones and the temperature of the working space in these zones. The mathematical model takes into account the mutual influence of neighboring zones, furnace productivity on heating the workpieces, as well as the dynamic characteristics of the zones. As initial data for finding the coefficients of the equations were taken statistical data of wide strip hot rolling mill heating furnace operation. The coefficients of the mathematical model equations were determined by the search method, using the method of deformable polyhedron.

Keywords: heating furnace, metal pressure treatment, empirical model, deformable polyhedron method, the Nelder-Mead method, billet heating before rolling

REFERENCES

1. Andreev S.M., Parsunkin B.N. *Optimizacija rezhimov upravleniya nagrevom zagotovok v pechah prohodnogo tipa* [Optimization of Control Modes Heating Furnaces Transmission Type]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2013. 376 p. (In Russian)
2. Rosado D.M., Chavez S.R.R., Gutierrez J.A., Huaraz M., Carvalho J., Mendiburu A. A. Reheating Furnaces in the Steel Industry: Utilization of Combustion Gases for Load Preheating and Combustion Air Preheating Using Cog, Ldg and Bfg As Process Gases. 8th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Bento Gonçalves RS Brazil, 2020. doi: 10.26678/abcm.encit2020.cit20-0017
3. Shipko A.A., Trusova I.A., Plushchevskij I.N., Korneev S.V., Tolstoj A.V. Fuel Saving at Metal Heating in Furnaces of Machine-Building Enterprises. *Litye i metallurgiya* [Foundry production and metallurgy], 2010, no. 1-2, pp. 53-58. (In Russian)
4. Arkhazloo N.B., Bazdidi-Tehrani F., Jean-Benoit M., Jahazi M. A numerical thermal analysis of the heating process of large size forged ingots. *Materials Science Forum*. 2018, vol. 941, pp. 2278-2283. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.2278
5. Kim M. A heat transfer model for the analysis of transient heating of the slab in a direct-fired walking beam type reheating furnace. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2007, vol. 50, no. 19-20, pp. 3740-3748. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.02.023
6. Kim J.G., Huh K.Y. Prediction of transient slab temperature distribution in the re-heating furnace of a walking-beam type for rolling of steel slabs. *ISIJ Int.* 2000, vol. 40, no. 11, pp. 1115-1123. doi: 10.2355/ISIJINTERNATIONAL.40.1115
7. Landfahner M., Schlukner C., Prieler R., Gerhardter H., Zmek T., Klarner J., Hochenauer C. Development and application of a numerically efficient model describing a rotary hearth furnace using CFD. *Energy*. 2019, vol. 180, pp. 79-89. doi: 10.1016/j.energy.2019.04.091
8. Ahmed Z., Lecompte S., De Raad T., De Paepe M. Steady State model of a Reheating Furnace for determining slab boundary conditions. *Energy Procedia*. 2019, vol. 158, pp. 5844-5849. doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.542
9. Mayr B., Prieler R., Demuth M., Moderer L., Hochenauer C. CFD analysis of a pusher type reheating furnace and the billet heating characteristic. *Appl. Therm. Eng.* 2017, vol. 115, pp. 986-994. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.01.028
10. Muresan V., Abrudean M. The control of the billets heating process in a furnace with rotary hearth. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*. 2012, vol. 8(1), pp. 735-740. doi: 10.3182/20120902-4-fr-2032.00128
11. Chang J.H., Oh J., Lee H. Development of a roller hearth furnace simulation model and performance investigation. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2020, vol. 160, p. 120222. doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2020.120222
12. Bugrin I.S., Denisov M.A., Soloviev K.G. Development of a reheating furnace mathematical model using ANSYS mathematical software. *Innovatsii v materialovedenii i metallurgii: materialy I mezhdunar. interaktiv. nauch.-prakt. konf* [Materials of 1st International interactive scientific and practical conference "Innovations in Materials Science and Metallurgy"]. Yekaterinburg, Ural University Publishing House, 2012, pp. 95-98. (In Russian)
13. Timoshpolsky V.I., Trusova I.A., Kabishov S.M. Dark operation of heating furnaces of rolling production in industrial conditions. Message 3. Mathematical modeling in furnaces with mechanized hearth. *Litye i metallurgiya* [Foundry production and metallurgy], 2011, no. 2, pp. 109-117. (In Russian)
14. Garcia A.M., Colorado A.F., Obando J.E., Arrieta C.E., Amell A.A. Effect of the burner position on an austenitizing process in a walking-beam type reheating furnace. *Appl. Therm. Eng.* 2019, vol. 153, pp. 633-645. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.02.116
15. Timoshpolsky V.I., German M.L., Trusova I.A., Ratnikov P.E. Mathematical modeling of the thermal operation of through-pass heating furnaces in a countercurrent heat exchange scheme. *Litye i metallurgiya* [Foundry production and metallurgy], 2009, no. 1, pp. 146-151. (In Russian)
16. Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A. Modifications of the zonal method for solving problems of radiation heat transfer: basic provisions. *Vestnik IGEHU* [Vestnik of IGEU], 2009, no. 2, pp. 1-3. (In Russian)
17. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Zhadinsky D.Yu., Akhmetova A.U. Optimal fuel-efficient modes of heating continuous-

- ly cast billets in continuous reheating furnaces. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 3, pp. 89-96. (In Russian)
18. Andreev S.M., Akhmetov T.U., Nuzhin D.V., Parsunkin B.N. Automated control system for fuel-saving asymmetric heating of continuously cast work-pieces before rolling. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electro-technical systems and complexes], 2016, no. 3(32), pp. 60-65. (In Russian)
 19. Ryabchikov M.Yu., Barkov D.S.-H., Ryabchikova E.S. Control of metal heating in methodical furnaces taking into account the distribution of external heat losses along the length of the furnace. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2016, no. 6(96), pp. 38-47. (In Russian)
 20. Ryabchikov M.Yu., Kokorin I.D. Comparison of variants of deterministic models for predicting the temperature of a steel strip at the outlet of a heating furnace during galvanizing *Izvestiya TulGu. Tekhnicheskie nauki*. [Izvestiya Tula State University], 2021, no. 6, pp. 355-364. (In Russian)
 21. Panferov V.I., Panferov S.V. Solution of the problem of metal temperature control in the automated control system of methodical furnaces. *Vestnik YUUrGU. Seriya "Metallurgiya"* [Bulletin of SUSU. Metallurgy], 2021, vol. 21, no. 4, pp. 63-75. doi: 10.14529/met210408 (In Russian)
 22. Rumshinsky L.Z. *Matematicheskaya obrabotka rezultatov eksperimenta* [Mathematical processing of experimental results]. Moscow, Nauka, 1971, 192 p. (In Russian)
 23. Bundy B. *Metody optimizatsii. Vvodnyy kurs* [Optimization methods. Introductory course]. Moscow, Radio and Communications, 1988. 128 p. (In Russian)
 24. Nuzhin D.V., Andreev S.M. Influence of Neighboring Zones on the Heating Medium Temperatures of the Fifth Zone in a Methodical Furnace of a Rolling Mill. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [[Automation of technologies and production], 2023, no. 1(27), pp. 3-10. (In Russian)

Андреев С.М., Нужин Д.В., Бондарева А.Р. Прогнозирующая модель распределения температуры по длине нагревательной печи с учетом взаимовлияния зон // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 3(60). С. 52-60. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-52-60](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-52-60)

Andreev S.M., Nuzhin D.V., Bondareva A.R. Prediction Model of Temperature Distribution Over the Length of the Furnace Taking into Account the Mutual Influence of its Zones. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electro-technical Systems and Complexes], 2023, no. 3(60), pp. 52-60. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-52-60](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-52-60)

Шишков А.Н.¹, Дудкин М.М.², Маклаков А.С.², Ле В.К.¹¹Московский политехнический университет²Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

ОПТИМАЛЬНАЯ ГИБРИДНАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ДЛЯ ТРЕХУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА НАПЯЖЕНИЯ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ ШИМ

Трехуровневый автономный инвертор напряжения (АИН) с фиксированной нейтральной точкой (ФНТ) в настоящее время получил широкое применение в высоковольтном электроприводе переменного тока, а также в системах электроснабжения как преобразователь постоянного тока в переменный. При эксплуатации данного инвертора необходимо обеспечить множество технических требований или четыре основных критерия к качеству кривой выходных напряжений (токов), коммутационным потерям, балансу напряжения нейтральной точки (НТ) и синфазному (СФ) напряжению. С целью улучшения четырех заявленных критериев в данной статье предложен алгоритм пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ПВШИМ) с гибридной последовательностью переключения (ПП), построенной на основе известных комбинаций пяти- и семиступенчатой ПП. Были предложены три варианта гибридных последовательностей переключений: Г1-ПП, Г2-ПП и Г3-ПП и проведен их сравнительный анализ при помощи компьютерного моделирования в среде *MatLab+Simulink*. На основе анализа экспериментальных зависимостей коэффициента искажения высших гармоник (THD) тока на выходе инвертора, числа пар переключений силовых ключей, максимальной ошибки напряжения НТ и уровня СФ напряжения от коэффициента модуляции инвертора и коэффициента регулирования гибридной ПП была определена оптимальная гибридная ПП, которой оказалась Г1-ПП. Она обеспечивает наилучший баланс напряжения НТ и исключение гармоник четного порядка из спектра выходного напряжения инвертора. Таким образом, предложенный алгоритм ПВШИМ с Г1-ПП является эффективным инструментом для управления трехуровневым АИН, что благоприятно сказывается на его энергосбережении, массогабаритных показателях и эксплуатационной надежности.

Ключевые слова: трехуровневый автономный инвертор напряжения с фиксированной нейтральной точкой, напряжение нейтральной точки, синфазное напряжение, коммутационные потери, пространственно-векторная ШИМ, гибридная последовательность переключений

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы многоуровневые инверторы привлекли большой интерес исследователей в области электропривода и электроснабжения как энергосберегающее устройство передачи и преобразования электроэнергии [1-3]. Это обусловлено преимуществами многоуровневых преобразователей, к числу которых относятся: низкий уровень гармонического искажения (THD) выходного напряжения (тока) за счет увеличения количества уровней напряжения на выходе инвертора, снижение напряжения на силовых ключах, высокая эффективность преобразования (высокий КПД) и др. [4, 5]. Одной из распространенных топологий среди многоуровневых преобразователей является трехуровневый автономный инвертор напряжения с фиксированной нейтральной точкой (ЗУ АИН с ФНТ). В настоящее время данный преобразователь получил широкое применение в системах высоковольтных и прецизионных электроприводов переменного тока, а также в системах электроснабжения благодаря своей простой аппаратной реализации как с точки зрения силовой схемы, так и системы управления [6, 7].

В настоящее время методам управления трехуровневых АИН с ФНТ уделяется большое внимание. Среди них наибольшее применение получили широтно-импульсная модуляция (ШИМ) на основе несущих сигналов [8], пространственно-векторная ШИМ (ПВШИМ) [9] и ШИМ с удалением выделенных гармоник [10]. Однако общим для подобных стратегий управления является невозможность одновременного

улучшения всех заявленных характеристик, то есть улучшение одной характеристики приводит к ухудшению другой и наоборот. Поэтому остается актуальной задачей разработка алгоритмов управления трехуровневых инверторов с целью улучшения их технических характеристик.

В настоящее время наибольшее применение для управления трехуровневых инверторов получил алгоритм ПВШИМ [11]. В работе предлагается изменить последовательность переключения силовых ключей таким образом, чтобы улучшить технические характеристики инвертора: уровень гармонических искажений THD на выходе, баланс напряжения НТ, коммутационные потери и уровень синфазного напряжения.

На сегодняшний день было предложено значительное количество вариантов ПП для ЗУ АИН с ФНТ, среди которых можно выделить три:

1) Стандартная ПП, в которой используются все избыточные комбинации состояний малых и нулевых базовых векторов. Эта ПП обеспечивает низкое значение THD на выходе и баланс напряжения НТ, однако существенно увеличивает количество переключений силовых ключей и уровень синфазного напряжения, что ограничивает ее практическое применение [12].

2) Семиступенчатая ПП, в которой используется семь различных комбинаций переключений базовых векторов или три уровня переключений на каждом периоде ШИМ. Преимущество этой ПП заключается в обеспечении приемлемого уровня THD на выходе и баланса напряжения НТ. Синфазное напряжение и количество пар переключений силовых ключей улучшены по сравнению со стандартной ПП, но эффективность остается низкой [9].

3) Пятиступенчатая ПП, в которой используется пять различных комбинаций переключений базовых векторов или два уровня переключений на каждом периоде ШИМ. Эта ПП позволяет значительно снизить коммутационные потери и уровень синфазного напряжения, но вызывает высокое значение THD и дисбаланс напряжения НТ [13].

Таким образом, анализ состояния известных ПП показывает, что семиступенчатая и пятиступенчатая ПП могут дополнять друг друга с целью улучшения технических характеристик инвертора. Это привело к идее объединения данных двух ПП в гибридную ПП. В работе были предложены три варианта гибридных последовательностей переключений: Г1-ПП, Г2-ПП и Г3-ПП и проведен их сравнительный анализ на основе компьютерного моделирования в среде *MatLab+Simulink* с целью выбора оптимальной последовательности для алгоритма ПВШИМ.

АЛГОРИТМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ ШИМ С ГИБРИДНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

На **рис. 1** изображена трехфазная топология 3У АИН с ФНТ совместно с системой управления на основе ПВШИМ с гибридной ПП. Силовая цепь одной из стоек трехуровневого инвертора содержит четыре силовых ключа $S_{1x} \dots S_{4x}$ и два фиксирующих диода D_{1x} , D_{2x} (x – индекс фазы А, В, С). Два конденсатора C_{d1} и C_{d2} соединены в звене постоянного тока с целью разделения напряжения и создания нейтральной точки О. При равномерном распределении напряжения на обоих конденсаторах достигается условие $U_{d1} = U_{d2} = U_d/2$, где U_d – ЭДС источника питания. При выборе нейтральной точки О в качестве опорной точки выходное фазное напряжение u_{x0} равно $+U_d/2$ в состоянии [Р], когда включены S_{4x} и S_{3x} ; u_{x0} равно 0 в состоянии [О], когда включены S_{3x} и S_{2x} , и равно $-U_d/2$ в состоянии [N], когда включены S_{2x} и S_{1x} [13].

Таким образом, на выходе каждой фазы инвертора формируется одно из трех состояний [Р], [О] и [N]. В результате в трехфазной топологии 3У АИН с ФНТ образуется $3^3=27$ различных комбинаций состояний переключений силовых ключей. Совокупность 27 комбинаций соответствует 19 базовым векторам напряжения, которые образуют векторную диаграмму в виде правильного шестиугольника, как показано на **рис. 2, а**.

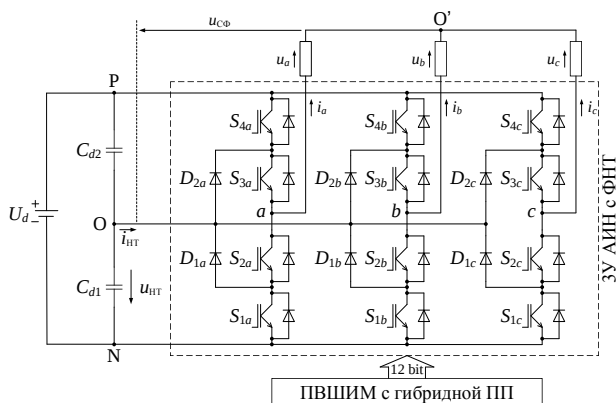


Рис. 1. Трехфазная топология 3У АИН с ФНТ

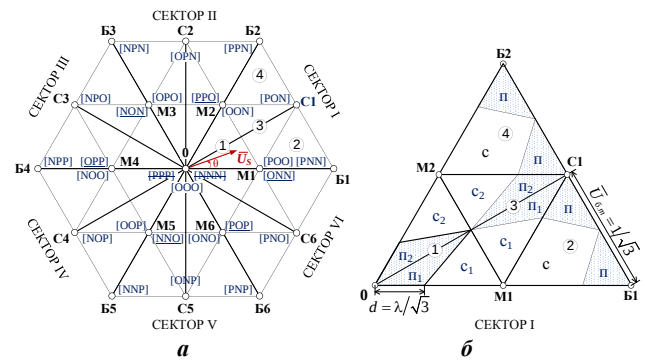


Рис. 2. Векторная диаграмма (а) и области работы гибридной ПП для сектора I (б)

Данная диаграмма разбита на 6 одинаковых секторов I...VI, каждый из которых разделен на 4 сегмента 1, 2, 3 и 4 [14]. В зависимости от длины модуля базовые векторы разделены на шесть больших $\bar{U}_{B1} \dots \bar{U}_{B6}$, шесть средних $\bar{U}_{C1} \dots \bar{U}_{C6}$, шесть малых $\bar{U}_{M1} \dots \bar{U}_{M6}$ и нулевой вектор $\bar{U}_0$. Каждый малый базовый вектор может принимать одну из двух комбинации состояний: либо Р-типа (без состояния N), либо N-типа (без состояния Р) [15].

В соответствии с общим алгоритмом ПВШИМ пространственный вектор напряжения $\bar{U}_s$ в течение периода квантования $T_{\text{ШИМ}}$ синтезируется из трех ближайших базовых векторов по принципу «вольт-секундного баланса» [16]. На примере сегмента 1 (сектор I) на **рис. 2, а** базовые векторы $\bar{U}_{M1}$, $\bar{U}_{M2}$ и $\bar{U}_0$ выбраны для синтеза вектора $\bar{U}_s$:

$$\begin{cases} \bar{U}_s = \gamma_1 \bar{U}_{M1} + \gamma_2 \bar{U}_{M2} + \gamma_3 \bar{U}_0; \\ \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = 1, \end{cases} \quad (1)$$

где $\gamma_1 = t_1/T_{\text{ШИМ}}$; $\gamma_2 = t_2/T_{\text{ШИМ}}$; $\gamma_3 = t_3/T_{\text{ШИМ}}$ – относительные продолжительности включения базовых векторов $\bar{U}_{M1}$, $\bar{U}_{M2}$ и $\bar{U}_0$ соответственно, а t_1 , t_2 и t_3 – их абсолютные значения.

В общем случае использование пяти-, семиступенчатых и других типов ПП для 3У АИН с ФНТ позволяет достичь компромисса между заявленными техническими характеристиками инвертора. Однако каждая ПП имеет свои преимущества и недостатки, которые могут ограничивать их применение в зависимости от требований установок. Как уже отмечалось, использование пятиступенчатой ПП позволяет достичь низких составов СФ напряжения и малых коммутационных потерь, однако при этом возникает дисбаланс напряжения НТ и ухудшение качества кривой выходного тока. В свою очередь, использование семиступенчатой ПП обеспечивает баланс НТ и улучшение качества кривой выходного тока, но приводит к повышению коммутационных потерь и появлению высоких составов СФ напряжения.

Для преодоления этих недостатков была разработана гибридная ПП, которая объединяет преимущества пятиступенчатой и семиступенчатой ПП. При формировании гибридной ПП пятиступенчатая ПП включается в области «п», где наблюдается слабое влияние малого базового вектора на модулированный вектор $\bar{U}_s$, а семиступенчатая ПП включается в области «с»,

где наблюдается сильное влияние малого базового вектора (**рис. 2, б**). Из (1) следует, что чем ближе конец вектора $\overline{U}_S$ к базовому вектору, тем сильнее воздействие этого базового вектора на вектор $\overline{U}_S$. В результате области «п» (п, p_1 , p_2) и «с» (с, c_1 , c_2) определены на **рис. 2, б** и характеризуются коэффициентом регулирования ПП $0 \leq \lambda \leq 1$, который определяется следующим образом:

$$\lambda = \frac{d}{U_{6.m}} = d\sqrt{3}, \quad (2)$$

где d – открытость области пятиступенчатой ПП в соответствии с **рис. 2, б**; $\overline{U}_{6,m} = 1/\sqrt{3}$ – нормированная величина модуля малого базового вектора, равная длине стороны сегмента.

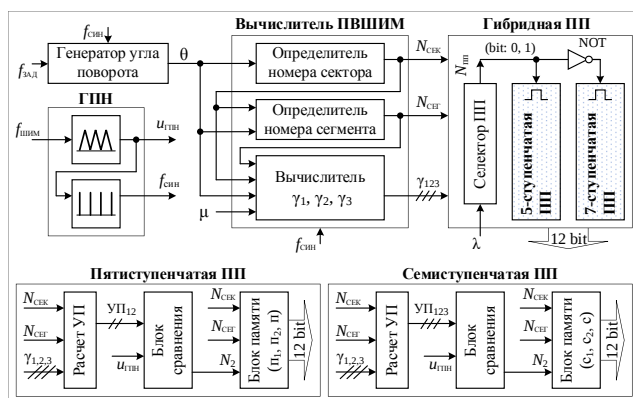
На основе **рис. 2, б** были определены условия переключения между областями «п1», «п2», «п», «с1», «с2» и «с» для каждого сегмента, которые сведены в **табл. 1**.

На **рис. 3** приведена функциональная схема системы управления трехуровневого инвертора на основе ПВШИМ с гибридной ПП. В ее состав входят следующие основные блоки: генератор пилообразного напряжения и синхронизирующих импульсов (ГПН), генератор угла поворота, вычислитель ПВШИМ (определитель номера сектора, определитель номера сегмента, вычислитель $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$), блок гибридной ПП. Подробно работа данных блоков, за исключением блока гибридной ПП, рассмотрена в работе [17].

Таблица 1

**Условия переключения между пятиступенчатой ПП
и семиступенчатой ПП**

Сегменты 1 и 3	Область c_1	Область c_2
	$\begin{cases} \gamma_1 \geq \gamma_2 \\ \gamma_1 + (2\lambda - 1)\gamma_2 \geq \lambda \end{cases}$	$\begin{cases} \gamma_1 < \gamma_2 \\ (2\lambda - 1)\gamma_1 + \gamma_2 \geq \lambda \end{cases}$
	Область p_1	Область p_2
	$\begin{cases} \gamma_1 \geq \gamma_2 \\ \gamma_1 + (2\lambda - 1)\gamma_2 < \lambda \end{cases}$	$\begin{cases} \gamma_1 < \gamma_2 \\ (2\lambda - 1)\gamma_1 + \gamma_2 < \lambda \end{cases}$
Сегменты 2 и 4	Область c	Область p
	$\begin{cases} \gamma_1 + (1 - 2\lambda)\gamma_2 \leq 1 - \lambda \\ (1 - 2\lambda)\gamma_1 + \gamma_2 \leq 1 - \lambda \end{cases}$	$\begin{cases} \gamma_1 + (1 - 2\lambda)\gamma_2 > 1 - \lambda \\ (1 - 2\lambda)\gamma_1 + \gamma_2 > 1 - \lambda \end{cases}$



**Рис. 3. Функциональная схема системы управления
трехуровневого инвертора на основе ПВШИМ
с гибридной ПП**

Генератор пилообразного сигнала осуществляет формирование пилообразного напряжения $u_{ГПН}$ с частотой $f_{\text{шим}}$. Кроме того, данный блок генерирует синхронизирующие импульсы $f_{\text{син}}$, которые формируются в моменты пересечения сигнала $u_{ГПН}$ через нулевой уровень.

Генератор угла поворота формирует в системе угол поворота θ пространственного вектора напряжения $\bar{U}_S$ (см. **рис. 2, а**) в зависимости от сигнала задания инвертора по частоте $f_{\text{зАД}}$. Изменение текущего значения θ происходит под действием синхронизирующего импульса $f_{\text{син}}$.

Вычислитель ПВШИМ выполняет расчет относительных продолжительностей включения базовых векторов γ_1 , γ_2 и γ_3 , а также определение номера сектора $N_{\text{СЕК}} = 1 \dots 6$ и сегмента $N_{\text{СЕГ}} = 1 \dots 4$, в которых находится пространственный вектор $\bar{U}_s$.

Блок гибридной ПП осуществляет формирование управляющих импульсов $u_{y1}...u_{y12}$ для управления силовыми ключами инвертора и состоит из следующих блоков: селектора ПП, а также блоков пяти- и семиступенчатой ПП (см. **рис. 3**).

Селектор ПП осуществляет переключение между пяти- и семиступенчатой ПП в зависимости от положения пространственного вектора напряжения $\bar{U}_s$ согласно условиям, приведенных в **табл. 1**. Выход данного блока $N_{\text{пп}}$ представляет собой логический сигнал: «0» соответствует работе семиступенчатой ПП, «1» – пятиступенчатой ПП.

Блоки пяти- и семиступенчатой ПП подают управляющие сигналы для включения силовых ключей инвертора и состоят из следующих подблоков: расчета уровней переключения УП, блока сравнения и блоков памяти.

Вычислитель УП осуществляет расчет двух уровней переключений для пятиступенчатой ПП в области «п₁» (см. **рис. 2, б**) в соответствии с выражениями $УП_1 = \gamma_i$ и $УП_2 = УП_1 + \gamma_j$, где i, j – целые числа от 1 до 3, которые зависят от положения пространственного вектора $\bar{U}_5$ в каждом сегменте $N_{\text{сег}}$. Для семиступенчатой ПП в области «с₁» (см. **рис. 2, б**) осуществляется расчет трех уровней переключений таким образом, чтобы общая продолжительность включения комбинаций P -типа малых базовых векторов была равна продолжительности включения комбинаций N -типа.

Блок сравнения осуществляет сравнение пилообразного напряжения $u_{\text{ГПН}}$ с уровнями переключений УП_{*i*} с целью определения времени включения базовых векторов, при помощи которых формируется пространственный вектор напряжения на плоскости векторной диаграммы (см. **рис. 2, а**) на каждом периоде ШИМ. Данные на выходе кодируются двухбитным двоичным кодом N_2 , содержащим информацию об адресе ячейки памяти, в которой записана информация о включении того или иного базового вектора.

Блок памяти осуществляет хранение информации кодов состояния включения силовых ключей для всех областей пяти- и семиступенчатой ПП в зависимости от номера сектора $N_{\text{сек}}$ и сегмента $N_{\text{сег}}$, а также двоичного кода N_s с выхода блока сравнения.

ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ

Пространственный вектор напряжения $\bar{U}_s$ в выражении (1) может быть описан комбинациями состояний соответствующих базовых векторов:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{U}_s &= \gamma_1 \begin{Bmatrix} [POO] \\ [ONN] \end{Bmatrix} + \gamma_2 \begin{Bmatrix} [PPO] \\ [OON] \end{Bmatrix} + \gamma_3 \begin{Bmatrix} [PPP] \\ [OOO] \\ [NNN] \end{Bmatrix} \\ \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 &= 1 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Здесь исключены комбинации состояний [PPP] и [NNN] нулевого базового вектора, которые вызывают наивысшие уровни $\pm U_d/2$ СФ напряжения [18]. СФ-напряжение определяется как напряжение между нейтральной точкой источника питания О и нейтральной точкой нагрузки О' (см. **рис. 1**). Согласно (3) можно получить большое количество вариантов пяти- и семиступенчатой ПП для гибридной ПП благодаря избыточным комбинациям состояний малых базовых векторов. Несмотря на это, наибольшие применения для управления 3У АИН с ФНТ получили три варианта гибридной ПП, представленные на **рис. 4–6**.

На **рис. 4** приведен 1-й вариант гибридной ПП (Г1-ПП) для сектора I, в котором приведена семиступенчатая ПП [9], а пятиступенчатая ПП построена путем исключения комбинаций состояния малых базовых векторов, вызывающих высокие уровни $\pm U_d/3$ СФ-напряжения в семиступенчатой ПП. В семиступенчатой ПП сумма длительностей включения комбинаций Р-типа равна сумме длительностей включения комбинаций N-типа. Для перехода между областью p_1 и областью p_2 (сегмента 1 или 3) требуются две дополнительные пары переключений силовых ключей. Другие переходы не требуют дополнительного переключения.

На **рис. 5** представлен 2-й вариант гибридной ПП (Г2-ПП) для сектора I [12]. В отличие от семиступенчатой ПП варианта Г1-ПП, в семиступенчатой ПП варианта Г2-ПП на первое место ставятся комбинации состояний одного типа. Пятиступенчатая ПП также построена путем удаления комбинаций состояния малых базовых векторов, вызывающих высокие уровни $\pm U_d/3$ СФ-напряжения в семиступенчатой ПП. Это приводит к различиям в комбинациях состояний в других местах ПП, выделенных серым фоном на **рис. 5**. В семиступенчатой ПП также имеется равенство суммы длительности включения комбинаций Р-типа и N-типа. Для переходов между секторами (или сегментами) требуется не более двух пар переключений силовых ключей.

На **рис. 6** показан 3-й вариант гибридной ПП (Г3-ПП) для сектора I.

По сравнению с Г2-ПП, в Г3-ПП полностью аналогичная семиступенчатая ПП, а пятиступенчатая ПП отличается. По сравнению с Г1-ПП имеются отличия в комбинации состояний пяти- и семиступенчатых ПП, выделенных серым фоном на **рис. 6**. Для переходов между секторами (или сегментами) требуется не более одной пары переключений силовых ключей.

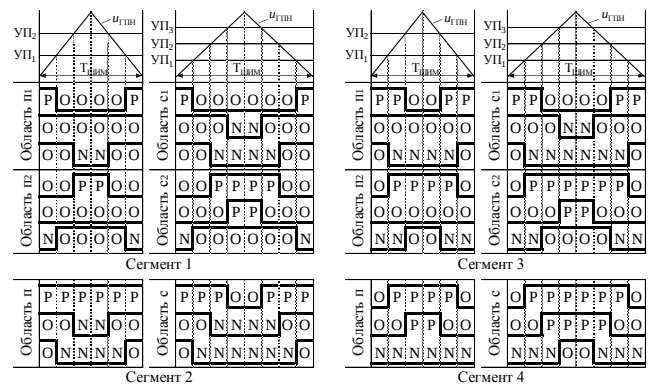


Рис. 4. Гибридная последовательность Г1-ПП для сектора I

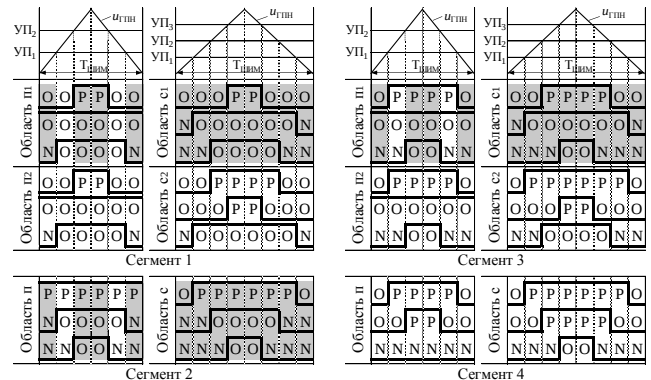


Рис. 5. Гибридная последовательность Г2-ПП для сектора I

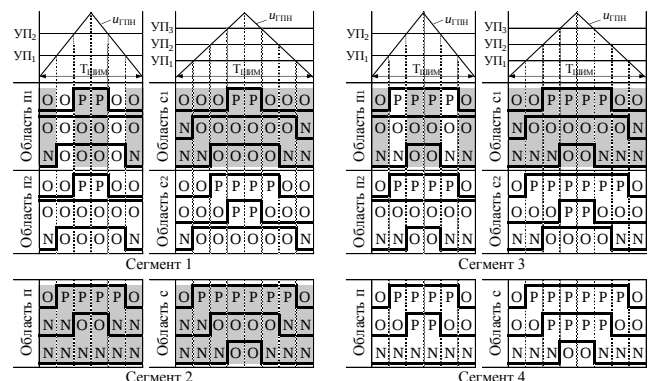


Рис. 6. Гибридная последовательность Г3-ПП для сектора I

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИБРИДНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ

Для объективного сравнения трех вариантов гибридной ПП и их влияния на коммутационные потери, качество выходного тока инвертора, напряжения НТ была разработана компьютерная модель 3У АИН с ФНТ в среде *MatLab+Simulink*. Для питания инвертора был использован источник постоянного напряжения 500 В с двумя одинаковыми конденсаторами. На выходе инвертора была подключена активно-индуктивная нагрузка с активным сопротивлением 50 Ом и $\cos \varphi = 0,8$. Частота ШИМ пространственного вектора напряжения составила 2,0 кГц, а частота основной гармоники на выходе инвертора принята равной 50 Гц.

В отношении критерия СФ-напряжения необходимо отметить, что во всех трех гибридных ПП используются комбинации состояния, вызывающие достаточ-

но высокие уровни СФ-напряжения $\pm U_d/3$. Примером этого являются комбинации состояний [ONN] и [POO] для сектора I (см. **рис. 4–6**). Следовательно, в дальнейшем нет необходимости проводить анализ по данному критерию.

Переключение при переходе между сегментами и секторами VI, I, II для любого варианта гибридной ПП показаны на **рис. 7**. Знаками дополнительных пар переключений силовых ключей являются подчеркнутые состояния, расположенные вблизи границ сегментов и секторов. Отсюда можно определить общее число дополнительных пар переключений за один период основной частоты, результаты которого приведены в **табл. 2**.

Из **табл. 2** видно, что за период основной частоты последовательности Г1-ПП и Г3-ПП требует соответственно 12 и 6 дополнительных пар переключений силовых ключей в диапазоне коэффициента модуляции μ от 0 до 1; а Г2-ПП – 6 пар переключений при изменении μ от 0 до r_2 и от 18 до 24 пар переключений при изменении μ от r_2 до 1 (здесь r_2 определяется, как показано на **рис. 7**). Следовательно, по критерию коммутационных потерь последовательность Г3-ПП является наиболее оптимальной из всех гибридных ПП (см. **табл. 2**).

Для объективного сравнения трех гибридных ПП по критерию коммутационных потерь на **рис. 8** приведены зависимости относительного снижения числа пар переключений силовых ключей $n_{\text{пк}}$ по отношению к Г1-ПП при $\lambda = 0$ (используется только семиступенчатая ПП):

$$n_{\text{пк}} = \frac{N_{\text{пк}}}{N_{\text{пк}}(\text{Г1-ПП}, \lambda=0)} \cdot 100\%, \quad (4)$$

в зависимости от коэффициента модуляции μ и различных значений коэффициентов регулирования $\lambda = 0; 1$ и $0,5$. Здесь $N_{\text{пк}}$ – число пар переключений силовых ключей за один период основной гармоники напряжения на выходе инвертора. В качестве сравнения в показателе $n_{\text{пк}}$ была выбрана последовательность Г1-ПП при $\lambda = 0$, так как при данных условиях в

системе наблюдается наибольшее количество переключений силовых ключей.

Анализ зависимостей $n_{\text{пк}} = f(\mu)$ (см. **рис. 8**) позволяет сделать следующие выводы:

- при использовании только семиступенчатой ПП ($\lambda = 0$) относительная величина $n_{\text{пк}}$ достигает максимального значения 100% для Г1-ПП и уменьшается до 97,62% для Г2-ПП и Г3-ПП (см. **рис. 8, а**), так как в семиступенчатой ПП для формирования пространственного вектора напряжения $\bar{U}_s$ используется три уровня переключений на каждом периоде ШИМ или шесть переключений базовых векторов (см. **рис. 4–6**);

- при использовании только пятиступенчатой ПП ($\lambda = 1$) относительная величина $n_{\text{пк}}$ снижается до значений от 65,87% для Г2-ПП и Г3-ПП до 68,25% для Г1-ПП и Г2-ПП (см. **рис. 8, б**). Это объясняется тем, что в пятиступенчатой ПП для формирования пространственного вектора напряжения $\bar{U}_s$ используется всего два уровня переключений на каждом периоде ШИМ или четыре переключения базовых векторов (см. **рис. 4–6**);

- при $\lambda = 0,5$ (см. **рис. 8, в**) значение $n_{\text{пк}}$ сильно зависит от коэффициента модуляции μ и изменяется в диапазоне от 68,25 до 100% для Г1-ПП и от 65,87 до 97,62% для Г2-ПП и Г3-ПП. При коэффициенте модуляции μ в районе 0,5 величина $n_{\text{пк}}$ достигает наибольшего значения, что объясняется значительным расширением области работы семиступенчатой ПП при сокращении области работы пятиступенчатой ПП. Полученные результаты также согласуются с данными, приведенными в **табл. 2**. Так, среднее значение переключений силовых ключей во всем диапазоне изменения коэффициента модуляции μ составляет $\bar{n}_{\text{пк}(1)} = 81,07\%$ для Г1-ПП, $\bar{n}_{\text{пк}(2)} = 80,39\%$ для Г2-ПП и $\bar{n}_{\text{пк}(3)} = 78,68\%$ для Г3-ПП. Сравнение полученных зависимостей (см. **рис. 8**) также показывает, что количество пар переключений силовых ключей $n_{\text{пк}}$ сильно зависит от коэффициента регулирования λ , который изменяет соотношение между включением пяти- и семиступенчатых ПП в гибридных ПП.

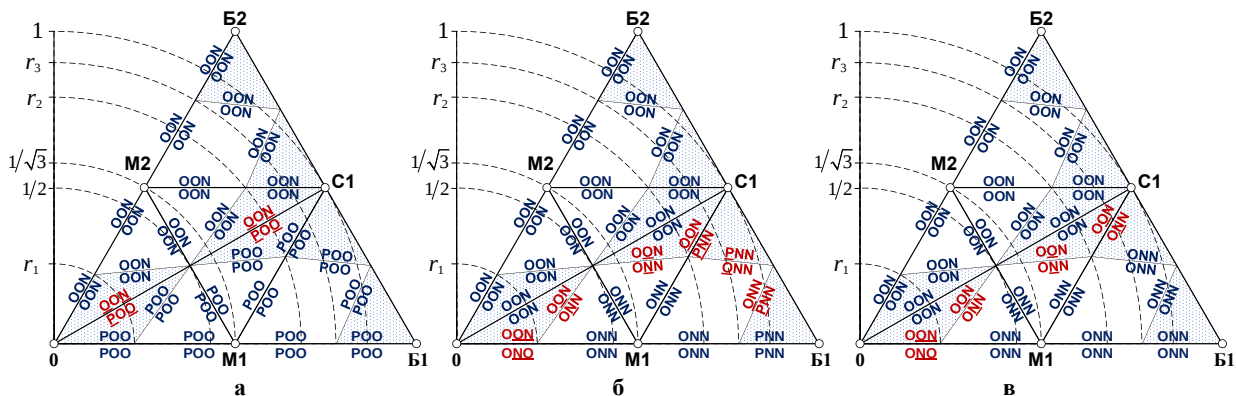
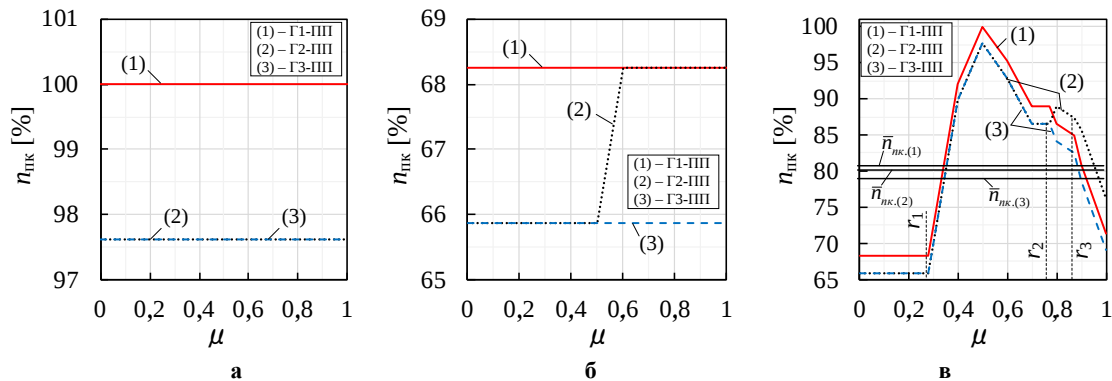


Рис. 7. Переключения силовых ключей при переходе между сегментами и секторами для гибридных последовательностей: а – Г1-ПП; б – Г2-ПП; в – Г3-ПП

Общее число дополнительных пар переключений силовых ключей за один период основной частоты инвертора

Тип ПП	Условие изменения коэффициента модуляции μ						Рост числа переключений по сравнению с ГЗ-ПП
	$(0; r_1]$	$(r_1; \frac{1}{2}]$	$(\frac{1}{2}; \frac{1}{\sqrt{3}}]$	$(\frac{1}{\sqrt{3}}; r_2]$	$(r_2; r_3]$	$(r_3; 1]$	
Г1-ПП	12	12	12	12	12	12	36
Г2-ПП	6	6	6	6	18	24	30
ГЗ-ПП	6	6	6	6	6	6	0

Рис. 8. Графики зависимостей относительного снижения числа пар переключений силовых ключей $n_{нк}$ при изменении коэффициента модуляции μ и различных значениях коэффициента регулирования: а – $\lambda = 0$; б – $\lambda = 1$; в – $\lambda = 0,5$

Таким образом, по критерию коммутационных потерь ГЗ-ПП является наиболее оптимальной из всех гибридных ПП. Но даже в этом случае различия между этими тремя вариантами в общем числе дополнительных пар переключений силовых ключей за один период основной частоты остаются незначительными, особенно при высоком значении частоты $f_{ш\text{им}}$.

Степень дисбаланса напряжения НТ характеризует относительная ошибка отклонения напряжения НТ, которая определяется согласно следующему выражению:

$$\delta u_{\text{НТ}} = \frac{u_{\text{НТ}} - U_d/2}{U_d/2} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $u_{\text{НТ}} = u_{\text{Cд1}}$ – напряжение нейтральной точки (см. рис. 1).

На рис. 9 приведены временные диаграммы относительной ошибки напряжения НТ $\delta u_{\text{НТ}}$ для последовательности ГЗ-ПП при коэффициенте модуляции $\mu = 0,8$. Включение только пятиступенчатой ПП ($\lambda = 1$) вызывает сильный дисбаланс напряжения НТ с максимальной относительной ошибкой $|\delta u_{\text{НТ}}|_{\text{max}} = 100\%$ (рис. 9, а). Это связано с тем, что в сегментах 2 и 4 любого сектора для модуляции пространственного вектора напряжения $\bar{U}_s$ используются только комбинации состояния N-типа малых базовых векторов. Семиступенчатая ПП ($\lambda = 0$) заметно улучшает баланс напряжения НТ по сравнению с пятиступенчатой ПП $|\delta u_{\text{НТ}}|_{\text{max}} = 5,1\%$ (рис. 9, б). Однако при использовании обоих типов ПП в гибридной последовательности ГЗ-ПП ($\lambda = 0,5$) значение $|\delta u_{\text{НТ}}|_{\text{max}}$ достигает 42,5%, то есть также возникает сильный дисба-

ланс напряжения НТ. Следовательно, в соответствии с критерием баланса напряжения НТ последовательность ГЗ-ПП является запрещенной для управления 3У АИН с ФНТ.

Для выбора оптимальной гибридной ПП из оставшихся двух вариантов (Г1-ПП, Г2-ПП) на рис. 10 построены зависимости максимальной относительной ошибки напряжения НТ $|\delta u_{\text{НТ}}|_{\text{max}}$ от коэффициента модуляции μ при тех же значениях коэффициента регулирования $\lambda = 1; 0$ и $0,5$.

Анализ зависимостей $|\delta u_{\text{НТ}}|_{\text{max}} = f(\mu)$ (см. рис. 10) позволяет сделать следующие выводы:

- для любых коэффициентов регулирования $\lambda = 1; 0$ и $0,5$ ошибка напряжения НТ $|\delta u_{\text{НТ}}|_{\text{max}}$ для последовательности Г1-ПП всегда меньше, чем для Г2-ПП во всем диапазоне изменения коэффициента модуляции μ от 0 до 1. Поэтому последовательность Г1-ПП обеспечивает улучшение баланса напряжения НТ по сравнению с Г2-ПП. Таким образом, в соответствии с критериями баланса напряжения НТ Г1-ПП выбрана как оптимальная гибридная ПП;

- среднее значение ошибки напряжения НТ $|\overline{\delta u_{\text{НТ}}}|_{\text{max}}$ во всем диапазоне изменения коэффициента модуляции μ для Г1-ПП при $\lambda = 1$ (используется только пятиступенчатая ПП) составляет 4,4%, а при $\lambda = 0$ (используется только семиступенчатая ПП) – 2,4%. Уменьшение средней ошибки объясняется тем, что в семиступенчатой ПП для компенсации ошибки $|\delta u_{\text{НТ}}|_{\text{max}}$ за один период квантования $T_{\text{ш\text{им}}}$ используется равномерное распределение комбинаций состояний P- и N-типов малых базовых векторов с большей длительностью включения, а в пятиступенчатой ПП используется только один из двух P- и N-типов малых векторов.

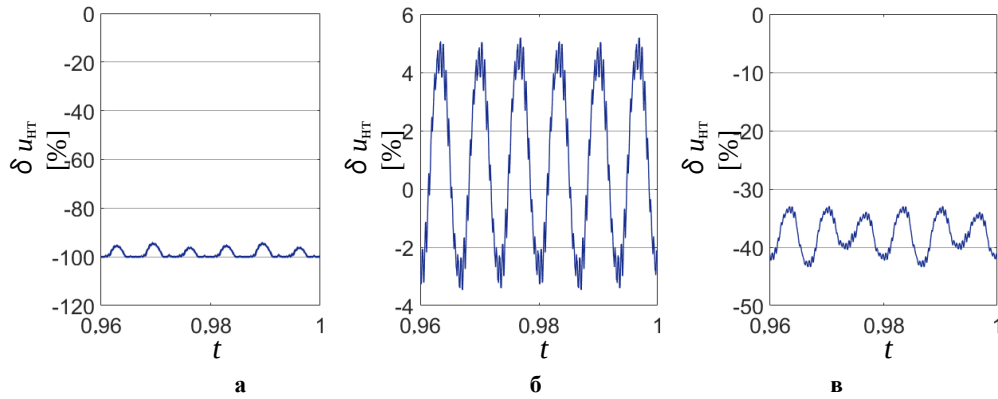


Рис. 9. Временные диаграммы относительной ошибки напряжения НТ δu_{HT} для последовательности ГЗ-ПП при $\mu = 0,8$ и различных коэффициентах регулирования: а – $\lambda = 1$; б – $\lambda = 0$; в – $\lambda = 0,5$

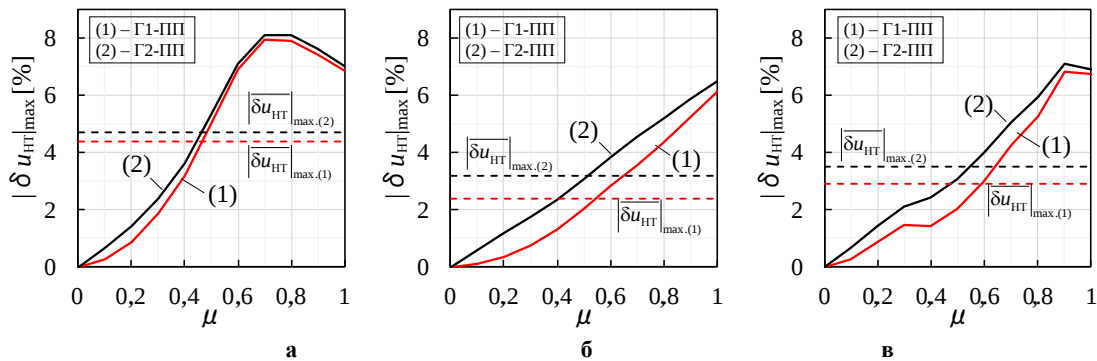


Рис. 10. Графики зависимостей максимальной ошибки напряжения НТ $|\delta u_{HT}|_{max}$ при изменении коэффициента модуляции μ и различных значениях коэффициента регулирования: а – $\lambda = 1$; б – $\lambda = 0$; в – $\lambda = 0,5$

Поэтому семиступенчатая ПП обеспечивает наилучший баланс напряжения НТ и повышает эффективность и надежность инвертора;

– среднее значение ошибки напряжения НТ $|\delta u_{HT}|_{max}$ во всем диапазоне изменения коэффициента модуляции μ для последовательности Г1-ПП при $\lambda = 0,5$ составляет 2,9%, что весьма близко по значению к семиступенчатой ПП ($\lambda = 0$), что достигается за счет включения семиступенчатой ПП, которая компенсирует рост отклонения ошибки НТ вследствие работы пятиступенчатой ПП. Таким образом, на уровень ошибки напряжения НТ $|\delta u_{HT}|_{max}$ сильное влияние оказывает коэффициент регулирования λ .

На рис. 11 приведены зависимости коэффициента искажения высших гармоник тока THDi на выходе инвертора при изменении коэффициента модуляции μ и тех же значениях коэффициента регулирования $\lambda = 1$; 0 и 0,5. Из рис. 11 видно, что коэффициенты искажения THDi для двух вариантов Г1-ПП и Г2-ПП совпадают, когда используется только пятиступенчатая ПП ($\lambda = 1$) (рис. 11, а) или семиступенчатая ПП ($\lambda = 0$) (рис. 11, б), а также гибридная ПП ($\lambda = 0,5$) (рис. 11, в).

Однако, как видно из рис. 12, при применении Г1-ПП кривая выходного напряжения инвертора симметрична относительно горизонтальной оси после угловой продолжительности π для заданного значения коэффициента модуляции μ , то есть $u_{ab}(\omega t) = -u_{ab}(\omega t + \pi)$ (рис. 12, а).

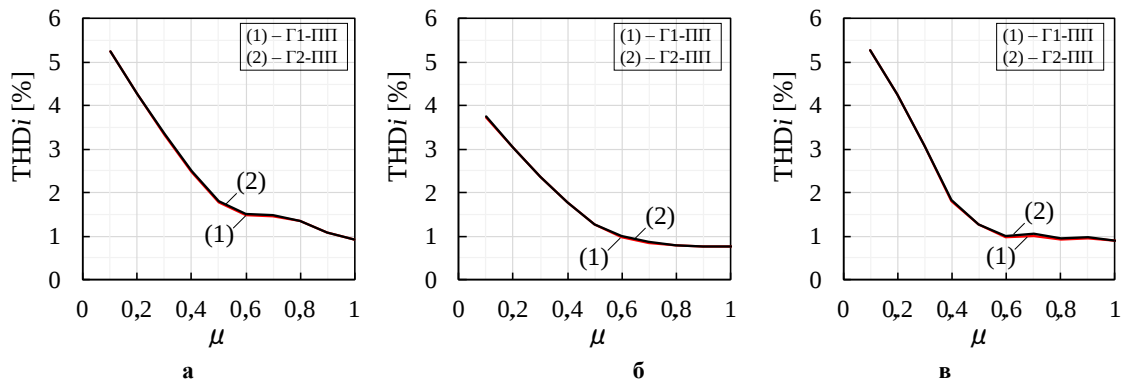


Рис. 11. График зависимостей коэффициента искажения высших гармоник тока THDi на выходе инвертора при изменении коэффициента модуляции μ и различных значениях коэффициента регулирования: а – $\lambda = 1$; б – $\lambda = 0$; в – $\lambda = 0,5$

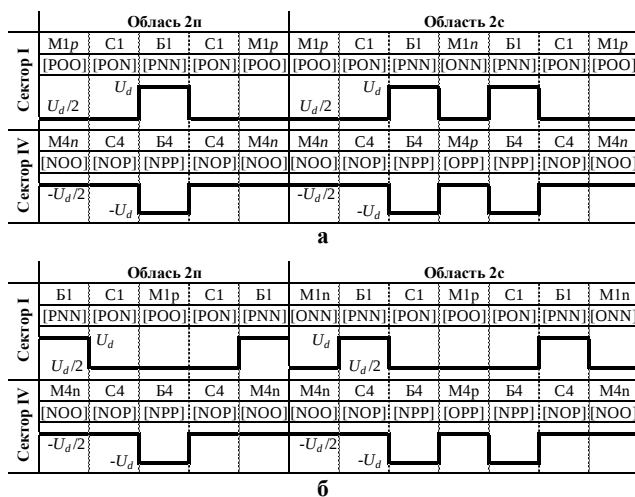


Рис. 12. Кривые выходного линейного напряжения инвертора u_{ab} для гибридных последовательностей: а – Г1-ПП; б – Г2-ПП

Это позволяет устранить четные гармоники в спектре напряжения на выходе инвертора при использовании последовательности Г1-ПП. В то время как последовательность Г2-ПП не обеспечивает такой особенности (рис. 12, б). Поэтому с точки зрения критерия качества выходного напряжения и тока инвертора гибридную последовательность Г1-ПП также следует считать оптимальной.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обобщенный состав программно-технического обеспечения лабораторного оборудования представлен на рис. 13, а. Параметры лабораторного оборудования представлены в табл. 3. IGBT-модули трёхуровневого инвертора управляются микропроцессором совместно с FPGA. FPGA включает в себя аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и модули ШИМ. На микропроцессоре реализована система управления напряжением преобразователя. Наборы базовых векторов ПВШИМ загружались в память микропроцессора в offline-режиме. Для визуализации переходных процессов мгновенных значений электрических сигналов напряжения преобразователя использовалось программное обеспечение WindowsTM, пример показан на рис. 13, б.

Таблица 3

Технические данные лабораторного оборудования

IGBT-модули	P924F33 Vincotech; напряжение 600 В; номинальный ток 30 А; максимальная частота переключений 50 кГц.
Сеть	Линейное напряжение 380 В, частота 50 Гц
Ёмкость DC	1034 мкФ (на одну стойку); максимальное напряжение 450 В
Датчики токов	LEM HLSR 20-P/SP33; диапазон ± 20 А; частота пропускания 450 кГц; ошибка измерения $\pm 0,5\%$
Датчики напряжений	Avago ACPL-C87B; частота пропускания 25 кГц; ошибка измерения, $\pm 0,1\%$
FPGA	Xilinx XC9536XL-10VQG44C
Микропроцессор	TMS320C28346, 300 МГц, 256 MB NOR flash memory, 2 MB RAM и 300 MIPS

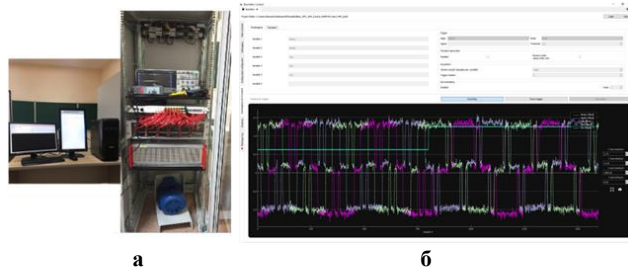


Рис. 13. Лабораторное оборудование для проведения экспериментальных исследований: а – фотография общего вида; б – графическое программное обеспечение BoomBox на базе WindowsTM

При помощи лабораторного оборудования (см. рис. 13, а) были сняты зависимости количества переключений силовых транзисторов $n_{пк}$ и максимальной ошибки напряжения НТ $|\delta u_{НТ}|_{\max}$ при изменении коэффициента модуляции μ для гибридной последовательности Г1-ПП при $\lambda = 0,5$. Результаты исследований показали, что ошибка экспериментальных данных по сравнению с моделью по количеству пар переключений силовых ключей не превышает 1,0%, а по максимальной ошибке напряжения НТ – не больше 2%, что объясняется расхождением параметров частоты ШИМ и емкостей конденсаторов звена постоянного тока инвертора в модели и эксперименте. Это подтверждает достоверность теоретических результатов исследований, показанных в статье.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью улучшения основных показателей в системе (качества выходного тока инвертора, уровня напряжения нейтральной точки и коммутационных потерь силовых ключей) в данной статье предложен новый алгоритм ПВШИМ с гибридной ПП, построенной на основе известных комбинаций пяти- и семиступенчатой ПП. Были предложены три варианта гибридных последовательностей переключений: Г1-ПП, Г2-ПП и Г3-ПП и проведен их сравнительный анализ при помощи компьютерного моделирования в среде MatLab+Simulink. На основе проведенного анализа были сделаны следующие выводы:

– Гибридная последовательность Г3-ПП по сравнению с другими двумя вариантами обеспечивает наименьшее количество пар переключений силовых ключей за один период основной частоты инвертора. При этом с ростом частоты ШИМ данное преимущество становится незначительным, так как увеличение числа пар переключений обусловлено только дополнительным переключением базовых векторов при переходе между секторами и сегментами, тогда как подавляющая часть времени приходится на работу внутри каждого сектора или сегмента. Также выяснено, что последовательность Г3-ПП вызывает сильный дисбаланс напряжения НТ и, поэтому она не может использоваться для управления трехуровневым инвертором.

– Гибридная последовательность Г1-ПП является оптимальной и рекомендуется для управления трехуровневым инвертором, так как она обеспечивает наилучший баланс напряжения нейтральной точки и позволяет исключить чётные гармоники из спектра выходного напряжения инвертора.

– На количество пар переключений силовых ключей инвертора и уровень напряжения НТ в предложенном алгоритме ПВШИМ с гибридной ПП сильное влияние оказывает коэффициент регулирования λ . Так, например, при $\lambda = 0,5$ количество переключений силовых ключей уменьшается в среднем на 18,93% при сохранении баланса напряжения НТ и качества кривой на выходе инвертора на допустимом уровне, близком к семиступенчатой ПП ($\lambda = 0$) (отклонения не превышают значений 0,5 и 0,3% соответственно).

– При помощи лабораторного оборудования было проведено сравнение экспериментальных данных с компьютерной моделью для алгоритма ПВШИМ с гибридной последовательностью Г1-ПП при $\lambda = 0,5$. Результаты исследований показали, что ошибка экспериментальных данных по сравнению с моделью по количеству пар переключений силовых ключей не превышает 1,0%, а по максимальной ошибке напряжения НТ не больше 2%, что подтверждает достоверность теоретических результатов исследований, полученных в статье.

Таким образом, предложенный алгоритм ПВШИМ с Г1-ПП является эффективным инструментом для управления трехуровневым инвертором напряжения, что благоприятно сказывается на его энергосбережении, массогабаритных показателях и эксплуатационной надежности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых – кандидатов наук МК-3803.2022.4.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Medium-Voltage Multilevel Converters–State of the Art, Challenges, and Requirements in Industrial Applications / A.-R. Haitham, H. Joachim, R. Jose, B. Ge // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57(8). Pp. 2581-2596. doi: 10.1109/TIE.2010.2043039
2. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики / Н. Донской, А. Иванов, В. Матисон, И. Ушаков // Силовая электроника. 2008. № 1. С. 43-46.
3. Gorozhankin A.N., Dudkin M.M. Algorithms and Control Systems for Electric Drives of Cold Pipe-Rolling Mills // Russian Electrical Engineering. 2020. Vol. 91(7). Pp. 440-446. doi: 10.3103/S1068371220070068
4. Schweizer M., Friedli T., Kolar J.W. Comparative evaluation of advanced three-phase three-level inverter/converter topologies against two-level systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. Vol. 60(12). Pp. 5515-5527. doi: 10.1109/TIE.2012.2233698
5. Steinke J.K., Steimer P.K. Medium voltage drive converter for industrial applications in the power range from 0.5 MW to 5 MW based on a three-level converter equipped with IGCTs // IEE Seminar PWM Medium Voltage Drives (Ref. No. 2000/063). IET, 2000. doi: 10.1049/ic:20000338
6. Akira N., Isao T., Hirofumi A. A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter // IEEE Transactions on Industry Applications. 1981. Vol. IA-17(5). Pp. 518-523. doi: 10.1109/TIA.1981.4503992
7. Klug R.-D., Klaassen N. High power medium voltage drives - innovations, portfolio, trends // European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2005. doi: 10.1109/EPE.2005.219669
8. Шишков А.Н., Ле В.К., Дудкин М.М. Сравнительный анализ методов широтно-импульсной модуляции для трехуровневого инвертора напряжения с фиксированной нейтральной точкой // Наука, техника, педагогика высшей школы. Новые технологии = Science, Engineering, Higher Education Pedagogics. New Technologies: материалы Всероссийской науч.-практической конф. М.: Моск. политехн. ун-т, 2022. С. 303-313.
9. Space vector modulation for neutral point clamped multi-level inverter with even order harmonic elimination / D.W. Feng, B. Wu, S. Wei, D. Xu // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. IEEE, 2004. Pp. 1471-1475. doi: 10.1109/CCECE.2004.1349682
10. Sanjiba K.B., Nirmal K.A. SHE PWM technique for three phase three level voltage source inverter // IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI). IEEE, 2017. Pp. 1742-1746. doi: 10.1109/ICPCSI.2017.8392012
11. Белоусов И.В., Самосейко В.Ф., Бровцинова Л.М. Сравнительный анализ методов широтно-импульсной модуляции // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2018. № 2(10). С. 420-429. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-420-429
12. Space voltage vector-based new PWM method for large capacity three-level GTO inverter / M. Koyama, T. Fujii, R. Uchida, T. Kawabata // Proceedings of the 1992 International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation. IEEE, 2002. Pp. 271-276. doi: 10.1109/IECON.1992.254621
13. Wu B., Mehdi N. High-Power Converters and AC Drives Second Edition. Wiley-IEEE Press, 2016. 480 p.
14. A SVPWM control strategy for NPC three-level inverter / Q. Keqing, J. Xi, X. Yuehong, D. Zuojin, C. Wendong // IEEE Power Electronics and Automation Conference. IEEE, 2011. Pp. 256-259. doi: 10.1109/PEAM.2011.6134849
15. Шишков А.Н., Дудкин М.М., Ле В.К. Влияние последовательностей переключений на баланс напряжения нейтральной точки в трехуровневом инверторе напряжения // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. № 2(17). doi: 10.17816/2074-0530-125204
16. The nearest three virtual space vector PWM - a modulation for the comprehensive neutral-point balancing in the three-level NPC inverter / S. Busquets-Monge, J. Bordonau, D. Boroyevich, S. Somavilla // IEEE Power Electronics Letters. 2004. Vol. 2(1). Pp. 11-15. doi: 10.1109/LPEL.2004.828445
17. Neutral Point Voltage Balance Based on Space-Vector PWM with Five-Stage Sequence for Three-Level Voltage Inverter / A.N. Shishkov, M.M. Dudkin, V.K. Le, N.A. Eremin // International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). IEEE, 2023. Pp. 586-592. doi: 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110815
18. Mohan M.R., Hiralal M.S. Three-Dimensional Space-Vector Modulation to Reduce Common-Mode Voltage for Multi-level Inverter // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57(7). Pp. 2324-2331. doi: 10.1109/TIE.2009.2027247

Поступила в редакцию 18 июля 2023 г.

Принята к печати 28 августа 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

OPTIMAL HYBRID SWITCHING SEQUENCE FOR A THREE-LEVEL VOLTAGE INVERTER WITH SPACE-VECTOR PWM

Alexander N. Shishkov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of a Department, Department of Electrical Systems and Industrial Electronics, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, shan1982@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9851-8745>

Maksim M. Dudkin

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Drive and Mechatronics, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia, dudkinmax@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4876-8775>

Aleksandr S. Maklakov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Senior Research Scientist, Research and Innovation Office, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia, alexandr.maklakov.ru@ieee.org, <https://orcid.org/0000-0001-7950-708X>

Van Kan Le

Post Graduate Student, Department of Electrical Systems and Industrial Electronics, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, canhlv.mta@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-5183-6077>

The three-level neutral point clamped (NPC) voltage source inverter (VSI) has recently gained wide application in high-voltage variable frequency drives, as well as in power supply systems as a direct-to-alternating current converter. When operating this inverter, it is necessary to meet numerous technical requirements, including four primary criteria: output voltage (current) waveform quality, switching losses, neutral point (NP) voltage balance, and common-mode (CM) voltage. To enhance the aforementioned criteria, this paper introduces a space-vector PWM (SVPWM) algorithm with a hybrid switching sequence (SS), based on known combinations of five- and seven-stage SS. Three versions of hybrid switching sequences: H1-SS, H2-SS, and H3-SS, were proposed and their comparative analysis was carried out using computer modeling in MatLab+Simulink. Based on the experimental dependencies analysis of the total harmonic distortion (THD) of the inverter output current, the number of power key switching pairs, the maximum error of the NP voltage, and the level of the CM voltage from the inverter modulation coefficient and the regulation coefficient of the hybrid SS, the optimal hybrid SS, which turned out to be H1-SS, was determined. It ensures the best NP voltage balance and excludes even-order harmonics from the inverter output voltage spectrum. Thus, the proposed SVPWM algorithm with H1-SS proves to be an efficient tool for controlling the three-level VSI, positively affecting its energy conservation, size-weight indicators, and operational reliability.

Keywords: three-level neutral point clamped voltage source inverter, neutral point voltage, common-mode voltage, switching losses, space-vector PWM, hybrid switching sequence

REFERENCES

- Haitham A.-R., Joachim H., Jose R., Ge B. Medium-Voltage Multilevel Converters—State of the Art, Challenges, and Requirements in Industrial Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010, vol. 57(8), pp. 2581-2596. doi: 10.1109/TIE.2010.2043039
- Donskoy N., Ivanov A., Matisson V., Ushakov I. Multi-level autonomous inverters for electric drives and power engineering. *Silovajaj elektronika* [Power Electronics], 2008, no. 1, pp. 43-46. (In Russian)
- Gorzhankin A.N., Dudkin M.M. Algorithms and Control Systems for Electric Drives of Cold Pipe-Rolling Mills. *Russian Electrical Engineering*. 2020, vol. 91(7), pp. 440-446. doi: 10.3103/S1068371220070068
- Schweizer M., Friedli T., Kolar J.W. Comparative evaluation of advanced three-phase three-level inverter/converter topologies against two-level systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013, vol. 60(12), pp. 5515-5527. doi: 10.1109/TIE.2012.2233698
- Steinke J.K., Steimer P.K. Medium voltage drive converter for industrial applications in the power range from 0.5 MW to 5 MW based on a three-level converter equipped with IGBTs. *IEE Seminar PWM Medium Voltage Drives* (Ref. No. 2000/063). IET, 2000. doi: 10.1049/ic:20000338
- Akira N., Isao T., Hirofumi A. A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1981, vol. IA-17(5), pp. 518-523. doi: 10.1109/TIA.1981.4503992
- Klug R.-D., Klaassen N. High power medium voltage drives - innovations, portfolio, trends. *European Conference on Power Electronics and Applications*. IEEE, 2005. doi: 10.1109/EPE.2005.219669
- Shishkov A.N., Le V.K., Dudkin M.M. Comparative analysis of pulse-width modulation methods for a three-level neutral point clamped voltage source inverter. *Nauka, tekhnika, pedagogika vysshey shkoly. Noveye tekhnologii = Science, engineering, higher education pedagogics. New technologies* [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Science, Engineering, Higher Education Pedagogics. New Technologies"]. Moscow, "Moscow Polytechnic University" Publ., 2022, pp. 303-313. (In Russian)
- Feng D.W., B. Wu, S. Wei, D. Xu Space vector modulation for neutral point clamped multilevel inverter with even order harmonic elimination. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. IEEE, 2004, pp. 1471-1475. doi: 10.1109/CCECE.2004.1349682
- Sanjiba K.B., Nirmal K.A. SHE PWM technique for three phase three level voltage source inverter. *IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*. IEEE, 2017, pp. 1742-1746. doi: 10.1109/ICPCSI.2017.8392012
- Belousov I.V., Samoseyko V.F., Brovtsinova L.M. Comparative analysis of pulse-width modulation methods. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova* [Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova], 2018, no. 2(10), pp. 420-429. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-420-429 (In Russian)

12. Koyama M., Fujii T., Uchida R., Kawabata T. Space voltage vector-based new PWM method for large capacity three-level GTO inverter. Proceedings of the 1992 International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation. IEEE, 2002, pp. 271-276. doi: 10.1109/IECON.1992.254621
13. Wu B., Mehdi N. High-Power Converters and AC Drives Second Edition. Wiley-IEEE Press, 2016. 480 p.
14. Keqing Q., Xi J., Yuehong X., Zuojin D., Wendong C. A SVPWM control strategy for NPC three-level inverter. IEEE Power Engineering and Automation Conference. IEEE, 2011, pp. 256-259. doi: 10.1109/PEAM.2011.6134849
15. Shishkov A.N., Dudkin M.M., Le V.K. Influence of switching sequences on the neutral point voltage balance in a three-level voltage inverter. *Izvestija MGTU «MAMI»* [Izvestiya MGTU "MAMI"], 2023, no. 2(17), doi: 10.17816/2074-0530-125204 (In Russian)
16. Busquets-Monge S., Bordonau J., Boroyevich D., Somavilla S. The nearest three virtual space vector PWM - a modulation for the comprehensive neutral-point balancing in the three-level NPC inverter. IEEE Power Electronics Letters. 2004, vol. 2(1), pp. 11-15. doi: 10.1109/LPEL.2004.828445
17. Shishkov A.N., Dudkin M.M., Le V.K., and Eremin N.A. Neutral Point Voltage Balance Based on Space-Vector PWM with Five-Stage Sequence for Three-Level Voltage Inverter. International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). IEEE, 2023, pp. 586-592. doi: 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110815
18. Mohan M.R., Hiralal M.S. Three-Dimensional Space-Vector Modulation to Reduce Common-Mode Voltage for Multi-level Inverter. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010, vol. 57(7), pp. 2324-2331. doi: 10.1109/TIE.2009.2027247

Оптимальная гибридная последовательность переключения для трехуровневого инвертора напряжения с пространственно-векторной ШИМ / А.Н. Шишков, М.М. Дудкин, А.С. Маклаков, В.К. Ле // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 3(60). С. 61-71. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-61-71](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-61-71)

Shishkov A.N., Dudkin M.M., Maklakov A.S., Le V.K. Optimal Hybrid Switching Sequence for a Three-Level Voltage Inverter with Space-Vector PWM. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 3(60), pp. 61-71. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-61-71](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-61-71)

ОБНАРУЖЕНИЕ РАННЕЙ СТАДИИ ОСЛАБЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ КРЕПЛЕНИЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ СИНГУЛЯРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПОТРЕБЛЯЕМОГО ТОКА

Одной из ключевых задач для достижения улучшенных показателей энергопотребления и энергоэффективности при эксплуатации электромеханических систем с асинхронным электроприводом является разработка надёжных систем диагностики и оценка технического состояния электромеханического оборудования. Диагностика на основе интеллектуальных подходов с применением инструментов машинного обучения позволяет построить упреждающую систему для заблаговременного обнаружения дефектов оборудования и сокращения эксплуатационных расходов. В статье представлено последовательное применение сингулярного спектрального анализа (Singular Spectrum Analysis – SSA) и сингулярного разложения гармонических сигналов (Singular Value Decomposition – SVD) для обнаружения неисправностей асинхронных двигателей. Данный подход выбран на основе проведённого исследования в области методов токовой диагностики и методов анализа временных рядов. Выполнено описание математического аппарата предложенного метода с разработкой алгоритма обработки сигналов тока и напряжения. Выявление ранних стадий возникновения дефекта позволяет расширить спектр диагностируемых дефектов и неисправностей. Апробации методов выполнены на экспериментальном лабораторном стенде электропривода с разработанной системой регистрации данных. Всего в работе рассматривается четыре состояния машины при вариации нагрузки, обработка сигналов которых выполнена на языке программирования Python. Для оценки результатов разложения обобщённого тока исследуются уровень вклада и оценка миграции характерных компонент, разделённых категориально. Изменения поведения и вкладов кумулятивного вклада двух категорий демонстрируют начало появления дефекта и позволяют дифференцировать состояния машины. Таким образом, результаты эксперимента по ослаблению болтовых креплений электродвигателя доказывают эффективность применения данной методики диагностики.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, токовая диагностика, диагностика неисправностей, сингулярное разложение, SVD, компоненты сигнала, техническое состояние, мониторинг

ВВЕДЕНИЕ

Электропривод, как ключевое звено любого промышленного предприятия, определяет себестоимость конечного продукта, складывающуюся из технологической эффективности. Классические алгоритмы управления (скалярное, векторное и прямое управление моментом) позволяют достичь определённых качественных показателей регулирования, однако при эксплуатационном износе и возникновении дефектов снижаются энергетические и механические характеристики электропривода [1, 2]. Решение данной проблемы осуществляется за счёт реализации интеллектуальных систем управления, базирующихся на нейронных сетях, машинном обучении и других цифровых технологиях [3-5].

В рамках промышленного перехода к интеллектуальным системам, в частности при интеллектуализации электроприводных систем, удастся достигнуть оптимальных энергопотребления, настроек систем управления и технологических процессов с формированием упреждающего управления без участия человека [6]. Одной из задач для осуществления перехода стоит разработка быстродействующих и достоверных систем диагностики и оценки технического состояния электромеханического оборудования [7, 8].

Положительно зарекомендовали себя методы на основе анализа электрических координат (тока, напряжения, потокосцепления, мощности), включающие анализ среднеквадратических значений [9] и огибающих [10], спектральный анализ с применением различ-

ных оконных функций [11], вейвлет преобразования [12] и анализ годографов обобщённых векторов [13, 14]. Относительно других контролируемых параметров (температуры, шума, вибрации и др.) средства токовой диагностики обладают следующими преимуществами:

- не требуют непосредственного доступа к электромеханическому оборудованию;
- не требуют дополнительной доработки модернизации диагностируемого оборудования для установки датчиков;
- обладают широким потенциалом в количестве диагностируемых электрических и механических узлов.

Наряду с преимуществами остаются нерешёнными задачи определения вида дефекта, установления его уровня и локализации места возникновения с оценкой влияния на параметры привода.

Механические повреждения являются одними из наиболее часто встречаемых источников отказов электромеханического оборудования и составляют более 30% случаев [15], и одной из основных причин, приводящих к отказам, служит некачественная установка и монтаж – 12,9 % [16].

К механическим причинам возникновения вибраций электродвигателей относится ослабление креплений, при этом уровень вибраций близок к шуму, и нормированные значения зачастую проявляются уже после длительного воздействия [17, 18]. Данный вид дефекта на начальном этапе слабо идентифицируем; приводит к ускоренному ослаблению резьбовых соединений основания механизма, что влечёт постепенное разрушение фундамента и возникновение рисков

останова. Так же как и прочие динамические вибрации, ослабление креплений провоцирует возникновение механических колебаний в других узлах, провоцируя ускоренное снижение характеристик АД и технического состояния [19].

Обнаружение ослабления креплений на ранней стадии развития позволит избежать дополнительных энергетических потерь и сократить эксплуатационные расходы [20], а в дальнейшем – реализовать переход к интеллектуальным алгоритмам управления ТООР [21].

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для формирования общего подхода к идентификации различного вида дефектов необходимо перейти к обобщённой задаче исследования и разложения временных рядов. Для структурно-неустойчивых систем рекомендуется использовать методы, которые работают на переменных временных интервалах, позволяющих характеризовать систему как квазистационарную и соответствующую некоторому вектору текущих собственных динамических свойств [22].

В направлении методов исследования динамики процессов, обладающих сложной переменной структурой, в значительной степени зарекомендовал себя метод, основанный на сингулярном разложении исходной выборки (Singular Value Decomposition – SVD) [23, 24]. Этот подход довольно широко используется в задачах нахождения периодических зависимостей во временных рядах наблюдений, фильтрации шумов и сглаживания временных рядов, так как использование сингулярного разложения матрицы позволяет выделить наиболее значимые составляющие ряда и отсеять случайные возмущения [25, 26].

В последние годы SVD нашёл своё применение во многих отраслях, а также широко применяется в анализе сигналов механических систем. Так, в [27] предложен метод сингулярного разложения импульсной характеристики сигнала вибрации при исследовании дефектов подшипников, и количественно оценена связь между номером строки матрицы и шириной полосы подпространства; авторы получают последовательности коэффициента затухания двойного порядка для локализации ударов в сигнале. В работе [28] рассматривается усовершенствованный метод разложения по сингулярным числам с повторным взвешиванием (IRSVD) для анализа данных неисправного планетарного редуктора. В [29] предлагается SVD с изменённым размером матрицы для анализа сигнала вибрации, авторам удаётся выявить неисправность несоосности. Другие модификации SVD – адаптивное разложение (ASVD) и разложение с повторным взвешиванием (RSVD) – представлены в работах [30] и [31] соответственно применительно к исследованию дефектов подшипников. Однако все приведенные исследования направлены на анализ сигналов вибрации.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Метод сингулярного анализа состоит из двух основных этапов – декомпозиции и реконструкции, включающих по два шага, и таким образом в сумме содержит четыре действия (рис. 1):

– преобразование одномерного ряда в многомерный с помощью однопараметрической сдвиговой процедуры:

$$X_i = (x_{(i-1)}, \dots, x_{(i+L-1)})^T, \quad 1 \leq i \leq K; \quad (1)$$

$$X = [X_1 : \dots : X_K] = (x_{ij})_{(i,j=1)}^{(L,K)} = \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_K \\ x_2 & x_3 & x_4 & \dots & x_{K+1} \\ x_3 & x_4 & x_5 & \dots & x_{K+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_L & x_{L+1} & x_{L+2} & \dots & x_N \end{bmatrix},$$

где $X = [x_i, \dots, x_N]$ – одномерный ряд длины N ; L – мерный вектор; $K = N - L + 1$ – число последовательностей с длиной окна L , $1 < L < N$. Матрица X является ганкелевой и имеет одинаковые элементы x_{ij} на диагонали, $i + j = \text{const}$;

– исследование полученной многомерной траектории с помощью анализа главных компонент (сингулярного разложения, SVD):

$$A = U \Sigma V^T, \quad (3)$$

где $U = (u_1, u_2, \dots, u_m) \in R^{m \times m}$ – унитарная матрица левых сингулярных векторов; $V = (v_1, v_2, \dots, v_n) \in R^{n \times n}$ – унитарная матрица правых сингулярных векторов; Σ – диагональная матрица размером $m \times n$, диагональные элементы которой – неотрицательные значения сингулярных чисел матрицы A в порядке убывания, $\Sigma = [\text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m), 0] \in R^{m \times n}$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots, \sigma_m > 0$.

$$X = \sum_i X_i, \quad X_i = \sigma_i U_i V_i^T, \quad (4)$$

где $(\sqrt{\lambda_j} U_j V_j^T)$ – j -я собственная тройка сингулярного разложения;

– процедура группировки собственных троек разбивает всё множество индексов $\{1, \dots, d\}$ на m непересекающихся подмножеств $I_1, \dots, I_m$, где каждая I_j содержит несколько X_i . Пусть $I = \{i_1, \dots, i_p\} \subset \{1, \dots, d\}$, тогда результирующая матрица X_I , соответствующая группе I , определяется как $X_I = X_{i_1} + \dots + X_{i_p}$. Тогда разложение матрицы X примет следующий вид:

$$X = X_{I_1} + \dots + X_{I_m}; \quad (5)$$

– восстановление (аппроксимация) ряда по выбранным главным компонентам:

$$\tilde{y}_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{s-1} \sum_{l=1}^{s-1} y_{i,s-l}^*, & 2 \leq s \leq L^*; \\ \frac{1}{L^*} \sum_{l=1}^{L^*} y_{i,s-l}^*, & L^* \leq s \leq K^* + 1; \\ \frac{1}{N-s+2} \sum_{l=s-K^*}^{L^*} y_{i,s-l}^*, & K^* + 2 \leq s \leq N+1, \end{cases} \quad (6)$$

где $Y \in R^{L \times K}$, $1 \leq i \leq L$, $1 \leq j \leq K$. $L^* = \min(L, K)$, $K^* = \max(L, K)$ и $N = L + K - 1$, $s = i + j$.

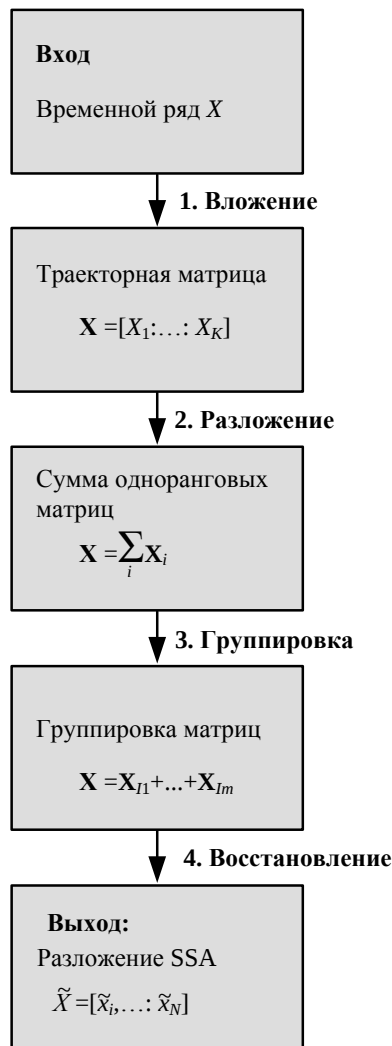


Рис. 1. Порядок сингулярного анализа

На данном этапе алгоритма с помощью диагонального усреднения каждая из матриц X_{I_m} из разложенных преобразуется обратно в форму исходного объекта X , $\tilde{X} = [\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_N]$.

Результатом применения метода является разложение временного ряда на простые компоненты: трендовые и осцилляторные, которые могут быть связаны с сезонностью, шумом.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследований выступает асинхронный двигатель (АД) АИР80В4 (табл. 1). Питание АД осуществляется от синусоидального напряжения с частотой сети 50 Гц. Вид и уровень нагрузки формируется за счёт частотного регулирования ответным АД (рис. 2) посредством полупроводникового преобразователя частоты (рис. 3).

Работа стенда осуществляется следующим образом. Исследуемый АД (см. рис. 2) и преобразователь частоты питаются (Altivar Process ATV950U22N4E) от бокса 3-х фазного синусоидального напряжения 380 В, 50 Гц (см. рис. 3).

В табл. 1 $P_{ном}$ – номинальная мощность; $I_{ном}$ – номинальный ток АД; n – скорость вращения вала; η_d – коэффициент полезного действия; $\cos \phi$ – коэффициент мощности, о.е.; λ – перегрузочная способность, о.е.; K_p – кратность пускового момента, о.е.; K_i – кратность пускового тока, о.е.

Таблица 1

Паспортные данные асинхронного двигателя

Марка двигателя	$P_{ном}, кВт$	$I_{ном}, А$	$n, об/мин$	$\cos \phi$	$\eta_d, \%$	λ	K_p	K_i
АИР80В4	1,5	3,6	1390	0,8	78,7	2,3	2,3	6,2



Рис. 2. Вид спарки исследуемого и нагрузочного АД с создаваемыми ослаблениями креплений

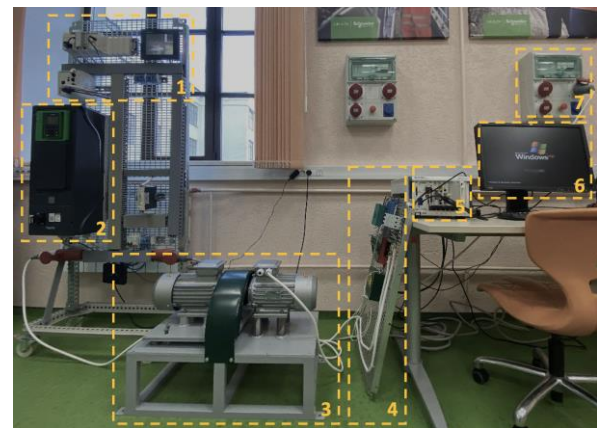


Рис. 3. Лабораторный стенд: 1-контроллер (Modicon M340); 2 – преобразователь частоты (Altivar Process ATV950U22N4E); 3 – спарка АД-АД; 4 – схема измерения датчиков тока (LA 25-NP/SP44) и датчиков напряжения (LV 25-P/SP5); 5 – шасси сбора данных (PXI-6052); 6 – персональный компьютер; 7 – ввод 380 В)

За счёт регулирования нагрузочного двигателя (см. рис. 2) ступенчато формируется момент сопротивления на валу. Токоведущие кабели исследуемого двигателя охвачены датчиками тока (LA 25-NP/SP44) [32] и напряжения (LV 25-P/SP5) [33] на эффекте Холла компенсационного типа. Выходы датчиков через конекторную плату подключены к высокочастотному АЦП (NI PXI-6251) многомодульного шасси (NI PXI-1042Q). Формирование базы данных осуществлялось на локальном сервере.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Ход эксперимента заключался в ослаблении креплений АД согласно схеме на рис. 4 с изменением нагрузки и оценкой эффективности обнаружения неисправности. Изменение нагрузки производилось ступенчато с шагом 20% от номинального значения момента $M_{ном}$ до режима холостого хода. Регистрация мгновенных значений фазных токов и напряжений на вводах электродвигателя реализована с оптимально подобранными частотой дискретизации ($f_d = 10000$ Гц) и выборки 600000 значений за 60 секунд.

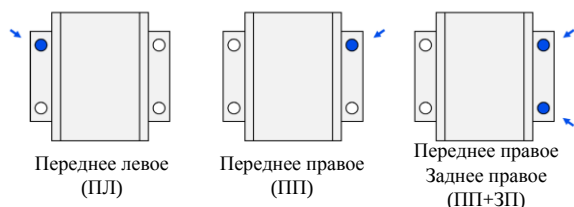


Рис. 4. Схема ослабления крепления АД вид сверху

Всего исследуется 4 набора данных, соответствующих четырём состояниям машины:

- нормальное состояние (работа исправного двигателя) в режиме холостого хода (Х.Х.), при нагрузке $0,01 \cdot M_{\text{ном}}$, $0,2 \cdot M_{\text{ном}}$, $0,4 \cdot M_{\text{ном}}$, $0,6 \cdot M_{\text{ном}}$, $0,8 \cdot M_{\text{ном}}$, $M_{\text{ном}}$;
- работа двигателя при ослаблении правого переднего крепления (ПП) в режиме (Х.Х.), при нагрузке $0,01 \cdot M_{\text{ном}}$, $0,2 \cdot M_{\text{ном}}$, $0,4 \cdot M_{\text{ном}}$, $0,6 \cdot M_{\text{ном}}$, $0,8 \cdot M_{\text{ном}}$, $M_{\text{ном}}$;
- работа двигателя при ослаблении левого переднего крепления (ЛП) в режиме (Х.Х.), при нагрузке $0,01 \cdot M_{\text{ном}}$, $0,2 \cdot M_{\text{ном}}$, $0,4 \cdot M_{\text{ном}}$, $0,6 \cdot M_{\text{ном}}$, $0,8 \cdot M_{\text{ном}}$, $M_{\text{ном}}$;
- работа двигателя при ослаблении правого переднего и правого заднего креплений (ПП+ЗП) в режиме (Х.Х.), при нагрузке $0,01 \cdot M_{\text{ном}}$, $0,2 \cdot M_{\text{ном}}$, $0,4 \cdot M_{\text{ном}}$, $0,6 \cdot M_{\text{ном}}$, $0,8 \cdot M_{\text{ном}}$, $M_{\text{ном}}$.

Обработка данных производилась с помощью языка программирования Python, для вычислений и применения SSA из каждой выборки временного ряда тока было выделено несколько отрезков, соответствующих длительности 0,4 с (4000 точек). Для исключения влияния основной гармоники и снижения влияния шумов, а также для интеграции данных измерений со всех трёх фаз было принято решение в пользу анализа модуля обобщённого вектора тока, полученного на основе преобразования Парка-Горева. Анализ спектра обобщённого тока классическими методами (БПФ) доказывает эффективность перед анализом спектра фазного тока при распознавании механических повреждений [34, 35].

Результатом выполнения процедур по формулам (1)-(6) является получение компонентного представления исходного сигнала, упорядоченного по убыванию вклада в основной сигнал (рис. 5, 6).

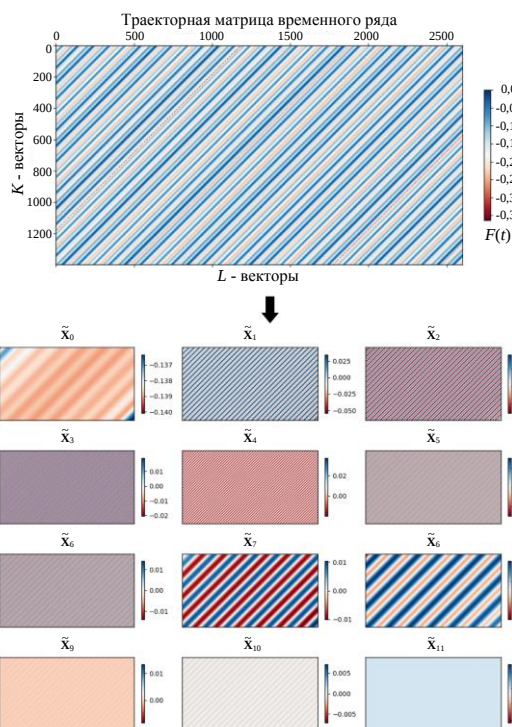
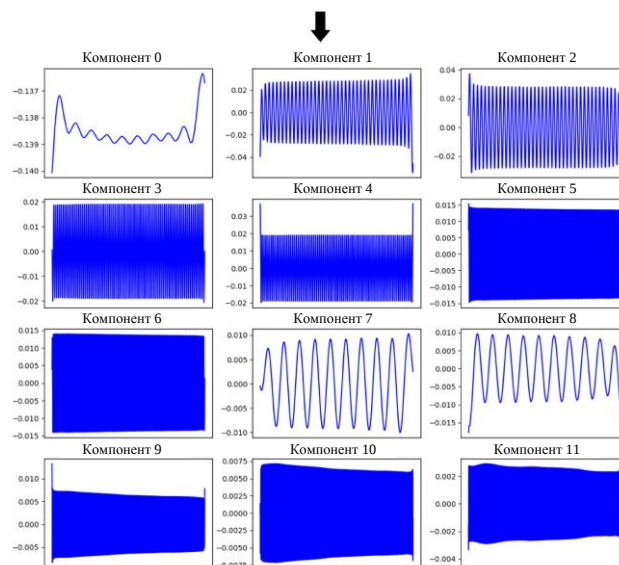
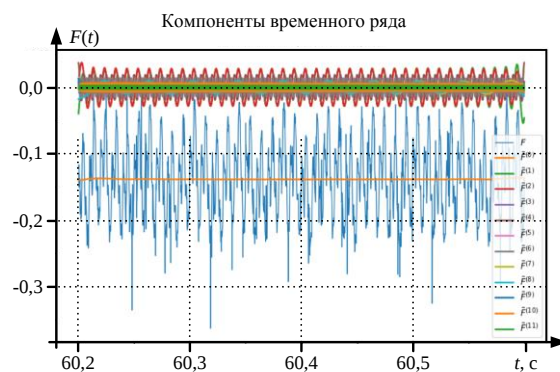


Рис. 5. Построение и разложение траекторной матрицы


 Рис. 6. Восстановление компонент $\tilde{X}$

РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном случае при идентификации и оценке подобных неявных повреждений двигателя визуальный анализ полученных результатов практически исключается, поэтому авторами подробно рассматривается уровень вклада и оценка миграции характерных компонент.

Расчёт относительного и кумулятивного вклада осуществляется по формулам:

$$RC_i = \frac{\sigma_i^2}{\sum_{k=0}^{d-1} \sigma_k^2}; \quad \sum_{i=0}^i RC_i = \frac{\sum_{j=0}^i \sigma_j^2}{\sum_{k=0}^{d-1} \sigma_k^2}. \quad (7)$$

Для оценки выделяются следующие группы компонент: группа 1 – трендовая, $\tilde{X}_0$; и несколько осцилляторных компонент, распределяющихся попарно. За базис принято нормальное состояние двигателя при номинальной нагрузке для этого режима: группа 2 – $\tilde{X}_1, \tilde{X}_2$; группа 3 – $\tilde{X}_3, \tilde{X}_4$; группа 4 – $\tilde{X}_5, \tilde{X}_6$; группа 5 – $\tilde{X}_7, \tilde{X}_8$; группа 6 – $\tilde{X}_9, \tilde{X}_{10}, \tilde{X}_{11}$ (...).

При оценке результатов (табл. 2) отчётливо прослеживается миграция компонент; например, при ослаблении креплений с левой стороны при нагрузке от $M_{\text{ном}}$ до $0,2 \cdot M_{\text{ном}}$ группы 1 и 2 меняются местами. В целом при остальных дефектах и режимах наблюдается периодическая перестановка групп 2-4. Также в состояниях с ослаблениями креплений наблюдается тен-

денция значительного снижения вклада компонент группы 5 (выделено синим) до полного её исчезновения, с появлением новых характерных компонент, которым присвоена принадлежность группам 7 и 8 (выделено оранжевым и красным соответственно). В табл. 3 на примере компоненты 11 приведена сменяемость компонент в разных режимах.

При рассмотрении изменения уровня вклада авторами выдвинута следующая гипотеза: при дефектах на очень ранней стадии развития, проявление которых малозначительно, вместо оценки вклада индивидуальных компонент следует обратить внимание на кумулятивное изменение вклада групп компонент.

В рассматриваемом случае можно выделить две категории групп: слабостационарные (группы 2-4) и мигрирующие (группы 5-8). На рис. 7 и 8 приведено изменение кумулятивного вклада указанных категорий.

Из графиков можно сделать вывод, что поведение кумулятивного вклада данных категорий является подобным, при этом вклад групп 2-4 демонстрирует слабую разделимость между характерами повреждений при номинальной нагрузке и проявляется только при снижении нагрузки до $0,01 \cdot M_{\text{ном}}$, среди дефектов наибольшего вклада достигает ослабление правого переднего и правого заднего креплений.

Таблица 2

Относительный вклад компонент в основной сигнал в крайних режимах нагрузки

№ п/п	$M_{\text{ном}}$			
	Нормальное состояние	ПЛ	ПП	ПП+ЗП
0	90,40123	91,49060	94,69263	90,35868
1	2,34471	1,28571	1,51615	2,88141
2	2,34153	1,28434	1,51397	2,87692
3	1,07104	1,16459	0,72308	1,22713
4	1,07083	1,16305	0,72249	1,22594
5	0,58439	1,04663	0,10716	0,14186
6	0,58385	1,04577	0,10707	0,14174
7	0,25314	0,18918	0,08679	0,11241
8	0,25004	0,18905	0,08672	0,11232
9	0,12472	0,06414	0,02633	0,07714
10	0,12462	0,05489	0,02604	0,07622
11	0,02064	0,03715	0,01146	0,02226
№ п/п	$0,01 \cdot M_{\text{ном}}$			
	Нормальное состояние	ПЛ	ПП	ПП+ЗП
0	94,81933	88,71696	87,99677	84,00491
1	0,97703	3,05296	3,75973	5,00010
2	0,97479	3,05058	3,75634	4,99561
3	0,47186	1,57047	1,26110	1,73587
4	0,47003	1,56818	1,26002	1,73318
5	0,25471	0,28166	0,36328	0,63085
6	0,25405	0,28133	0,36306	0,62996
7	0,14961	0,15926	0,20450	0,17425
8	0,14929	0,15749	0,19686	0,17407
9	0,01509	0,13485	0,10356	0,08554
10	0,01472	0,13114	0,10298	0,08283
11	0,01342	0,08790	0,06942	0,05086

Таблица 3
Миграция и развитие компоненты при разных состояниях машины и в различных режимах нагрузки на примере компоненты 11

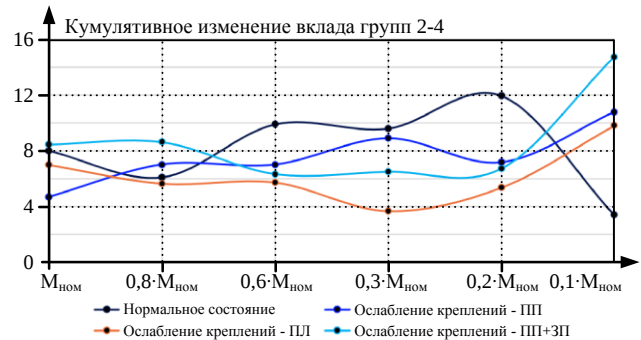
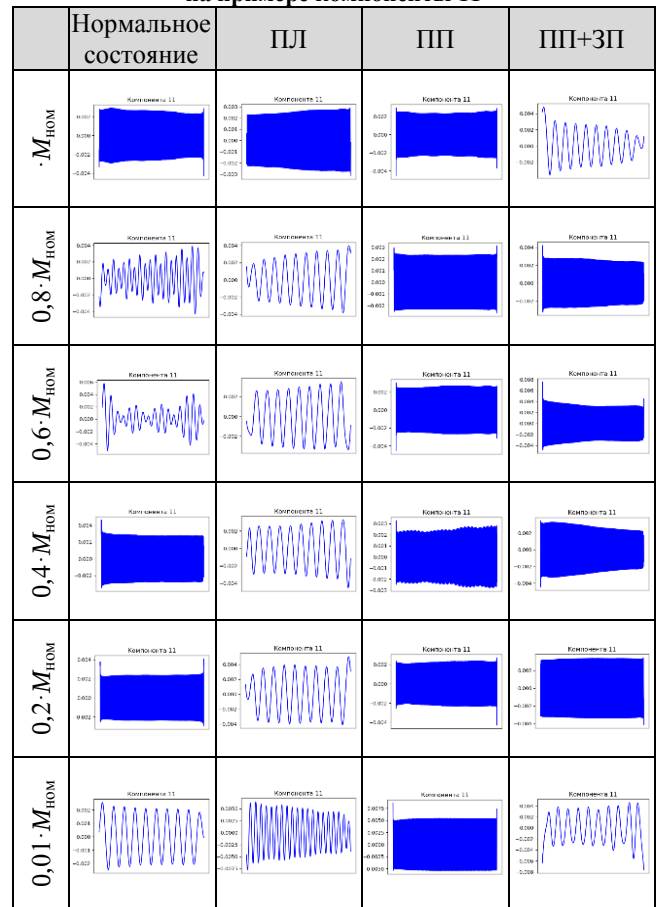


Рис. 7. Изменение вклада групп первой категории

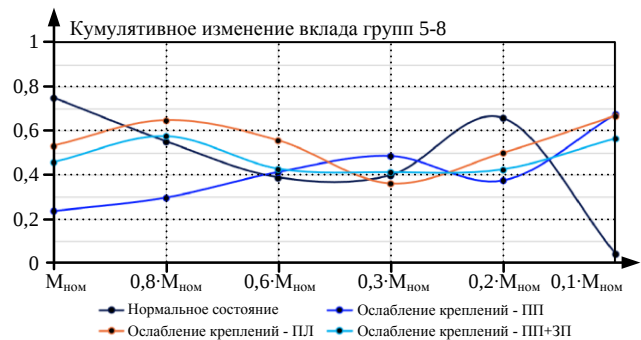


Рис. 8. Изменение вклада групп второй категории

При кумулятивном изменении вклада групп второй категории наибольшая дифференциация достигается между работой двигателя в нормальном состоянии и при ослаблении переднего правого крепления; разница

между вкладами дефектов при номинальной нагрузке составляет приблизительно 0,5 и 0,65 при движении к холостому ходу. Однако, как и в первой категории групп, отмечается резкая смена вектора кривой вклада в нормальном состоянии при снижении нагрузки при устойчивом нарастании вклада кривых дефектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлено отношение кумулятивного вклада групп 2-4 как наиболее информативных для двигателя в нормальном состоянии по отношению к двигателю с ослаблением креплений (ПП+ЗП). Отношение вкладов составляет 1,055 при номинальной нагрузке и 4,33 при нагрузке $0,01 \cdot M_{\text{ном}}$, рост вклада в 4,1 раза однозначно указывает на наличие дефекта. Аналогично для групп 5-8 отношение составляет 0,61 при $M_{\text{ном}}$ и 13,13 при $0,01 \cdot M_{\text{ном}}$, рост относительного вклада в 21,51 раза позволяет установить вид ослабления креплений. Совместный попарный анализ изменений в данных группах позволяет установить начало появления дефекта и определить место его возникновения на ранней стадии, что позволяет использовать данный алгоритм для реализации в системах диагностики.

Исследование выполнено в рамках СП-2587.2022.1 «Применение цифровых двойников для управления энергоэффективностью по прогнозируемому техническому состоянию автоматизированного электропривода нефтедобывающих предприятий».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Gangsar P., Tiwari R. Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review // Mechanical Systems and Signal Processing. 2020. Vol. 144. doi: 10.1016/j.ymssp.2020.106908
- Condition monitoring of induction machines: quantitative analysis and comparison / M. Sintoni, E. Macrelli, A. Bellini, C. Bianchini // Sensors. 2023. Vol. 23. doi: 10.3390/s23021046
- Augmented reality system and maintenance of oil pumps / N. Koteleva, G.V. Buslaev, V. Valnev, A. Kunshin // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2020. Vol. 33(8). Pp. 1620-1628. doi: 10.5829/ije.2020.33.08b.20
- A review of circular economy research for electric motors and the role of industry 4.0 technologies / D. Tiwari, J. Miscandlon, A. Tiwari, G.W. Jewell // Sustainability. 2021. Vol. 13. doi: 10.3390/su13179668
- Ewert P., Kowalski C.T., Orlowska-Kowalska T. Low-cost monitoring and diagnosis system for rolling bearing faults of the induction motor based on neural network approach // Electronics. 2020. Vol. 9(9). doi: 10.3390/electronics9091334
- Kozyaruk A.E., Tung I.V., Vasilev B.U. Improving the torque direct control method of the asynchronous motor in the converter using the active rectifier // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 1753. doi: 10.1088/1742-6596/1753/1/012025
- Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Иванов А.А. Цифровые двойники в горном машиностроении как инструмент повышения эффективности эксплуатации горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № S3-1. doi: 10.25018/0236_1493_2022_5_3_13
- Sankararaman S. Significance, interpretation, and quantification of uncertainty in prognostics and remaining useful life prediction // Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. Vol. 52-53. Pp. 228-247. doi: 10.1016/j.ymssp.2014.05.029
- Short-circuit fault diagnosis on induction motors through electric current phasor analysis and fuzzy logic / J.A. Reyes-Malanche, F.J. Villalobos-Pina, E. Ramirez-Velasco, E. Cabal-Yepez, G. Hernandez-Gomez, M. Lopez-Ramirez // Energies. 2023. Vol. 16(1). 516. doi: 10.3390/en16010516
- Bearing fault detection in induction motors using line currents / S. Muthukumaran, A. Rammohan, S. Sekar, M. Maiti, K. Bingi // ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications. 2021. Vol. 19(2). Pp. 209-219. doi: 10.37936/ecti-ec.2021192.244163.
- Current-based detection of mechanical unbalance in an induction machine using spectral kurtosis with reference / E. Fournier, A. Picot, J. Regnier, M.T. Yamdeu, J.-M. Andrejak, P. Maussion // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2015. Vol. 62(3). Pp. 1879-1887. doi: 10.1109/tie.2014.2341561
- Kompella K.D., Rao M.V.G., Rao R.S. Bearing fault detection in a 3 phase induction motor using stator current frequency spectral subtraction with various wavelet decomposition techniques // Ain Shams Engineering Journal. 2018. Vol. 9(4). Pp. 2427-2439. doi: 10.1016/j.asej.2017.06.002.
- Silva José L.H., Marques Cardoso A.J. Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach // 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. 2005. Pp. 2591-2596. doi: 10.1109/IECON.2005.1569315
- A soft sensor for measuring the wear of an induction motor bearing by the park's vector components of current and voltage / N. Koteleva, N. Korolev, Y. Zhukovskiy, G. Baranov // Sensors. 2021. Vol. 21(23). 7900. doi: 10.3390/s21237900
- Merizalde Y., Hernández-Callejo L., Duque-Perez O. State of the art and trends in the monitoring, detection and diagnosis of failures in electric induction motors // Energies. 2017. Vol. 10(7). 1056. doi: 10.3390/en10071056
- Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I. // IEEE Transactions on Industry Applications. 1985. Vol. IA-21(4). Pp. 853-864. doi: 10.1109/tia.1985.349532
- ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. М., 1997.
- Thomson W. Vibration monitoring of induction motors and case histories on shaft misalignment and soft foot // Vibration Monitoring of Induction Motors: practical diagnosis of faults via industrial case studies. Cambridge: Cambridge University Press, 2020. Pp. 1-46. doi: 10.1017/9781108784887.002
- The application of high-resolution spectral analysis for identifying multiple combined faults in induction motors / A. Garcia-Perez, R.J. Romero-Troncoso, E. Cabal-Yepez, R.A. Osornio-Rios // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011. Vol. 58(5). Pp. 2002-2010. doi: 10.1109/tie.2010.2051398
- Hachemi Benbouzid M. El. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2000. Vol. 47(5). Pp. 984-993. doi: 10.1109/41.873206.
- Князькина В.И., Иванов С.Л. Акустический сигнал как показатель деградационных процессов при техническом обслуживании горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-2. С. 223-236. doi: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_223
- Кузьмин О.В., Кедрин В.С. Анализ структуры гармонических рядов динамики на базе алгоритма сингулярного разложения // Проблемы управления. 2013. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-struktury-garmonicheskikh-ryadov-dinamiki-na-baze-algoritma>

- singulyarnogo-razlozheniya (дата обращения: 22.04.2022)
23. Golyandina N., Korobeynikov A. Basic singular spectrum analysis and forecasting with R // *Computational Statistics & Data Analysis*. 2014. Vol. 71. Pp. 934-954. doi: 10.1016/j.csda.2013.04.009
 24. Golyandina N. Particularities and commonalities of singular spectrum analysis as a method of time series analysis and signal processing // *WIREs Comput Stat*. 2020. Vol. 12. doi: 10.1002/wics.1487
 25. Господариков А.П., Ревин И.Е., Морозов К.В. Композитная модель анализа данных сейсмического мониторинга при ведении горных работ на примере Кукисвумчорского месторождения АО «Апатит» // *Записки Горного института*. 2023. Том. 262. С. 571-580. doi: 10.31897/PMI.2023.9
 26. Zhukovskiy Y., Buldysko A., Revin I. induction motor bearing fault diagnosis based on singular value decomposition of the stator current // *Energies*. 2023. Vol. 16(8). doi: 10.3390/en16083303
 27. Liang L., Liu C., Liu F. Bearing fault diagnosis based on singular value distribution of impulse response segment // *ISA Transactions*. 2023. Vol. 134. Pp. 511-528. doi:1016/j.isatra.2022.08.015
 28. Application of improved reweighted singular value decomposition for gearbox fault diagnosis based on built-in encoder information / Y. Miao, B. Zhang, Y. Yi, J. Lin // *Measurement*. 2021. Vol. 168. doi: 10.1016/j.measurement.2020.108295
 29. Zhao X., Ye B. Feature frequency extraction algorithm based on the singular value decomposition with changed matrix size and its application in fault diagnosis // *Journal of Sound and Vibration*. 2022. Vol. 526. doi: 10.1016/j.jsv.2022.116848
 30. Cui L., Liu Y., Zhao D. Adaptive singular value decomposition for bearing fault diagnosis under strong noise interference // *Measurement Science and Technology*. 2022. Vol. 3(9). doi: 10.1088/1361-6501/ac672b
 31. Feature Extraction Using Sparse Kernel Non-Negative Matrix Factorization for Rolling Element Bearing Diagnosis / L. Liang, X. Ding, F. Liu, Y. Chen, H. Wen // *Sensors*. 2021. vol. 21(11). P. 3680. doi: 10.3390/s21113680
 32. Датчик тока LA 25-NP/SP44. Технический паспорт. URL: https://www.lem.com/images/stories/files/RU/ru/Datasheets/la_25_np_sp44.pdf (дата обращения 14.05.2023)
 33. Датчик напряжения LV 25-P/SP5. Технический паспорт. URL: <https://doc.platan.ru/pdf/datasheets/lem/lv25-p-sp5.pdf> (дата обращения 14.05.2023)
 34. Mais J. Spectrum Analysis. The key features of analyzing spectra. SKF. 2002. URL: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968024acef-CM5118-EN-Spectrum-Analysis_tcm_12-113997.pdf (дата обращения 14.05.2023)
 35. Кужеков С.Л., Рогачев В.А. Сравнительный анализ спектров модулей обобщенного вектора тока статора и мгновенных значений фазных токов при распознавании эксцентриситета ротора асинхронного электродвигателя // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2008. № 4. С. 101-104.

Поступила в редакцию 29 мая 2023 г.

Принята к печати 23 августа 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DETECTION OF EARLY-STAGE MECHANICAL WEAKENING OF INDUCTION MOTOR BASED ON CONSUMPTION CURRENT SINGULAR VALUE DECOMPOSITION

Nikolai A. Korolev

Ph.D. (Engineering), Leading Research Scientist, Educational Research Center for Digital Technologies, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia, korolev_na@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0583-9695>

Aleksandra D. Buldysko

Post-graduate student, Electric Power and Electromechanics Department, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia, abuldysko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0685-0546>

Yuriy L. Zhukovskiy

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Director, Educational Research Center for Digital Technologies, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia, zhukovskiy_yul@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0312-0019>

One of the key tasks for achieving improved energy consumption and energy efficiency in the operation of electromechanical systems with induction motor drive is the development of reliable systems for diagnostics and assessment of the electromechanical equipment technical condition. Diagnostics based on intelligent approaches using machine learning tools allows building a proactive system for early detection of equipment defects and reducing operating costs. The paper presents a sequential application of Singular Spectrum Analysis (SSA) and Singular Value Decomposition (SVD) for induction motor fault detection. This approach is chosen on the basis of the conducted research in the field of current diagnostics methods and time series analysis methods. The description of the mathematical apparatus of the proposed method with the development of an algorithm for processing current and voltage signals was performed. Detection of defect occurrence at early stages allows expanding the range of detectable defects and faults. The methods were validated on the experimental laboratory bench of electric drive with the developed data

recording system. A total of four conditions of the machine under load variation are considered in the work, signal processing of which is performed in the Python programming language. To evaluate the results of the generalized current decomposition, the level of contribution and the migration estimation of the characteristic components separated categorically were investigated. Changes in the behavior and contributions of the cumulative contribution of the two categories demonstrate the onset of the fault occurrence and make it possible to differentiate the machine states. Thus, the results of the experiment on the loosening of electric motor mounting bolts prove the effectiveness of this diagnostic technique.

Keywords: induction motor, current diagnostics, fault diagnostics, singular value decomposition, SVD, signal components, technical condition, monitoring

REFERENCES

1. Gangsar P., Tiwari R. Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction mo-

- tors: A state-of-the-art review. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020, vol. 144. doi: 10.1016/j.ymssp.2020.10690
2. Sintoni M., Macrelli E., Bellini A., Bianchini C. Condition Monitoring of Induction Machines: Quantitative Analysis and Comparison. *Sensors*. 2023, vol. 23. doi: 10.3390/s23021046
3. Koteleva N., Buslaev G.V., Valnev V., Kunshin A. Augmented Reality System and Maintenance of Oil Pumps. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2020, vol. 33(8), pp. 1620-1628. doi: 10.5829/ije.2020.33.08b.20
4. Tiwari D., Miscandlon J., Tiwari A., Jewell G.W. A Review of Circular Economy Research for Electric Motors and the Role of Industry 4.0 Technologies. *Sustainability*. 2021, vol. 13. doi: 10.3390/su13179668
5. Ewert P., Kowalski C.T., Orłowska-Kowalska T. Low-Cost Monitoring and Diagnosis System for Rolling Bearing Faults of the Induction Motor Based on Neural Network Approach. *Electronics*. 2020, vol. 9(9). doi: 10.3390/electronics9091334
6. Kozyaruk A.E., Tung I.V., Vasilev B.U. Improving the torque direct control method of the asynchronous motor in the converter using the active rectifier. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021, vol. 1753. doi: 10.1088/1742-6596/1753/1/012025
7. Shibanov D.A., Ivanov S.L., Ivanov A.A. Digital doubles in mining engineering as a tool to improve the efficiency of mining machinery operation. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy bulletin*. [MIAB. Mining Information and Analytical Bulletin], 2022, no. S3-1. doi: 10.25018/0236_1493_2022_5_3_13 (In Russian)
8. Sankararaman S. Significance, interpretation, and quantification of uncertainty in prognostics and remaining useful life prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015, vol. 52-53, pp. 228-247. doi: 10.1016/j.ymssp.2014.05.029
9. Reyes-Malanche J.A., Villalobos-Pina F.J., Ramirez-Velasco E., Cabal-Yepez E., Hernandez-Gomez G., Lopez-Ramirez M. Short-Circuit Fault Diagnosis on Induction Motors through Electric Current Phasor Analysis and Fuzzy Logic. *Energies*. 2023, vol. 16(1), p. 516. doi: 10.3390/en16010516
10. Muthukumaran S., Rammohan A., Sekar S., Maiti M., Bingi K. Bearing Fault Detection in Induction Motors Using Line Currents. *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*. 2021, vol. 19(2), pp. 209-219. doi: 10.37936/ecti-ec.2021192.244163
11. Fournier E., Picot A., Regnier J., Yamdeu M. T., Andrejak J.-M., Maussion P. Current-Based Detection of Mechanical Unbalance in an Induction Machine Using Spectral Kurtosis With Reference. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015, vol. 62(3), pp. 1879-1887. doi: 10.1109/tie.2014.2341561
12. Kompella K.D., Rao M.V.G., Rao R.S. Bearing fault detection in a 3 phase induction motor using stator current frequency spectral subtraction with various wavelet decomposition techniques. *Ain Shams Engineering Journal*. 2018, vol. 9(4), pp. 2427-2439. doi: 10.1016/j.asej.2017.06.002
13. Silva José L.H., Marques Cardoso A.J. Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach. 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. 2005, pp. 2591-2596. doi: 10.1109/IECON.2005.1569315
14. Koteleva N., Korolev N., Zhukovskiy Y., Baranov G. A Soft Sensor for Measuring the Wear of an Induction Motor Bearing by the Park's Vector Components of Current and Voltage. *Sensors*. 2021, vol. 21(23), p. 7900. doi: 10.3390/s21237900
15. Merizalde Y., Hernández-Callejo L., Duque-Perez O. State of the Art and Trends in the Monitoring, Detection and Diagnosis of Failures in Electric Induction Motors. *Energies*. 2017, vol. 10(7), p. 1056. doi: 10.3390/en10071056
16. Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1985, vol. IA-21(4), pp. 853-864. doi:10.1109/tia.1985.349532
17. State Standard ISO 10816-1-97. Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Moscow, 1997. (In Russian)
18. Thomson W. Vibration Monitoring of Induction Motors and Case Histories on Shaft Misalignment and Soft Foot. In *Vibration Monitoring of Induction Motors: Practical Diagnosis of Faults via Industrial Case Studies*. Cambridge, Cambridge University Press, 2020, pp. 1-46. doi: 10.1017/9781108784887.002
19. Garcia-Perez A., Romero-Troncoso R. de J., Cabal-Yepez E., Osornio-Rios R.A. The Application of High-Resolution Spectral Analysis for Identifying Multiple Combined Faults in Induction Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011, vol. 58(5), pp. 2002-2010. doi: 10.1109/tie.2010.2051398
20. Hachemi Benbouzid M. El. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2000, vol. 47(5), pp. 984-993. doi: 10.1109/41.873206
21. Knyazkina V.I., Ivanov S.L. Improvement of the system of maintenance and repair of mining machines according to the actual state. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy bulletin*. [MIAB. Mining Information and Analytical Bulletin], 2022, no. 6-2, pp. 223-236. doi: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_223 (In Russian)
22. Kuzmin O.V., Kedrin V.S. Analysis of the structure of harmonic series of dynamics based on singular decomposition algorithm. *Problemy upravleniya* [Control Sciences], 2013, no. 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-struktury-garmonicheskikh-ryadov-dinamiki-na-baze-algoritma-singulyarnogo-razlozheniya> (accessed 22 April 2022). (In Russian)
23. Golyandina N., Korobeynikov A. Basic Singular Spectrum Analysis and forecasting with R. *Computational Statistics & Data Analysis*. 2014, vol. 71, pp. 934-954. doi: 10.1016/j.csda.2013.04.009
24. Golyandina N. Particularities and commonalities of singular spectrum analysis as a method of time series analysis and signal processing. *WIREs Comput Stat*. 2020, vol. 12. doi: 10.1002/wics.1487
25. Gospodarikov A.P., Revin I.E., Morozov K.V. Composite model of seismic monitoring data analysis during mining operations on the example of the Kukisvumchorrskoye deposit of AO Apatit. *Zapiski gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2023, vol. 262, pp. 571-580. doi: 10.31897/PMI.2023.9. (In Russian)
26. Zhukovskiy Y., Buldysko A., Revin I. Induction Motor Bearing Fault Diagnosis Based on Singular Value Decomposition of the Stator Current. *Energies*. 2023, vol. 16(8). doi: 10.3390/en1608330
27. Liang L., Liu C., Liu F. Bearing fault diagnosis based on singular value distribution of impulse response segment. *ISA Transactions*. 2023, vol. 134, pp. 511-528. doi:10.1016/j.isatra.2022.08.015
28. Miao Y., Zhang B., Yi Y., Lin J. Application of improved reweighted singular value decomposition for gearbox fault diagnosis based on built-in encoder information. *Measurement*. 2021, vol. 168. doi: 10.1016/j.measurement.2020.108295
29. Zhao X., Ye B. Feature frequency extraction algorithm based on the singular value decomposition with changed matrix size and its application in fault diagnosis. *Journal of Sound and Vibration*. 2022, vol. 526. doi: 10.1016/j.jsv.2022.116848
30. Cui L., Liu Y., Zhao D. Adaptive singular value decomposition for bearing fault diagnosis under strong noise interfer-

- ence. Measurement Science and Technology. 2022, vol. 3(9), doi: 10.1088/1361-6501/ac672b
 31. Liang L., Ding X., Liu F., Chen Y., Wen H. Feature Extraction Using Sparse Kernel Non-Negative Matrix Factorization for Rolling Element Bearing Diagnosis. *Sensors*. 2021, vol. 21(11), p. 3680. doi: 10.3390/s21113680
 32. Current Sensor LA 25-NP/SP44. Technical passport. Available at: https://www.lem.com/images/stories/files/RU/ru/Datasheets/la_25_np_sp44.pdf (accessed 14 May 2023). (In Russian)
 33. Voltage Sensor LV 25-P/SP5. Technical passport. Available at: <https://doc.platan.ru/pdf/datasheets/lem/lv25-p-sp5.pdf> (accessed 14 May 2023). (In Russian)
 34. Mais J. Spectrum Analysis. The key features of analyzing spectra. SKF. 2002. Available at: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968024acef-CM5118-EN-Spectrum-Analysis_tcm_12-113997.pdf (accessed 14 May 2023)
 35. Kuzhekov S.L., Rogachev V.A. Comparative analysis of stator current module spectra of the generalized stator current vector and instantaneous values of phase currents when recognizing the eccentricity of the induction motor rotor. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie Nauki*. [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences], 2008, no. 4, pp. 101-104. (In Russian)
-
- Королёв Н.А., Булдыско А.Д., Жуковский Ю.Л. Обнаружение ранней стадии ослабления механических креплений асинхронного двигателя на основе сингулярного разложения потребляемого тока // *Электротехнические системы и комплексы*. 2023. № 3(60). С. 72-80. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-72-80](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-72-80)
- Korolev N.A., Buldysko A.D., Zhukovskiy Yu.L. Detection of Early-Stage Mechanical Weakening of Induction Motor Based on Consumption Current Singular Value Decomposition. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 3(60), pp. 72-80. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-72-80](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-72-80)
-

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андреев Сергей Михайлович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, andreev.asc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0735-6723>

Анисимова Наталья Александровна – аспирант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, es091@mail.ru

Бондарева Альбина Робертовна – старший преподаватель, кафедра автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, a.bondareva@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1091-0107>

Бочкарев Игорь Викторович – д-р техн. наук, профессор, кафедра электромеханики, энергетический факультет, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызстан, elmech@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>

Буланов Михаил Викторович – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, bulanovv.m.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9051-1012>

Булдыско Александра Дмитриевна – аспирант, кафедра электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, abuldysko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0685-0546>

Варганова Александра Владимировна – канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, aleksandra-khlamova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4675-7511>

Верзунов Сергей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, лаборатория «Информационно-измерительных систем», институт машиноведения и автоматики, Национальная Академия Наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызстан, verzunov@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3130-2776>

Дудкин Максим Михайлович – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры, кафедра электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия, dudkinmax@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4876-8775>

Жуковский Юрий Леонидович – канд. техн. наук, доцент, директор, учебно-научный центр цифровых технологий, Санкт-Петербургский горный универ-

ситет, Санкт-Петербург, Россия, zhukovskiy_yul@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0312-0019>

Ивекеев Владимир Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, vivekeev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0730-8257>

Королев Николай Александрович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, учебно-научный центр цифровых технологий, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, korolev_na@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0583-9695>

Кравченко Олег Александрович – д-р техн. наук, профессор, ректор, Тульский государственный университет, Тула, Россия, info@tsu.tula.ru

Ле Ван Кань – аспирант, кафедра электрооборудования и промышленной электроники, Московский политехнический университет, Москва, Россия, canhlv.mta@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-5183-6077>

Логунова Оксана Сергеевна – д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой, кафедра вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, logunova66@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>

Маклаков Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, управление научной и инновационной деятельности, Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия, alexandr.maklakov.ru@iee.org, <https://orcid.org/0000-0001-7950-708X>

Мельников Михаил Сергеевич – студент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, andruxa645@mail.ru

Мещеряков Виктор Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра электропривода, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия, mesherek@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2887-3703>

Наркевич Михаил Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, директор, научный институт «Промбезопасность», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, narkevich_mu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6608-8293>

Николаев Александр Аркадьевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магни-

тогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, aa.nikolaev@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5014-4852>

Нужин Дмитрий Викторович – аспирант, кафедра автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, Nuzhin83@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7498-7979>

Охотниченко Алексей Васильевич – аспирант, кафедра вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, okhotnichenko.a.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0463-7589>

Петухова Ольга Игоревна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, petuhova-olg@mail.ru

Пикалов Владимир Владимирович – преподаватель, кафедра электропривода, Липецкий государ-

ственный технический университет, Липецк, Россия, wreditels@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2414-9689>

Соловьев Александр Эдуардович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра электротехники и электрооборудования, Тульский государственный университет, Тула, Россия, soaled@yandex.ru

Тулупов Платон Гарриевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, tulupov.pg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3058-2406>

Шишков Александр Николаевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра электрооборудования и промышленной электроники, Московский политехнический университет, Москва, Россия, shan1982@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9851-8745>

Юрченко Виктор Петрович – преподаватель, кафедра электропривода, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия, yurchenkovik@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-9929-6177>